

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи

Щелоков Евгений Алексеевич

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

2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Гладышев Анатолий Иванович

Самара – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
1 Обзор информационно-измерительных систем и устройств измерения параметров движения микрометеороидов.....	13
1.2 ИИС на основе контактных методов определения параметров движения объектов.....	16
1.3 ИИС на основе бесконтактных методов определения параметров движения объектов.....	19
1.4 Структура бесконтактной оптоэлектронной ИИС времяпролетного определения параметров движениям микрометеороидов	27
1.5 Постановка задач исследования	29
Выводы по главе 1.....	30
2 Математическое моделирование формирования световых завес, зон регистрации и их взаимодействия с микрометеороидами при определении геометрических параметров и вектора скорости.....	32
2.1 Основы теории модифицированного метода дулучевого встречно-параллельного времяпролетного измерения параметров движения микрометеороидов	32
2.2 Математические модели формирования плоских световых завес и зон регистрации микрометеороидов	42
2.3. Математическое моделирование взаимодействия микрометеороидов с плоскими световыми завесами и зоной регистрации микрометеороидов при определении вектора скорости, геометрических размеров и координаты центра микрометеороидов.....	48
2.4. Математическая модель взаимодействия микрометеороида с зоной регистрации из группы плоских световых завес без функции измерения координат	57

Выводы по главе 2.....	61
3 Метрологические характеристики бесконтактной оптоэлектронной иис определения скорости микрометеороидов и методы их улучшения..	64
3.1 Метрологическая модель основных погрешностей БОЭ ИИС	64
3.2 Составляющие погрешности измерения параметров движения микрометеороидов	70
3.3 Компенсация погрешности измерений вектора скорости и геометрических параметров ММ.....	86
3.4 Снижение погрешности измерения параметров движения микрометеороида, вызванной рассеянным излучением	88
3.5 Согласование энергетических и позиционных параметров	89
3.6 Учет и компенсация дополнительной погрешности применением тестовых сигналов.....	93
3.7 Самотест информационно-измерительной системы	95
3.8 Допусковый контроль	97
3.9 Исследование достоверности результатов измерения методом корреляционного анализа и метода Монте-Карло.....	100
Выводы по главе 3.....	105
4 Экспериментальные исследования компьютерной модели и лабораторного макета БОЭ ИИС определения вектора скорости микрометеороидов	107
4.1 Исследование имитационной модели модели БОЭ ИИС с плоскими световыми завесами	107
4.2 Моделирование взаимодействия световой завесы на зеркальной поверхности с микрочастицами, соизмеримыми с шириной луча	111

4.3 Экспериментальные исследования лабораторного макета БОЭ ИИС	112
4.3.1 Затухание оптического луча при отражении в системе из двух параллельных зеркал.....	112
4.3.2 Ограничения, накладываемые параметрами источников и приемников оптического излучения	115
4.4 Экспериментальные исследования лабораторного макета ОЭБ ИИС на основе лучей светодиодов	117
4.5 Экспериментальное исследование лабораторного макета ОЭБ ИИС на основе лучей лазерных диодов.....	121
Выводы по главе 4.....	125
Заключение	127
Список сокращений и условных обозначений.....	129
Список литературы	131
Приложение А	145
Приложение Б.....	147

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

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 V.,

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 [1-30].

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 [1-30].

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 H., Ye Z [18, 19, 22, 23, 26].

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 [22] предложена ИИС однолучевого времяпролетного 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.

Положения, выносимые на защиту:

- 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.); L 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.

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 [31-45], в том числе 3 в российских рецензируемых изданиях из списка ВАК РФ, 1 в рецензируемых изданиях Scopus, 1 патент.

Личный вклад автора.

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.

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.

1 ОБЗОР ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И УСТРОЙСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МИКРОМЕТЕОРОИДОВ

1.1 ИИС определения скорости движения микрометеороидов и применяемые методы измерения

Анализ публикаций по источникам, механическим, геометрическим и энергетическим параметрам космического мусора показывает актуальность исследований и практических разработок по созданию систем сбора статистики и защиты бортового оборудования и КА в целом от разрушающего воздействия высокоскоростных микрочастиц мусора и, в частности, микрометеороидов [1–17, 19, 20, 24, 27-30].

С середины 90-х годов 20 века в состав КА входят информационно-измерительные системы регистрации потоков и определения параметров движения ММ, которые выполняют следующие функции:

- определение параметров движения потоков и одиночных ММ с оценкой возможности их столкновения с КА;
- передача в систему управления положением КА информации об обнаружении и параметрах движущихся в его направлении высокоскоростных микрочастиц с высоким уровнем опасности поражения критических узлов КА;
- выполнение команд от системы управления КА, направленных на обеспечение работоспособности системы регистрации ММ при воздействии внешних дестабилизирующих факторов (ВДФ).

На рисунке 1.1 показана обобщенная структура ИИС регистрации и контроля параметров движения микрометеороидов в составе информационно-измерительной и управляющей системы КА, учитывающая современное состояние информационных технологий и измерительной техники. Особенностью структуры разработанной ИИС, необходимой для выполнения функции подготовки и реализации различных форм и вариантов

защиты КА от ММ, является возможность применения выносных измерительных блоков, которые размещаются на периферии зоны опасности – от нескольких единиц до нескольких десятков километров в зависимости от типа КА и его оборудования. В первую очередь, в такой защите нуждаются устройства, узлы и агрегаты, находящиеся на поверхности КА и не оснащенные средствами механической защиты.



Рисунок 1.1 – Обобщенная структурная схема ИИС определения параметров движения микрометеороидов в составе системы управления и контроля КА

Работой ИИС определения параметров движения ММ управляет система управления движением КА, сопряженная через бортовую вычислительную систему КА с приводом крышки КА и с системой измерения параметров и управления работой и положением выносных блоков ИИС для управления выводом выносных блоков на удаление до нескольких километров от КА. В

процессе запуска и штатной работы ИИС осуществляется периодическая коррекция пространственного размещения и ориентации выносных блоков. Связь между выносными блоками и бортовой частью аппаратуры ИИС осуществляется через систему связи по оптическому или радиоканалу.

Для анализа возможных вариантов структуры ИИС, разрабатываемой в исследовании, на рисунке 1.2 приведена классификация известных методов определения параметров движения микрометеороидов.

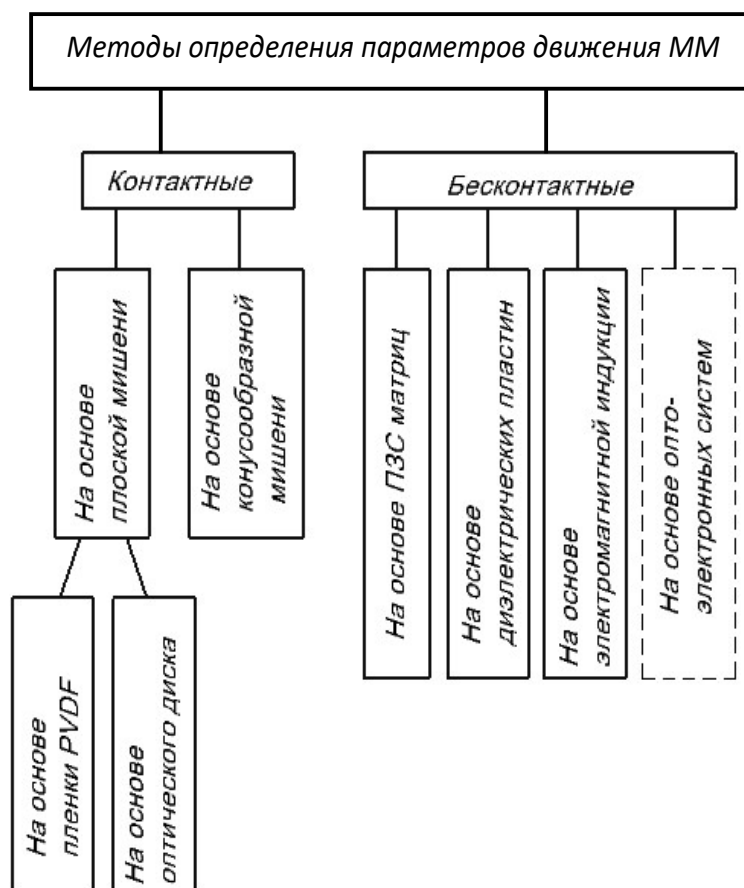


Рисунок 1.2 – Классификация методов определения параметров движения микрометеороидов

Различают две группы методов: контактные [1-4, 6-8, 11-17, 20, 21, 23-25] и бесконтактные [5, 9, 10, 18, 19, 22, 26-30]. Особенностью контактных методов является наличие в ИИС контактных чувствительных элементов – материальных мишеней. При контактном взаимодействии ММ с мишенью в

ней происходит преобразование кинетической энергии в другие виды энергии, как правило, в электромагнитную, включая оптический диапазон.

В бесконтактных методах изменение напряженности электромагнитных полей, а также физических параметров прямых и отраженных электромагнитных полей, вызванных движением ММ, оценивается дистанционно без контакта чувствительных элементов ИИС с ММ.

Для обоснования выбора структурной схемы измерительного канала и применяемого метода определения параметров движения ММ проведен обзор и сравнительный анализ технических решений, которые применяются при построении ИИС.

1.2 ИИС на основе контактных методов определения параметров движения объектов

Большинство технических реализаций ИИС определения параметров движения ММ используют контактные методы и средства определения параметров движения объектов (см. рисунок 1.2).

В первых приборах для измерения потоков твердых микрочастиц, устанавливаемых на КА, в качестве чувствительных элементов использовались пьезоэлектрические датчики [1]. Анализ результатов измерений показал, что такие датчики дают достаточно много ложных срабатываний, обусловленных изменениями их температуры. На рисунке 1.3 представлена структурная схема чувствительной части ИИС МЕТЕОР-М. При высокоскоростном ударе микрочастицы по мишени в ней распространяются упругие волны, которые регистрируются пьезодатчиками. Происходит образование плазменного сгустка, который под действием внешнего электрического поля распространяется в сторону электродов ионизационного датчика, сигнал с которого снимается с помощью зарядочувствительного усилителя.

По известным соотношениям [1] определяются такие параметры микрометеороидных тел как масса и скорость, от которых зависит суммарный заряд ионов, возникшего вследствие удара частицы о мишень:

$$Q^+ = ct^\alpha V_0^\beta, \quad (1.1)$$

где Q^+ - суммарный заряд ионов;

$$\alpha = 0,9 \pm 0,1, \quad \beta = 2,8 \pm 0,5;$$

t - масса микрометеороида;

V_0 - скорость микрометеороида;

c - постоянная, зависящая от свойств материала и приближенно равная 1×10^{-5} .

$$Q^+ = \int_0^\tau i(t)dt = \frac{1}{R_{\text{вх}}} \int_0^\tau U(t)dt, \quad (1.2)$$

где $R_{\text{вх}}$ - входное сопротивление усилителя;

$U(t)$ - зависимость напряжения на сетке ионизационного датчика от времени;

τ - длительность ионного импульса.

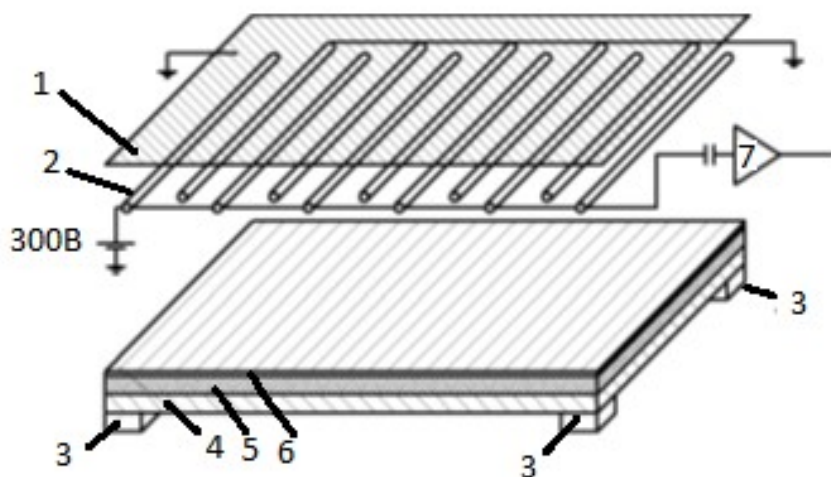


Рисунок 1.3 – Структура чувствительной части ИИС МЕТЕОР-М: 1 - заземлённая сетка; 2 - электроды ионизационного датчика; 3 – пьезодатчики; 4,5,6 – элементы мишени; 7 – усилитель с ионизационного датчика

Основные недостатки системы: не измеряются вектор скорости, пространственное распределение и концентрация ММ, движущихся с малой скоростью.

Ряд ИИС, к которым относится регистратор «Дусма» построен на основе поливинилиденфторидных пленок (PVDF). Система содержит три блока. Блок регистрации включает в себя счетчик, предназначенный для определения количества исследуемых объектов, блок анализа содержит масс-анализатор ММ, предназначенный для определения массы исследуемых объектов, электронный блок, предназначенный для первичной обработки информации. [2].

Рабочий элемент детектора блока «Дусма-Д» состоит из объемно поляризованной PVDF ($\delta=28$ мкм), имеющей на обеих поверхностях проводящие электроды и заключенной в цилиндрический кососрезанный тубус, скрепленный с корпусом из алюминиевого сплава.

При соударении ММ, обладающего большой кинетической энергией, с тонкой пленкой, из нее выбивается частица материала, при этом изменяется заряд на электродах детектора и генерируется короткий импульс тока во внешнюю цепь. Сгенерированный импульс тока после регистрации и предварительной обработки блоком электроники подается в бортовой комплекс управления (БКУ) космического аппарата. Накопленная за определенное время измерительная информация во время сеанса связи передается на Землю.

«Дусма» имеет следующие недостатки:

1. Не измеряются размер ММ и вектор их скорости;
2. Измерение потоков ММ, перемещающихся в ЗРМ по различным траекториям, ограничено заборным сечением и стенками цилиндрического кососрезанного тубуса;
3. При ударе ММ в стенку цилиндрического кососрезанного тубуса может произойти дробление этой частицы на рой осколков и осаждение как

осколков этой частицы, так и осколков, вырванных частицей из кратера стенки тубуса, на чувствительный элемент (пленку PVDF детекторного блока), что приводит к ошибочному срабатыванию, т.е. процесс определения параметров движения частиц становится непрезентативным;

4. С ростом числа регистрируемых ММ увеличивается вероятность пропуска частиц из-за попадания в точки с выбитыми участками чувствительного пленочного покрытия.

Принцип действия ряда разработанных зарубежных и отечественных ИИС основан на регистрации эмиссии электронов и ионов, возникающей при высокоскоростном ударе, масс-спектрометрических исследованиях состава эмитируемых ионов, регистрации световых вспышек и других физических явлениях. Для более точного определения параметров микрочастиц производится одновременная регистрация нескольких эффектов, сопровождающих высокоскоростной удар [2-7].

1.3 ИИС на основе бесконтактных методов определения параметров движения объектов

Известные реализации бесконтактных методов базируются на применении ПЗС-матриц, диэлектрических пластин, измерителей электромагнитной индукции, оптических регистраторов и световых завес [5, 8, 20-26, 33-42].

На рисунке 1.4 представлена бесконтактная ИИС на основе матриц из приборов с зарядовой связью (ПЗС-матриц) [5]. Система содержит две разнесенные в пространстве на базовую длину видеокамеры (оптические блоки), смонтированные вдоль одной линии. Оптические блоки содержат объективы с ПЗС-матрицами и блендами, соединенными между собой разvertываемой телескопической штангой, вокруг которой расположен цилиндр в виде пленочной структуры металл-диэлектрик-металл.

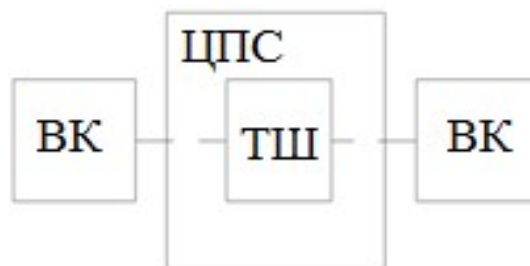


Рисунок 1.4 – Структурная схема ИИС на основе ПЗС-матриц: ВК – видеокамеры; ТШ – телескопическая штанга; ЦПС – цилиндр из пленочной структуры

В одном из оптических блоков установлен баллон с химическим отвердителем, соединенный с пьезоэлектрическим нагревателем. Оба оптических блока снабжены магнитной системой управления в виде магнитометра и трех электромагнитов, расположенных относительно друг от друга взаимно перпендикулярно, а также солнечным датчиком, GPS-приемником, фотодиодами, расположенными на боковых поверхностях, и бортовым компьютером. Каждый из оптических блоков соединен с двумя солнечными батареями. Телескопическая штанга механически соединена с двумя оптическими блоками диэлектрическими прокладками, причем она находится под отрицательным потенциалом, к внутренней обкладке пленочной структуры металл-диэлектрик-металл приложен положительный потенциал по отношению к ее внешней заземленной обкладке, верхняя обкладка структуры металл-диэлектрик-металл имеет продольный разрыв по всей ее длине, разделяющий структуру на две равные части. Каждая часть механически соединена с ПЗС-матрицей, а на внешних поверхностях пленочных структур установлены датчики температуры, соединенные с бортовым компьютером. Телескопическая штанга и пленочные структуры соединены с усилителем напряжения и заряда.

Основными недостатками системы являются необходимость подведения высокого напряжения питания к штангам и цилиндру измерительного блока, а также необходимость ориентации космического аппарата таким образом, чтобы солнечный свет не попадал на ПЗС матрицы и при этом попадал на

солнечные батареи КА, а также дорогая и сложная оптическая система, требующая операций по периодической юстировке в полете.

На рисунке 1.5 представлена схема ИИС на основе магниточувствительного детектора [8]. Предполагается, что микрочастицы имеют заряд, отличный от нуля, приобретенный вследствие взаимодействия с солнечным ветром. Детектор содержит катушку, выполненную из материала с низкими значениями удельного сопротивления и магнитной восприимчивости. Катушка имеет две одинаковые проточки по внешней стороне для обмоток 1. Количество и качество витков обмоток влияет на чувствительность детектора.

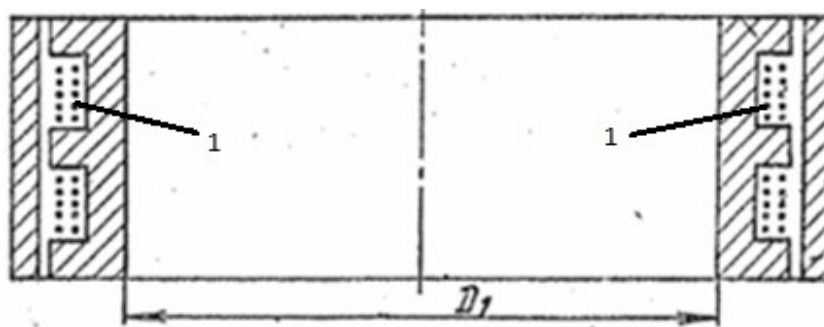


Рисунок 1.5 – Схема детектора микрометеороидов: 1 – обмотки, создающие изменение ЭДС

При пролете частицы внутри катушки в обмотках возникает электромагнитная индукция, величина которой пропорциональна скорости изменения магнитного потока через площадь, ограниченную диаметром D_1 . Магнитное поле от движущегося микрометеороида определяется суммой двух составляющих магнитного поля: поля, созданного движущимся зарядом, и поля, созданного наличием собственного магнитного момента. При приближении частицы к детектору в ближайшей обмотке возникает электромагнитная индукция, возрастающая с приближением метеороида к ее плоскости.

Недостатком системы является низкая достоверность результатов измерения, поскольку частица в случае пролета непараллельно обмоткам катушки детектора будет вызывать изменения ЭДС, не соответствующие расчётному.

Известны бесконтактные оптоэлектронные ИИС (БОЭ ИИС), в которых используется времяпролетный метод определения скорости объекта [22]. Метод включает определение координат точек и времени пролета объекта в зоне регистрации, содержащей группу из двух и более плоских световых завес (ПСЗ) из оптических лучей. Большинство ИИС строится на основе двух типов плоских световых завес (ПСЗ): светодиодных и лазерных.

На рисунках 1.6, 1.7 в качестве иллюстрации времяпролетного метода, применяемого в системах типа ФЭД-7М, представлена простейшая световая завеса, образованная световыми лучами линейной матрицы из N лазерных диодов (ЛД) [31, 32]. Излучение от i -го ЛД направлено на соответствующий i -й фотодиод (ФД) линейной матрицы из N ФД, установленной на расстоянии h на противоположной стороне ЗРМ.

Согласно методу две параллельные друг другу ПСЗ А и В на основе светодиодных и фотодиодных линеек смещены между собой на расстояние l_z вдоль оси z движения объекта и нормальны к этой оси (рисунок 1.7 а). При пролете объекта измеряется проекция вектора скорости на ось z :

$$V_z = \frac{l_z}{(T_z^{A-} - T_z^{B-})} , \quad (1.3)$$

где T_z^{A-} и T_z^{B-} – начальные значения времени интервала запираения лазерных лучей в ПСЗ А и В соответственно;

l_z – расстояние между фотодиодными и светодиодными линейками.

При наличии функции привязки линейки матриц СД и ФД к оси x такая ПСЗ позволяет определить параметры отклонения движения объекта от оси z .

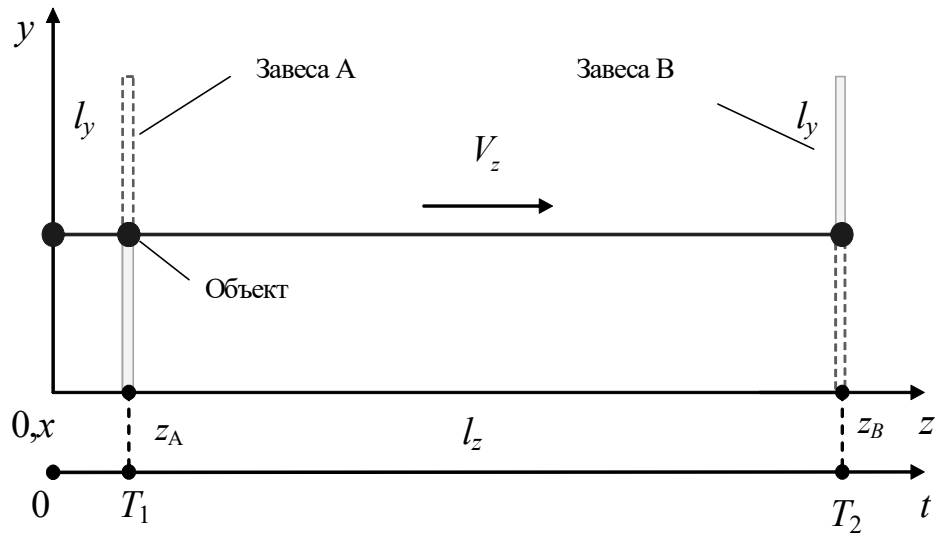


Рисунок 1.6 – принцип определения скорости объекта по времени пролета через две световые завесы

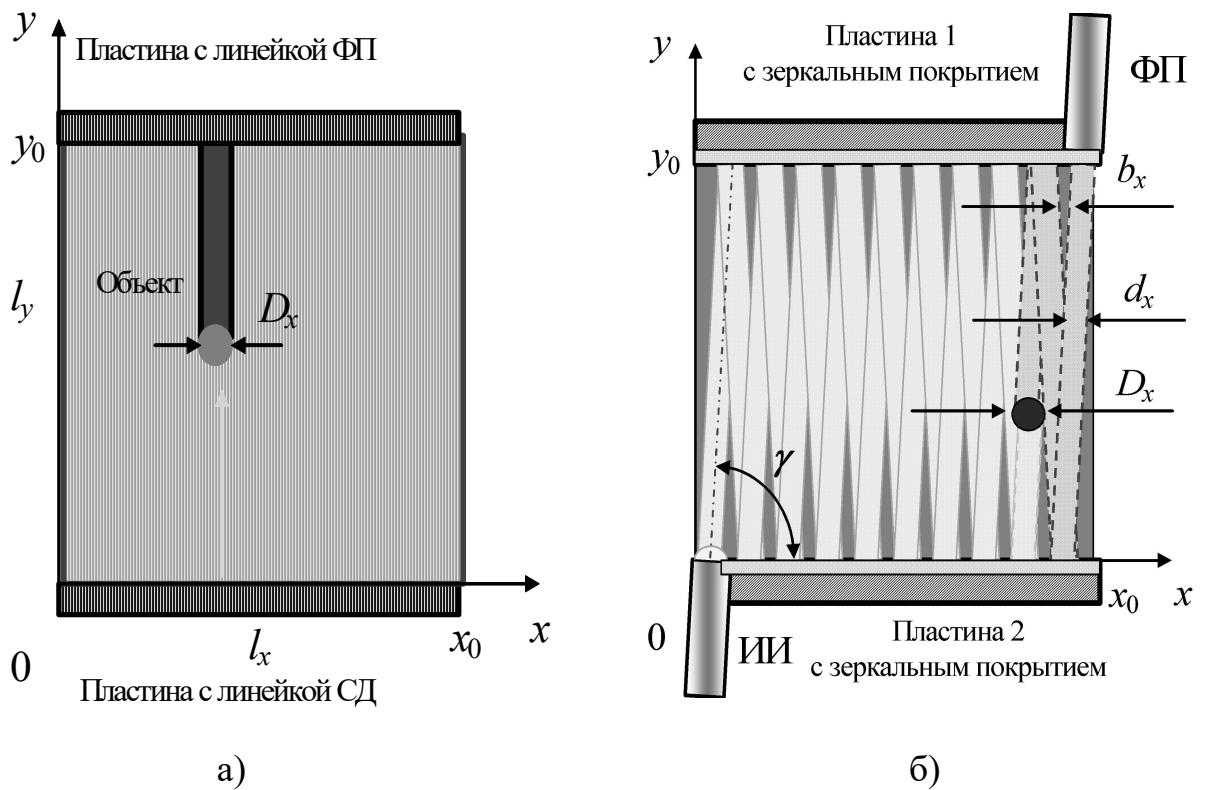


Рисунок 1.7 – Принцип времяпролетного метода определения параметров движения объекта через плоские световые завесы:
 а) – многолучевая светодиодная завеса; б) завеса из луча лазерного диода, многократно отраженного от зеркальных пластин;

ИИ – источники излучения; d – диаметр луча; b – расстояние между лучами;
 $l_x = x_0$ – длина плоскости завесы; $l_y = y_0$ – высота плоскости завесы.

Недостаток – отсутствие высокоточных и полнофункциональных ИИС вследствие сложности формирования координатных световых завес с высокой плотностью, необходимых для регистрации и определения угловых параметров движения ММ, так как диаметр современных бескорпусных ЛД и ФД в 5÷100 раз превышает минимальные размеры регистрируемых микрочастиц.

Завеса может создаваться непрерывными или импульсными источниками излучения. У импульсных завес при высоких энергетических показателях есть существенный недостаток – рост вероятности пропуска объекта с увеличением интервала отсутствия светового луча.

Известны системы с зонами регистрации, в которых световые завесы формируются многократным отражением луча лазерного диода 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 размера $D_{x\min}$ объекта, а луч, после всех отражений от пластин, при отсутствии объекта попадал по заданной траектории на ФП [22]. При пролете объекта через световые завесы А и В, он прерывает лучи от ИИ к ФП, начало интервалов прерывания которых в каждой завесе измеряется таймером (см. рисунок. 1.6). По времени $\Delta T = T_2 - T_1$ пролета объекта между завесами А и В в соответствии с (1.3) определяется его скорость.

На рисунке 1.7б представлен ход лазерного луча в световой завесе при многократном отражении луча лазерного диода от двух параллельно ориентированных в пространстве светоотражающих зеркальных пластин [22].

Одним из критических параметров ПСЗ является угол γ наклона луча к продольной оси x зеркал, который задает параметры пилообразной траектории движения оптического луча между параллельными отражающими пластинами от источника до приемника излучения. При

использовании непрерывного лазерного излучения получение информации о факте пролета ММ через световую завесу осуществляется путем фиксации времени отсутствия или уменьшения сигнала на фотоприемнике, в роли которого может выступать фотодиоды, фототранзисторы и другие ЭКБ, преобразующие световые сигналы в электрические.

К достоинствам системы с ПСЗ на основе луча ЛД, многократного отраженного от зеркальных пластин, относится меньшее на несколько порядков число задействованных ЛД и ФД по отношению к ПСЗ на основе линеек ЛД и ФД. При этом такие ПЗС обладают более высокой плотностью и разрешающей способностью за счет возможности применения ЛД с системой фокусировки луча, что делает его диаметр соизмеримым с минимальными размерами регистрируемых ММ.

Недостаток известных однолучевых БОЭ ИИС – отсутствие функции определения координат пересечения ПСЗ микрометеороидом и его геометрических размеров.

В таблице 1.1 приведены результаты сравнительного анализа основных методов определения параметров движения микрометеороидов. Основным отличием, дающим предпочтение бесконтактным методам, является отсутствие мишеней, деградация и повреждения которых значительно снижают срок их эксплуатации и погрешность измерения параметров. Из бесконтактных методов, наиболее перспективны построенные на применении оптоэлектронных устройств. Это дает основание для выбора БОЭ ИИС времяпролетного определения параметров движения ММ и конкретизации цели и задач исследований, направленных на расширение функциональных возможностей для определения полного вектора скорости и геометрических параметров регистрируемых ММ и снижение погрешности измерения, связанной с ограниченными возможностями современной элементной базы и применяемых материалов.

Таблица 1.1 – Сравнительный анализ основных методов определения параметров движения микрометеороидов

Наименование метода	Достоинства	Недостатки
На основе плоской мишени	Достоверная регистрация соударения ММ с рабочей поверхностью мишени.	Не определяется скорость и направление движения ММ. Деградация материала после соударения ММ с мишенью.
На основе конусообразной мишени	Увеличенная область исследований пространства за счет функции сбора ММ.	Не измеряется скорость и направление движения ММ. Деградация материала после соударения ММ с мишенью. Возможность ложного срабатывания при появлении осколков от соударения ММ с конусом.
На основе ПЗС матриц	Измеряются направление и скорость движения ММ.	Деградация материала после соударения ММ с мишенью. Высокое энергопотребление
На основе диэлектрических пластин	Измеряются направление и скорость движения ММ. Отсутствует физический контакт ММ с чувствительными элементами зоны регистрации ММ.	Достоверное определение параметров движения ММ практически невозможно вследствие невыполнимости требований к траектории пролета ММ через два отверстия в мишени
На основе электромагнитной индукции	Измеряются направление и скорость движения ММ. Отсутствует физический контакт ММ с чувствительными элементами зоны регистрации ММ. Достоверная регистрация пролета ММ через ЗРМ.	Не в полной мере исследовано изменение электромагнитной индукции при пролете частицы через ЗРМ. Отсутствует математическая модель определения параметров движения объекта
На основе оптических и оптоэлектронных устройств	Отсутствует физический контакт ММ с чувствительными элементами зоны регистрации ММ. Измеряются скорость движения ММ. Достоверная регистрация пролета ММ через ЗРМ.	Известные варианты не обладают функциональной полнотой, что не позволяет определять полный вектор движения и геометрические размеры ММ).

1.4 Структура бесконтактной оптоэлектронной ИИС времяпролетного определения параметров движениям микрометеороидов

Учитывая общие черты, достоинства и недостатки систем, методов и чувствительных элементов, описанных в [1-30, 46-57], в работе предложена структура бесконтактной оптоэлектронной ИИС определения параметров движения микрометеороидов, представленная на рисунке 1.8.

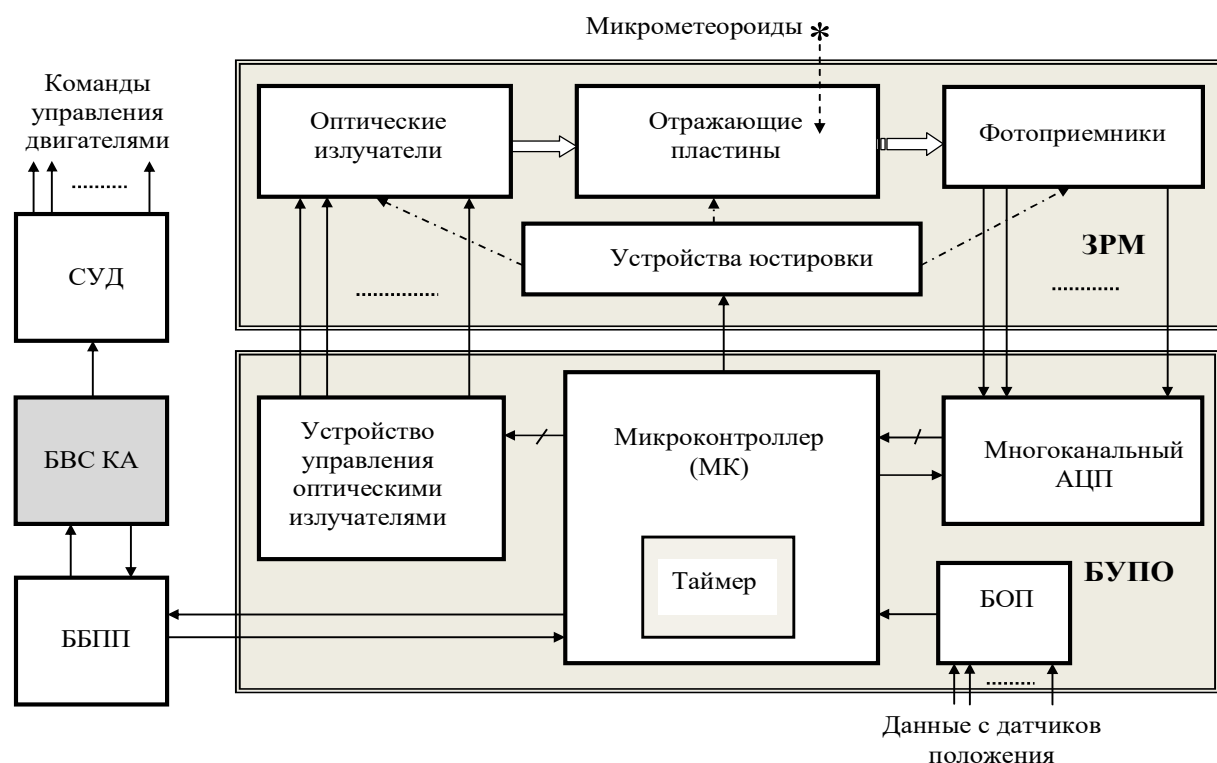


Рисунок 1.8 – Структурная схема БОЭ ИИС

Структурными элементами, определяющими функциональные возможности ИИС и погрешность измерения параметров движения ММ являются оптические излучатели, фотоприемники, отражающие плоскости и таймер в составе микропроцессора.

Для снижения степени отрицательного воздействия потоков ММ, космического мусора и других внешних дестабилизирующих факторов (ВДФ) ухудшающих работоспособность компонентов, ИИС разделяется на

три типа блоков: один в составе КА и два выносных. 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 приемо-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; съем 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 (ПСЗ), формируемых источниками излучения, отражающими пластинами и фотоприемниками (см. рисунок 1.6).

Особенностью предложенной структуры ИИС является осуществление диагностического самоконтроля, калибровки и юстировки структурных элементов ЗРМ перед запуском системы, в периодически осуществляемом тестовом режиме и при обнаружении метрологических отказов по результатам оценки критической составляющей погрешности в рабочих условиях. Основные причины метрологических отказов: выход из строя источников и приемников излучения; повреждение, загрязнение и деформация отражающих пластин, нарушение траектории лучей световых завес вследствие различных внешних дестабилизирующих факторов (ВДФ) и естественного старения и износа материалов. Часть причин не поддается

устранению и компенсации доступными средствами, например, выход из строя источников и приемников излучения. В этом случае фиксируется метрологический отказ ИИС. Если следствием одной из причин может быть нарушение траектории лучей световых завес, то запускается заложенная в алгоритме функция юстировки зеркал и углового положения источников излучения (ИИ) и фотоприемников (ФП). Процесс юстировки сопровождается переходом ИИ в импульсный режим для оценки динамических параметров измерительного канала после ФП.

После подтверждения работоспособного состояния система переходит в ждущий режим работы, характер и параметры которого определяются применяемым времяпролетным методом определения скорости движения ММ через ЗРМ и параметрами таймера интервалов прерывания лучей световых завес.

1.5 Постановка задач исследования

Обработка измерительной информации, осуществляемая в ИИС, структурная схема которой представлена на рисунке 1.7, относится к стандартным вычислительным операциям, поэтому задачи расширения функциональных возможностей и снижения погрешности измерения вектора скорости ММ возлагаются на выносные блоки предложенной структуры БОЭ ИИС.

В процессе исследования необходимо решить следующие задачи:

- 1) разработать принцип действия и структурную схему БОЭ ИИС определения вектора скорости ММ на основе модифицированного времяпролетного метода с увеличенным числом и расширенным диапазоном измеряемых параметров движения высокоскоростных объектов;
- 2) построить математические модели формирования световых завес и ЗРМ из групп плоских световых завес (ПСЗ) с различной взаимной

пространственной ориентацией, созданных двулучевыми встречно-параллельными лазерными лучами;

- 3) разработать модели взаимодействия зоны регистрации и ММ;
- 4) проанализировать погрешности измерения вектора скорости ММ, разработать способы и средства их компенсации;
- 5) разработать алгоритм самоконтроля работоспособности ИИС;
- 6) провести вычислительный и лабораторный эксперименты с применением действующего макета БОЭ ИИС определения вектора скорости ММ.

Выводы по главе 1

1. Дана классификация ИИС определения параметров движения ММ в зоне полета КА, приведены примеры исполнения, выявлены достоинства и недостатки применяемых в них контактных и бесконтактных методов измерения.
2. Показана перспективность бесконтактных методов измерения, обеспечивающих высокую разрешающую способность и долговременную работоспособность реализующих их ИИС при взаимодействии с высокоскоростными (до 30 км/с) ММ с диаметром от 1 до 100 мкм.
3. Построена обобщенная схема бесконтактной оптоэлектронной ИИС (БОЭ ИИС) измерения вектора скорости ММ, реализующей времяпролетный метод измерения параметров движения ММ через плоские световые завесы и содержащей удаленные от КА выносные блоки регистрации и первичной обработки информационно-измерительных сигналов.
4. Показано, что структура выносных блоков, принципы и технические средства формирования световых завес определяют объем зоны регистрации ММ (ЗРМ), количество и диапазоны измеряемых параметров, достоверность регистрации и погрешность измерения вектора скорости движения ММ.

5. Определена структура исследований ЗРМ ИИС, направленных на расширение функциональных возможностей времяпролетного лучепрерывающего метода измерения и снижение инструментальной погрешности.

2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ СВЕТОВЫХ ЗАВЕС, ЗОН РЕГИСТРАЦИИ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С МИКРОМЕТЕОРОИДАМИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ВЕКТОРА СКОРОСТИ

2.1 Основы теории модифицированного метода двулучевого встречно-параллельного времяпролетного измерения параметров движения микрометеороидов

В основе теоретического решения задач контроля положения или перемещения объектов с помощью лазерного излучения лежат принципы прерывания сигнала и отражения светового потока (от зеркальной поверхности или объекта), благодаря чему появляется возможность получения информации об объектах, проходящих через предлагаемую виртуальную мишень (в дальнейшем световую завесу) [49-83].

Для простоты решения задачи получения информации о параметрах перемещения объектов, как правило, применяются упрощенные методы (с помощью единичного лазерного луча или единичной плоскости, например лазерные устройства систем безопасности). Такой подход не позволяет в полной мере оценить параметры движения объекта.

В основу модифицированного метода времяпролетного измерения скорости движения микрометеороидов положено измерение времени прерывания распространения оптического луча измеряемым объектом от двух вместо одного источников излучения ИИ1 и ИИ2, размещенных на противоположных концах измерительной линии вдоль оси координат r на расстоянии R друг относительно друга без формирования световой завесы (рисунок 2.1). Аналогичным образом размещены спаренные с ними фотоприемники ФП1 и ФП2. Расстояние h между лучами должно обеспечивать их полное прерывание объектом. В идеале $h=0$, что достигается применением волоконно-оптических лазеров, фотодиодов с волоконно-

ОПТИЧЕСКИМ ВХОДОМ И ДВУНАПРАВЛЕННЫХ СПЕКТРАЛЬНО-СЕЛЕКТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ РАЗВЕТВИТЕЛЕЙ [84].

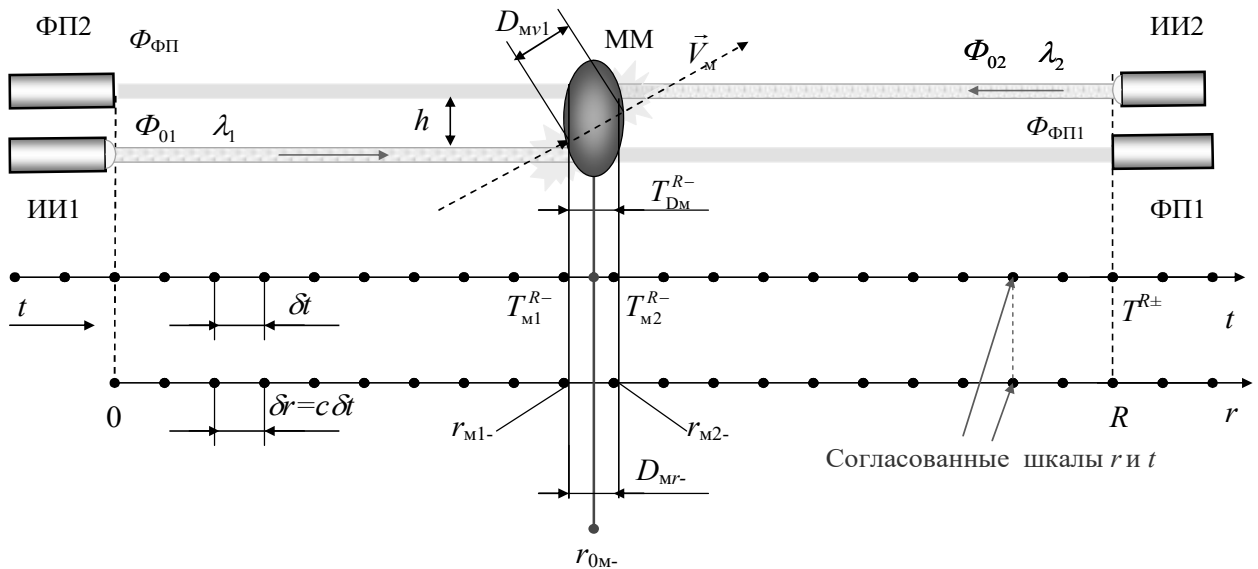


Рисунок 2.1 – Иллюстрация метода двулучевого встречно-параллельного времяпролетного измерения скорости движения микрометеороида

Прерывание (–) оптических лучей ИИ1 и ИИ2 свидетельствует о пересечении микрометеороидом измерительного канала сформированного встречно-параллельными лучами. Восстановление (+) лучей ИИ1 и ИИ2 означает выход ММ из измерительного канала. Неполное перекрытие и восстановление лучей приводит к ошибке регистрации, и для снижения вероятности пропуска ММ формируются световые завесы из плотно «уложенных» световых лучей, которые будут рассмотрены в следующих подразделах.

При непрерывно функционирующем таймере можно осуществить согласование шкалы времени измерения со шкалой пространственной координаты измерения в соответствии с формулами

$$R = cT^{\pm}, \quad (2.1)$$

где c – скорость света в вакууме,

T^\pm – время отключения (–) или восстановления (+) измерительного канала при включении и отключении ИИ.

$$\delta R = c \cdot \delta t ,$$

где δR – цена деления шкалы R измерительного канала,

δt – цена деления шкалы времени.

По значениям времени перекрытия T_{M1}^{R-} и восстановления T_{M1}^{R+} луча ИИ1, перекрытия T_{M2}^{R-} и восстановления T_{M2}^{R+} луча ИИ2 в соответствии с рисунками 2.1 и 2.2 строится математическая модель линейной шкалы R измерения, с помощью которой определяют:

- координату $r_{M1-} = cT_{M1}^{R-}$ перекрытия луча ИИ1 и координату $r_{M2-} = cT_{M2}^{R-}$ перекрытия луча ИИ2;
- координату $r_{M1+} = cT_{M1}^{R+}$ восстановления луча ИИ1 и координату $r_{M2+} = cT_{M2}^{R+}$ восстановления луча ИИ2;
- геометрические размеры ММ по оси r : $D_{Mr-} = |r_{M2-} - r_{M1-}|$ по координатам перекрытия лучей ИИ1 и ИИ2 или $D_{Mr+} = |r_{M2+} - r_{M1+}|$ по координатам восстановления лучей ИИ1 и ИИ2;
- координату центра ММ по оси r : $D_{0Mr-} = r_{M1-} + \frac{r_{M2-} - r_{M1-}}{2}$ по координатам перекрытых лучей ИИ1 и ИИ2 или $D_{0Mr+} = r_{M1+} + \frac{r_{M2+} - r_{M1+}}{2}$ по координатам восстановленных лучей ИИ1 и ИИ2;
- геометрические размеры ММ по оси, направление которой задается направлением движения ММ по формулам $D_{MV1} = c(T_{M1}^{R+} - T_{M1}^{R-})$ или $D_{MV2} = c(T_{M2}^{R+} - T_{M2}^{R-})$ по времени перекрытия и восстановления луча ИИ1 или ИИ2, соответственно;
- при допущении шарообразной формы микрометеороида, например,
 $D_M = D_{Mr-} = |r_{M2-} - r_{M1-}| = c(T_{M1}^{R+} - T_{M1}^{R-}),$

– скорость пролета ММ через измерительный канал:

$$V_M = \frac{D_M}{T_{M1}^{R+} - T_{M1}^{R-}}.$$

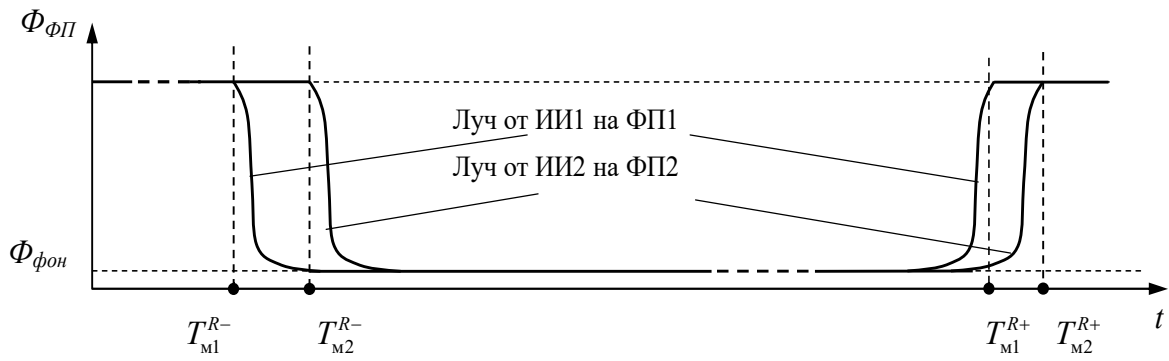


Рисунок 2.2 – Измерение времени прерывания и восстановления лучей ИИ1 и ИИ2 для определения координат входа и выхода ММ из измерительного канала

На рисунке 2.3 показан принцип преобразования однокоординатной линейной шкалы OR в однокоординатную шкалу $0x_0$ плоской световой завесы (ПСЗ) высотой l_y и, соответственно, координаты r_m в координату x_m пересечения луча в ПСЗ.

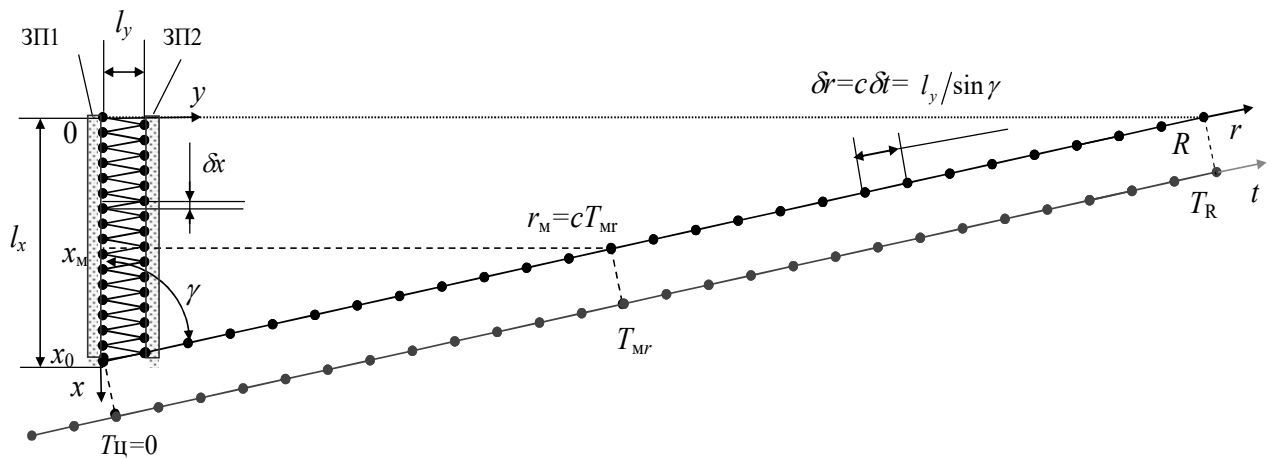


Рисунок 2.3 – Преобразование времени T_{Mf} лучепрерывания в точке r_m по шкале OR в координату x_m точки лучепрерывания по шкале $0x_0$ при однокоординатном времяпролетном методе измерения

Координата прерывания луча объектом по оси x определяется из выражения:

$$x_m = r_m \cdot \cos \gamma = c T_{Mf} \cdot \cos \gamma, \quad (2.2)$$

где γ – угол наклона оптического луча относительно оси Ox_0 световой завесы;

c – скорость света в вакууме;

$T_{м-}$ – время начала интервала прерывания оптического луча измеряемым объектом (микрометеороидом);

r_m – пространственная координата по оси r .

Для задания значений высоты l_y и длины l_x ПСЗ, а также угла γ наклона луча источника излучения (ИИ), необходимо учитывать форму, плотность и разрешающую способность световой завесы, привязанные к энергетическим параметрам источников и приемников излучения с учетом многократного отражения лазерного луча между двумя зеркальными поверхностями.

Световой поток на входе ФП после многократного отражения луча световой завесы от зеркальных поверхностей равен:

$$\Phi_r(\lambda, r) = \Phi_0(\lambda) k_{отр}^{N_{отр}} \cdot k_{дн}(r) \xi(\lambda) \frac{S_{ФП}^*}{R^2}, \quad (2.3)$$

где $\Phi_0(\lambda)$ – световой поток на выходе ИИ;

λ – длина волны излучения;

r – расстояние от ИИ до анализируемой точки по координате луча OR ;

R – расстояние между ИИ и ФП;

$k_{отр}$ – коэффициент отражения материала зеркальных поверхностей;

$k_{дн}(r)$ – коэффициент расширения диаграммы направленности от расстояния от ИИ;

$N_{отр}$ – количество отражений;

$\xi(\lambda)$ – коэффициент спектрального пропускания оптической системы;

$S_{ФП}^* = S_{ФП} \cap S_d$ – площадь $S_{ФП}$ чувствительной поверхности ФП, геометрически сопряженной с площадью S_d пятна, создаваемого оптическим лучом в плоскости расположения чувствительной поверхности ФП.

Упрощенная формула выходного сигнала фотоприемника в стационарном режиме функционирования завесы без учета воздействия внешних факторов, погрешностей деформации отражающих поверхностей и пространственного позиционирования ИИ и ФП, а также внутренних шумов ФП, имеет вид:

$$U_{\text{ФП}} = U_R + U_{\phi} = \Phi_R F_{\text{ФП}}(\lambda, S_{\text{ФП}}^*) + \Phi_{\phi} F_{\text{ФП}}(\lambda, S_{\text{ФП}}), \quad (2.4)$$

где Φ_R – световой поток от ИИ в зоне расположения чувствительной поверхности ФП;

Φ_{ϕ} – фоновый световой поток на чувствительной поверхности ФП;

$F_{\text{ФП}}(\lambda, S_{\text{ФП}}^*)$ – функция преобразования светового потока от ИИ;

$F_{\text{ФП}}(\lambda, S_{\text{ФП}})$ – функция преобразования фонового светового потока.

Порог чувствительности ФП по световому потоку, достаточный для принятия решения о функционировании завесы, задается из соотношений

$$\Phi_R - \Phi_{\phi} \geq 0, \quad (2.5)$$

$$\Phi_{\text{пор}} = \Phi_R - \Phi_{\phi} + \Delta\Phi, \quad (2.6)$$

где $\Delta\Phi$ – величина, определяемая параметрами ФП и особенностями построения ПСЗ.

Количество отражений, определяющих геометрические размеры ПСЗ, ограничивается мощностью ИИ, порогом чувствительности ФП, поглощением в материале отражающих пластин и оптическим фоном от внешних источников.

Получена зависимость максимального числа $N_{\text{отр}}$ отражений от значений $\Phi_{\text{пор}}$ и Φ_0 :

$$N_{\text{отрmax}} = \log_{k_{\text{отр}}} \left(\frac{\Phi_{\text{пор}}}{\Phi_0} \right) \quad (2.7)$$

где $\Phi_{\text{пор}}$ – пороговое значение чувствительности ФП по световому потоку;

Φ_0 – световой поток на выходе ИИ.

Учитывая изложенное авторами [82-85] в современных оптических системах возможно достиг диаграмму направленности лазерного луча без учета дополнительных фокусировок менее 1° с помощью уменьшения поперечного импульса электронов за счет трения, что позволяет повысить энергию лазера, тем самым более эффективно ускорять электроны.

На основании [86] допускается считать тепловые и дробовые шумы белым шумом. В соответствии с [85] в настоящее время достигаются диаграммы направленности лазерной техники с расхождением не более 1° .

На рисунке 2.4 показана зависимость диаметра сфокусированного луча от расстояния между ИИ и ФП при разных значениях коэффициента $k_{\text{дн}}(R)$. На рисунке 2.5 представлена зависимость диаметра луча и затухания от количества отражений при различных значениях. Допущения, заложенные в график – расстояние между зеркальными поверхностями составляет 0,1 м, угол ИИ составляет 89° , начальная мощность ИИ – 30 мВт, ширина пучка лазера 5 мкм.

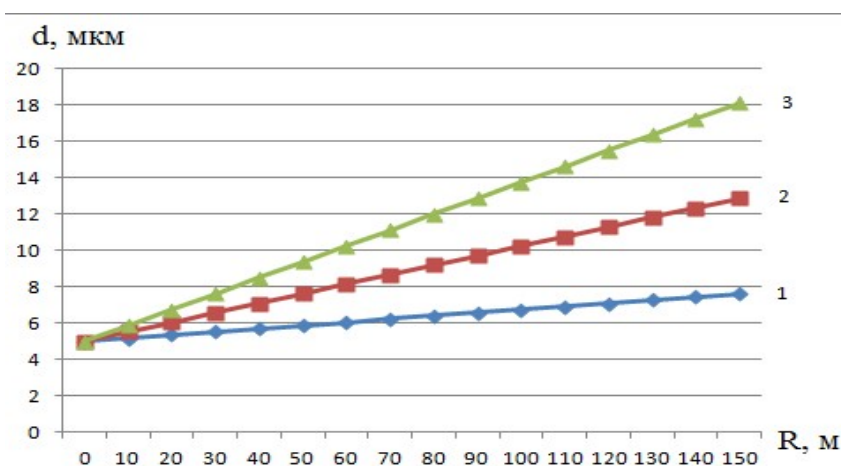


Рисунок 2.4 – Зависимость диаметра луча от расстояния между ИИ и ФП без учета отражений от зеркальных поверхностей (1- $k_{\text{дн}} = 1,01$, 2- $k_{\text{дн}} = 1,03$, 3 – $k_{\text{дн}} = 1,05$)

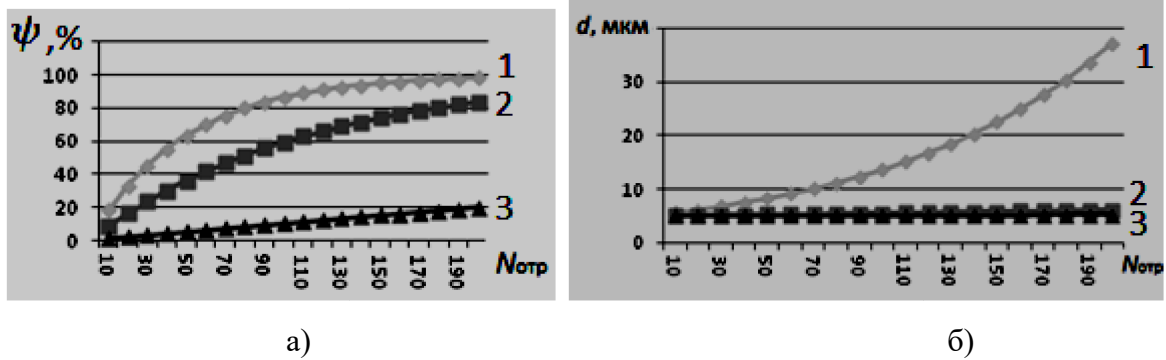


Рисунок 2.5 – Графики зависимости затухания (а) и диаметра (б) оптического луча ЛД от числа отражений: 1 - $k_{отр} = 0,99$; $k_{инд} = 0,99$; 2 - $k_{отр} = 0,992$; $k_{инд} = 0,999$; 3 – $k_{отр} = 0,999$; $k_{инд} = 0,9999$

Учитывая, что в настоящее время существуют системы, позволяющие обеспечивать ширину пучка до 5 мкм [87] и в соответствии с проведенным анализом научной и технической литературы подтверждается возможность фокусировать лазерный луч различными методами [77-82] прием ширину пучка равную 1 мкм (на основании [88] ширина активной области лазеров достигает 1 мкм).

Коэффициент заполнения встречной двулучевой световой завесы зависит от угла γ в соответствии с выражением:

$$k_{з1} = 1 - \frac{2(N_{отр} - 1)d_x \text{ctg} \gamma}{l_x} - \frac{d_x^2 \text{tg} \gamma}{2l_y l_x} \quad (2.8)$$

где $N_{отр}$ – количество отражений лазерного луча от зеркальных поверхностей;

$d_x = b_{x\max}$ – сечение луча по оси x ;

$b_{x\max}$ – максимальное расстояние между смежными лучами по оси x ;

γ – угол направления луча относительно оси x ;

l_x и l_y – длина и высота плоскости завесы соответственно.

На рисунке 2.6 проиллюстрированы заполняемость и геометрические параметры встречной двулучевой ПСЗ в зависимости от трех значений угла наклона луча одной из двух оптронных пар ИИ.

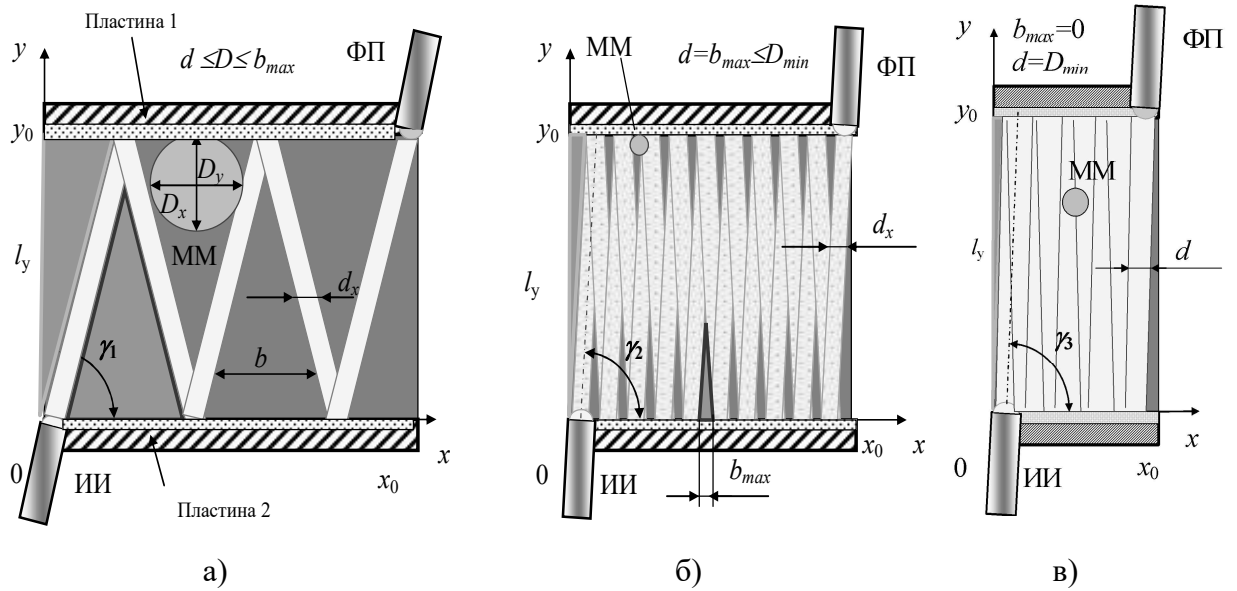


Рисунок 2.6 – Заполняемость и геометрические параметры встречной двулучевой ПСЗ при разных значениях угла наклона луча ИИ: а) $\gamma_1 > \text{arctg}\left(\frac{D}{l}\right)$; б) $\gamma_2 = \text{arctg}\left(\frac{D}{l}\right)$; $\gamma_3 < \text{arctg}\left(\frac{D}{l}\right)$

На рисунке 2.7 представлен график зависимости коэффициента заполнения при двулучевой встречной завесе.

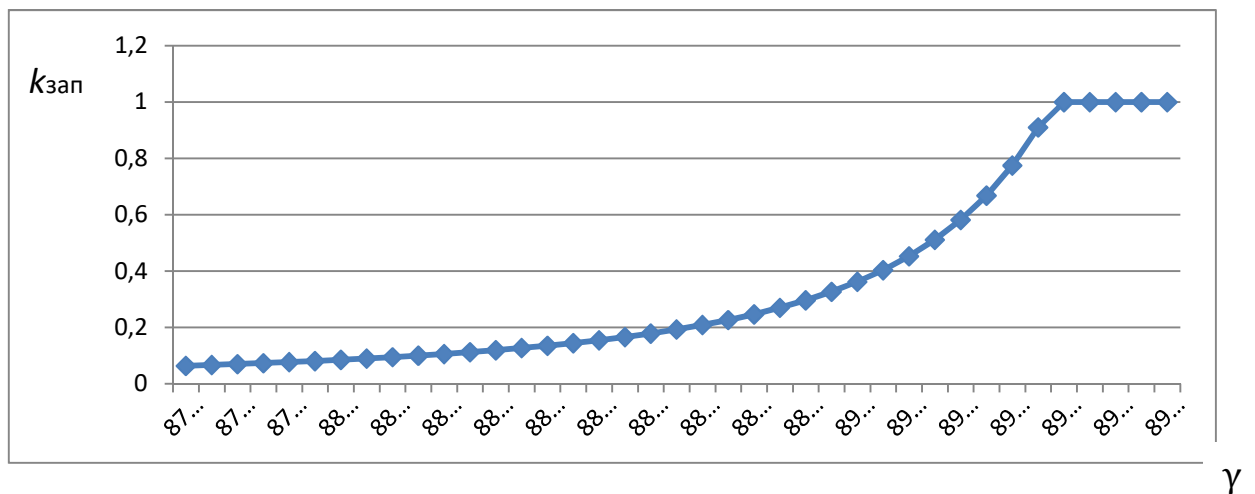


Рисунок 2.7 – График зависимости коэффициента заполнения ПСЗ от γ

Предложенный метод позволяет определить координаты пересечения световой завесы x с погрешностью, зависящей от разрешающей способности таймера и динамических параметров ЛД и ФД. В частности существуют лазерные дальномеры с разрешающей способностью таймера от до 100 пс [89] до 5 фс [90-92]. Поэтому с учетом разрешающей способности таймера высота завесы $l_y \geq 0,1$ м а диапазон углов лазерного луча относительно оси x $89,43^\circ < \gamma < 90^\circ$. Для оценки показателей по коэффициенту заполнения световой завесы, а также энергетических характеристик рассмотрим вариант двулучевой встречно-параллельной световой завесы, представленный на рисунке 2.8. Особенностью такой ПСЗ является смещение встречных лучей ИИ1 и ИИ2 по оси x на величину половины диаметра d луча при сохранении расстояния b_x между собственными смежными лучами.

Коэффициент заполнения встречно-параллельной двулучевой ПСЗ при $d_{x1} = d_{x2} = d = b_{x\max} = \Delta l_x$ и $\gamma = \gamma_1 = \gamma_2$ равен:

$$k_{32} = 1 - \frac{l_y \operatorname{ctg} \gamma}{l_x} \quad (2.9)$$

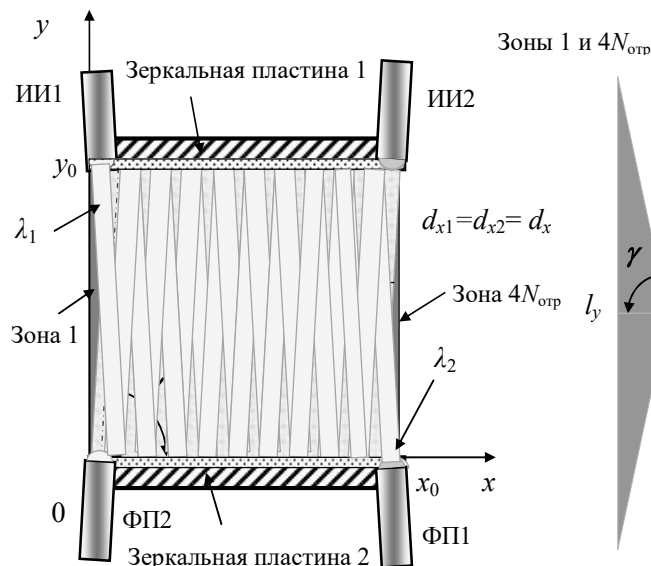


Рисунок 2.8 – Двухнаправленное формирование световой завесы с встречно-параллельными лучами

Как видно из соотношений 2.8 и 2.9, $k_{32}/k_{31} > 1$. Это означает, что встречно-параллельные ПСЗ по критерию плотности более эффективны, чем однолучевые и встречные двулучевые.

2.2 Математические модели формирования плоских световых завес и зон регистрации микрометеороидов

Предложенный модифицированный метод двулучевого времяпролетного измерения параметров движения и реализующая его БОЭ ИИС в отличие от известных методов и систем направлены на расширение зоны захвата и регистрации ММ за счет увеличения геометрических размеров и плотности ПСЗ, а также на измерение всех составляющих вектора скорости и геометрических размеров ММ в трехмерной системе координат.

Особенностью функционирования БОЭ ИИС определения параметров движения ММ является наличие следующих основных этапов:

- запуск ПСЗ и переход ЗРМ в режим ожидания ММ;
- установившийся режим ожидания попадания ММ в ЗРМ;
- цикл времяпролетного измерения параметров движения ММ в ЗРМ;
- восстановление ПСЗ и переход ЗРМ в режим ожидания ММ.

Математические модели двулучевых встречно-параллельных ПСЗ в установившемся режиме ожидания ММ относятся к стационарным моделям с сосредоточенными параметрами и описываются системами оптико-геометрических и оптико-энергетических уравнений, связывающих геометрические и энергетические параметры оптических лучей в каждой точке однокоординатной световой завесы.

Совмещение ортогональных однокоординатных световых завес в одной плоскости позволяет определять координаты x_M и y_M объекта попадающего в произвольную точку ПСЗ квадратной формы, в которой $l_x = l_y = l$.

На рисунке 2.9 показана такая ПСЗ А квадратной формы, совмещающая в одной плоскости исходную квадратную ПСЗ A_x и ортогональную ей завесу

$$\begin{aligned}
& A_x(\Phi_{01}, \Phi_{02}, \lambda_1, \lambda_2, \xi_1(\lambda), \xi_2(\lambda), k_{\text{отр}}, n_{\text{отр1}}, n_{\text{отр2}}, k_{\text{ДН1R}}, k_{\text{ДН2R}}, R_1, R_2, \delta r, \gamma_1, \gamma_2) \doteq \\
& \begin{cases}
x_1 = d_{x1} n_{\text{отр1}} = r_1 \cos \gamma_1, \quad n_{\text{отр1}} = 0, N_{\text{отр1}}, r_1 = 0, R_1 \\
y_1 = \begin{cases} 0 & \text{при } n_{\text{отр1}} = 0, 2, 4, \dots \\ y_0 \geq \delta r \sin \gamma_1 & \text{при } n_{\text{отр1}} = 1, 3, 5, \dots \end{cases} \\
\Phi_1(x_1, y_1, \lambda_1) = k_{\text{отр}}^{n_{\text{отр1}}} k_{\text{ДН1R}}(x_1, y_1) \frac{\Phi_1(\lambda = \lambda_1, x_1 = 0, y_1 = 0) \xi_1(\lambda) S_{\text{ФП1}} \cos^2 \gamma_1}{d_{x1}^2} \geq \Phi_{1\text{пор}} \\
x_2 = x_0 - d_{x2} n_{\text{отр2}} = r_2 \cos \gamma_2, \quad n_{\text{отр2}} = 0, N_{\text{отр2}}, r_2 = 0, R_2 \\
y_2 = \begin{cases} y_0 \geq \delta r \sin \gamma_2 & \text{при } n_{\text{отр2}} = 0, 2, 4, \dots \\ 0 & \text{при } n_{\text{отр2}} = 1, 3, 5, \dots \end{cases} \\
\Phi_2(x_2, y_2, \lambda_2) = k_{\text{отр}}^{n_{\text{отр2}}} k_{\text{ДН2R}}(x_2, y_2) \frac{\Phi_2(\lambda = \lambda_2, x_2 = x_0, y_2 = y_0) \xi_2(\lambda) S_{\text{ФП2}} \cos^2 \gamma_2}{d_{x2}^2} \geq \Phi_{2\text{пор}}
\end{cases} \doteq \quad , (2.10)
\end{aligned}$$

где x_1, y_1, x_2, y_2 – координаты позиций анализируемых точек первого и второго лучей ПСЗ соответственно;

R_1, R_2 – линейризованное расстояние между ИИ1 и ФП1, ИИ2 и ФП2 соответственно;

$r_1 = 0 \div R_1, r_2 = 0 \div R_2$ – линейные координаты позиций анализируемых точек первого и второго встречно-параллельных лучей соответственно;

δr - цена деления линейной шкалы OR ;

$n_{отр1}, n_{отр2}$ – текущее значение количества отражений, соответствующих позиции анализируемой координаты ПСЗ;

$k_{отр}$ – коэффициент отражения зеркальных поверхностей, характеризующий уменьшение светового потока;

$k_{днр}$ – коэффициент расширения диаграммы направленности, привязанный к линейному расстоянию между ИИ и анализируемой координатой ПСЗ;

$N_{отр1}, N_{отр2}$ – количество отражений первого и второго лучей от зеркальных поверхностей между ИИ и ФП при формировании ПСЗ;

$\xi(\lambda)$ – коэффициент спектрального пропускания оптической системы;

$S_{ФП}^*$ – площадь чувствительной поверхности ФП, геометрически сопряженной с пятном от оптического луча;

d_{x1} и d_{x2} – начальные диаметры сечения оптических лучей 1 и 2 в форме эллипса в направлении главной оси Ox_0 в точках $x_1=0$ и $x_2= x_0$ соответственно;

γ_1 и γ_2 – углы направления лучей ИИ1 и ИИ2 в x -координатной ПСЗ относительно оси x ;

λ_1 и λ_2 – центральные длины волн первого и второго оптических лучей;

$\Phi_1(x_1, y_1, \lambda_1)$, $\Phi_2(x_2, y_2, \lambda_2)$ – световой поток лучей ИИ1 и ИИ2 соответственно на координатных позициях анализируемых точек ПСЗ;

$\Phi_{1пор}$, $\Phi_{2пор}$ – принятые пороговые значения светового потока первого и второго лучей ПСЗ в зоне расположения соответствующих ФП.

Модель позволяет строить и анализировать двулучевые однокоординатные ПСЗ с различными геометрическими и энергетическими характеристиками, учитывающими требуемые значения позиционной чувствительности, геометрических форм, размеров и плотности завес при определении геометрических размеров и координаты пересечения завесы динамическим объектом.

Модель формирования однокоординатной y -чувствительной ПСЗ A_y с парными источниками и приемниками встречно-параллельного излучения при распространении света в вакууме описывается аналогичной (2.10) системой уравнений с зеркальной заменой переменных x и y :

В 2.1 для расширения возможностей ИИС предложены два варианта построения ПСЗ на основе модифицированного двулучевого времяпролетного встречного метода – встречная и встречно-параллельная, в которых ИИ1 и ИИ2 излучают на разных длинах волн, а углы направления лучей на зеркальные поверхности $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$. При этом позиционирование ИИ и ФП может осуществляться в вариантах: со смещением на один шаг шкалы $0x_0$, со смещением по шкале $0z_0$, с применением волоконно-оптического разветвителя и др.

Модель двухкоординатной ПСЗ (ДПСЗ) A_{xy} описывается формулой пространственного совмещения и ортогонализации двух ПСЗ A_x и A_y с одинаковыми значениями высоты и ширины завес: $l_x = l_y = l$:

$$A_{xy} \in A_x \perp A_y. \quad (2.11)$$

Построение ЗРМ из ДПСЗ с идентичными геометрическими, энергетическими и физико-химическими параметрами существенно упрощает математические модели ЗРМ и алгоритмы определения параметров движения и геометрических размеров ММ.

Метод модифицированного двулучевого встречно-параллельного времяпролетного измерения вектора скорости ММ основан на измерении

координат (x_M, y_M, z_M) ближайших к ИИ локаций центров области лучепрерывания в ДПСЗ на входе (точка M^A) и на выходе (точка M^B) зоны регистрации ММ (ЗРМ) при пролете ММ через две пары ДПСЗ $A \in A_x \perp A_y$ и $B \in B_x \perp B_y$, разнесенных по оси z на расстояние l_z (рисунок 2.10).

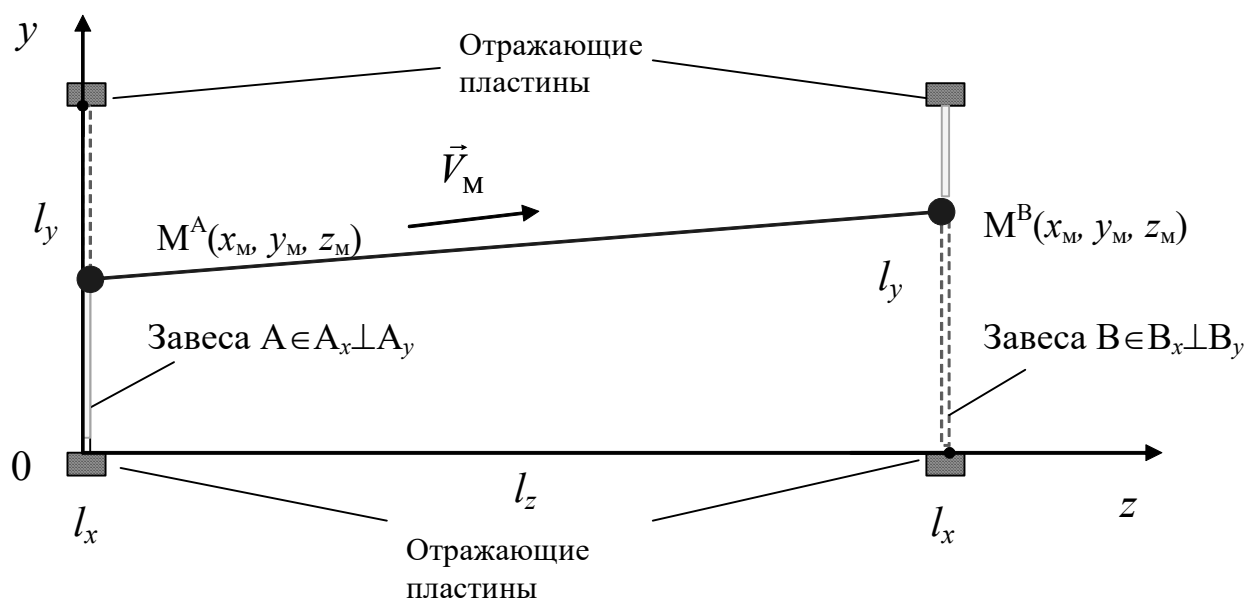


Рисунок 2.10 – Траектория полета ММ между параллельными ЗРМ А и ЗРМ В, разнесенным на расстояние l_z перпендикулярно оси z :
 $M^A(x_M=0\dots l_y; y_M=0\dots l_y; z_M=0)$; $M^B(x_M=0\dots l_x; y_M=0\dots l_y; z_M=l_z)$

По аналогии с математическими моделями формирования одно- и двухкоординатных ПСЗ модель формирования ЗРМ представляет собой стационарную модель с сосредоточенными параметрами, содержащую систему оптико-геометрических и оптико-энергетических уравнений, связывающих геометрические и энергетические параметры оптических лучей в каждой точке трехмерной системы координат $0XYZ$ ЗРМ.

ЗРМ может содержать от двух и более ДПСЗ квадратной и иной формы, размещенных в трехмерном пространстве таким образом, чтобы с заданной разрешающей способностью определять вектор скорости ММ в широком диапазоне углов их движения через ЗРМ. При этом расстояние между ДПСЗ

определяется также максимальными значениями размеров D_{mx} , D_{my} и D_{mz} регистрируемого ММ.

2.3. Математическое моделирование взаимодействия микрометеороидов с плоскими световыми завесами и зоной регистрации микрометеороидов при определении вектора скорости, геометрических размеров и координаты центра микрометеороидов

Математическая модель взаимодействия ММ с однокоординатной ПСЗ относится к динамическим моделям с распределенными параметрами. Модель представляет собой систему уравнений, связывающих временные и геометрические параметры бинарного энергетического состояния ПСЗ в точках пересечения встречно-параллельных оптических лучей. При этом возможны варианты модели: по времени начала и по времени окончания интервала прерывания оптических лучей. Знак (–) при символе завесы (А, В, С и т.д.) означает начало интервала перекрытия луча, знак (+) – его восстановление. Прерывание (–) оптических лучей в завесе A_x и аналогичным образом в завесах A_y , B_x и B_y (см. рисунок 2.10) свидетельствует о входе в эти завесы ММ. Восстановление (+) лучей означает выход ММ из составляющих плоскостей А или В соответственно.

Признаком прерывания луча считается уменьшение светового потока $\Phi(\lambda_i)$ ниже порогового уровня $\Phi(\lambda_i)_{\text{пор}}$ на длине волны i -й оптронной пары, восстановления – превышение порогового уровня. На рисунке 2.11 в качестве примера показано графическое изображение построения модели взаимодействия ММ и ПСЗ по времени начала пересечения лучей в точках x_{m1} и x_{m2} однокоординатной завесы A_x .

- высоту ММ по отсчетам y_1 и y_2 по оси y завесы А и по отсчетам y_1 и y_2 по оси y завесы В отдельно.

Модель взаимодействия ММ с однокоординатной завесой A_x в режиме прерывания лучей при определении координаты центра и размеров ММ, представленной на рисунке 2.11, описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{aligned}
 & x_{M0}^{A-} \\
 & D_{Mx}^{A-}
 \end{aligned} \right\} \left(\Phi_{01}, \Phi_{02}, d_{x1}, d_{x2}, \lambda_1, \lambda_2, \xi_{M1}, \xi_{M2}, k_{отр}, n_{отр1}, n_{отр2}, k_{ДН1R}, k_{ДН2R}, \delta t, \gamma_1, \gamma_2 \right) \doteq \\
 & \left. \begin{aligned}
 & x_{M1}^{A-} = cT_{x1}^{A-} \cos \gamma_1 = cT_{x1}^{A-} \cos \left(\arctg \left(\frac{l_y}{d_{x1}} \right) \right) \\
 & n_{отр1} = \frac{cT_{x1}^{A-}}{l_y \sin \gamma_1} \\
 & y_{M1}^{A-} = \begin{cases} 0 & \text{при } n_{отр1} = 0, 2, 4, \dots \\ y_0 \geq c\delta t \sin \gamma_1 & \text{при } n_{отр1} = 1, 3, 5, \dots \end{cases} \\
 & \Phi_{\phi1}(x_{M1}^{A-}, y_{M1}^{A-}, \lambda) = k_{отр}^{n_{отр1}} k_{ДН1x} \left(cT_{x1}^{A-} \right) \Phi_{01}(\lambda, x_{M1}^{A-} = 0, y_{M1}^{A-} = 0) \xi_{M1}(x_{M1}^{A-}, y_{M1}^{A-}, \gamma_1) < \Phi_{пор\lambda 1} \\
 & \doteq \left. \begin{aligned}
 & x_{M2}^{A-} = cT_{x2}^{A-} \cos \gamma_2 = cT_{x2}^{A-} \cos \left(\arctg \left(\frac{l_y}{d_{x2}} \right) \right) \\
 & n_{отр2} = \frac{cT_{x2}^{A-}}{l_y \sin \gamma_2} \\
 & y_{M2}^{A-} = \begin{cases} 0 & \text{при } n_{отр2} = 0, 2, 4, \dots \\ y_0 \geq c\delta t \sin \gamma_2 & \text{при } n_{отр2} = 1, 3, 5, \dots \end{cases} \\
 & \Phi_{\phi2}(x_{M2}^{A-}, y_{M2}^{A-}, \lambda) = k_{отр}^{n_{отр2}} k_{ДН2x} \left(cT_{x2}^{A-} \right) \Phi_{02}(\lambda, x_{M2}^{A-} = x_0, y_{M2}^{A-} = y_0) \xi_{M2}(x_{M2}^{A-}, y_{M2}^{A-}, \gamma_2) < \Phi_{пор\lambda 2} \\
 & D_{Mx}^{A-} = |x_{M1}^{A-} - x_{M2}^{A-}| \\
 & x_{M0}^{A-} = x_{M1}^{A-} + \frac{D_{Mx}^{A-}}{2} = x_{M2}^{A-} - \frac{D_{Mx}^{A-}}{2}
 \end{aligned} \right\} \quad , (2.12)
 \end{aligned}$$

где x_{M0}^{A-} – координата центра ММ по оси Ox_0 ;

D_{Mx}^{A-} – линейный размер ММ по оси Ox_0 ;

x_{M1}^{A-}, x_{M2}^{A-} – координаты точек прерывания лучей ИИ1 и ИИ2;

T_{x1}^{A-}, T_{x2}^{A-} – время начала интервала прерывания луча ИИ1 и ИИ2;

δt – разрешающая способность таймера;

c – скорость света в вакууме;

$\xi_{M1}(x_{M1}^{A-}, y_{M1}^{A-}, \gamma_1), \xi_{M2}(x_{M2}^{A-}, y_{M2}^{A-}, \gamma_{21})$ – индикатрисы рассеяния

отраженного от ММ света при прерывании лучей ИИ1 и ИИ2;

$\Phi_{\phi 1}(x_{M1}^{A-}, y_{M1}^{A-}, \lambda), \Phi_{\phi 2}(x_{M2}^{A-}, y_{M2}^{A-}, \lambda)$ – фоновые световые потоки в

зоне ФП1 и ФП2.

Алгоритм измерения параметров движения геометрических размеров ММ представлен на рисунке 2.12.

После запуска формирования ПСЗ и ЗРМ система переходит в режим ожидания. В силу высокой разрешающей способности таймера постоянный учет времени ожидания ММ не ведется, либо это время измеряется по грубой шкале, не привязанной к процессу измерения. При влете ММ, например, в плоскость А по срабатыванию первого из каналов измерения времени прерывания лучей от ИИ1-ИИ4 запускается таймер цикла измерения параметров ММ ($T_{ц} = 0$).

Пусть таймер запускается по прерыванию луча x_1 в завесе А, т.е. $T_{x2}^{A-} > T_{x1}^{A-}$. Тогда время $T_{x1}^{A-} = 0$ принимается за начало шкалы времени цикла измерения. Длительность $T_{ц}$ цикла измерения задается априорно, исходя из максимальной длины пути ММ в ЗРМ и заданного минимального значения модуля вектора $|V_M|$ измеряемой скорости. По значениям времени T_{x1}^{A-}, T_{x2}^{A-} определяются значения координаты x_M центра ММ и его размер D_{mx} по оси x .

На рисунке 2.13 – $T_{x1}^{A-}, T_{x2}^{A-}, T_{y1}^{A-}, T_{y2}^{A-}$ – значения времени начала прерывания луча от ИИ1 и ИИ2 в завесе A_x и лучей ИИ3 и ИИ4 в завесе A_y , соответственно; $T_{x1}^{A+}, T_{x2}^{A+}, T_{y1}^{A+}, T_{y2}^{A+}$ – значения времени начала восстановления лучей от ИИ1-ИИ4 в завесах A_x и A_y , соответственно.

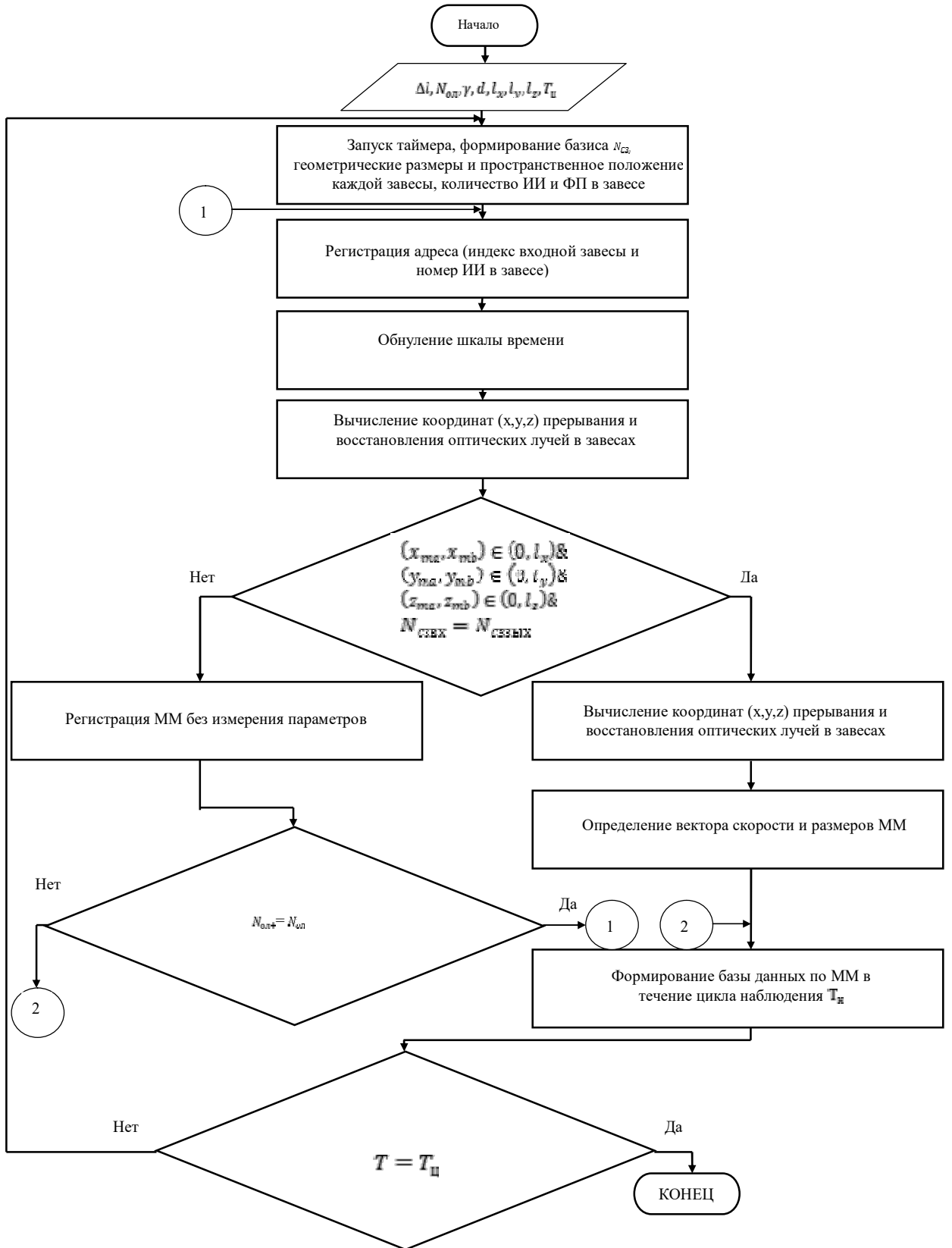


Рисунок 2.12 – Алгоритм определения параметров ММ двулучевым встречно-параллельным времяпролетным методом

Если ПСЗ А и В расположены параллельно на расстоянии l_z друг относительно друга и имеют одинаковые значения длины и высоты завес ($l_x = l_y = l$), то максимальная длина пути ММ с учетом максимальных измеряемых размеров ММ по осям x, y, z ЗРМ будет равна:

$$L_{\text{ММmax}} = \sqrt{(l + D_{\text{mxmax}})^2 + (l + D_{\text{mymax}})^2 + (l_z + D_{\text{mzmax}})^2} \quad (2.13)$$

Тогда длительность цикла измерения с учетом размеров ММ равна

$$T_{\text{ц}} = \frac{L_{\text{ММmax}}}{|V_{\text{min}}|} \quad (2.14)$$

Для анализа модели взаимодействия ММ и ЗРМ и алгоритма определения параметров ММ двулучевым встречно-параллельным времяпролетным методом построена графовая модель, представленная на рисунке 2.14. В ней показаны этапы определения по измеренным значениям времени начала и конца каждого интервала перекрытия луча в завесах А и В значения геометрических параметров и вектора скорости ММ.

Например, для определения ширины ММ по оси x (D_{mx}) надо измерить разницу между временем прерывания луча 1 и луча 2 (см. рисунок 2.13). Если они одинаковые, то центр ММ находится ровно посередине зоны по оси x (т.е. $l_x/2$). Разница во времени между отключением луча 1 и луча 2 в A_x дает возможность определить сторону смещения центра ММ и величину смещения краев ММ по лучу 1 и по лучу 2.

Если по лучу 1 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 вновь переходит в режим ожидания.

Например, при влете ММ в завесу А сначала измеряются значения времени T_{x1}^{A-} и T_{x2}^{A-} начала прерывания лучей в завесе A_x и значения T_{y1}^{A-} и T_{y2}^{A-} в совмещенной с ней завесе A_y (рисунок 2.13). Если по лучу x_1 происходит обнуление шкалы таймера, то время T_{x1}^{A-} не известно без знания

времени на распространение луча от ИИ1 до ФП1 и ширины ММ D_{mx} . Необходимо принять, что время распространения луча x_1 от ИИ1 к ФП1 без наличия ММ в зоне регистрации для всех идентичных по размерам завес ($A_x \equiv A_y \equiv B_x \equiv B_y$) одинаковое, то есть длина (ширина) l_x и высота l_y у всех равны ($l_x = l_y = l$), и зависит от длины траектории движения луча от ИИ до ФП с учетом всех отражений от пластин.

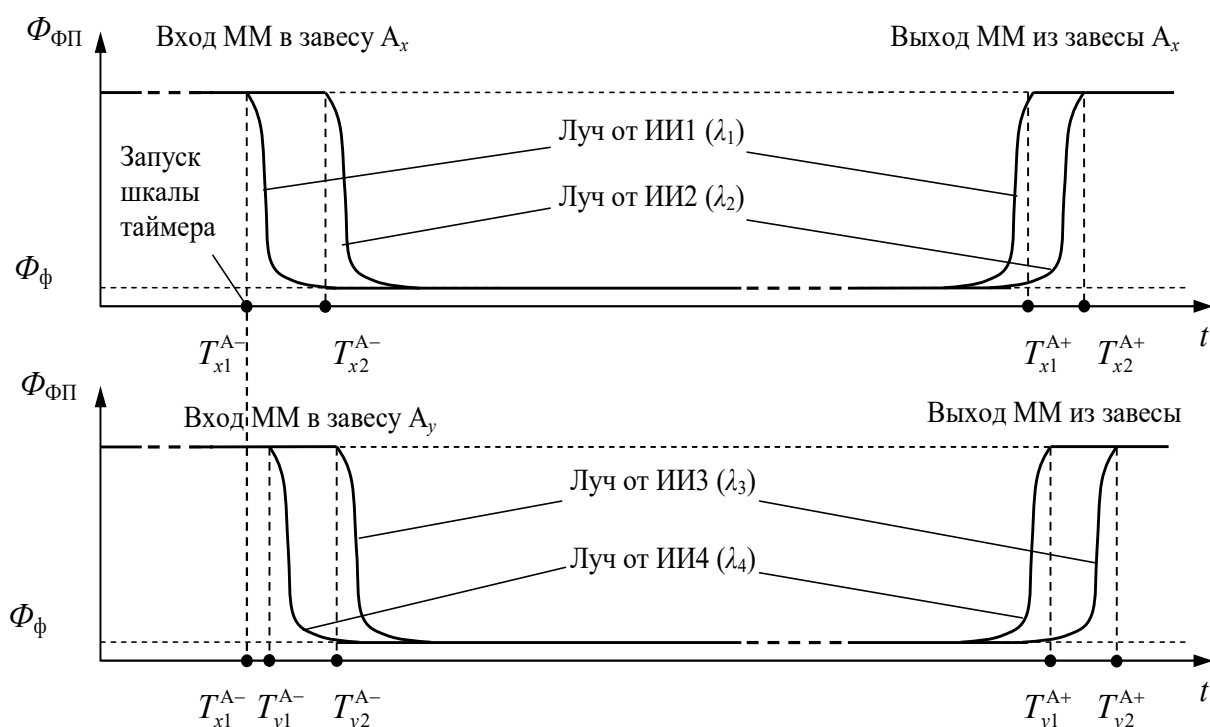


Рисунок 2.13 – Определение координат и геометрических размеров ММ:

$T_{x1}^{A-}, T_{x2}^{A-}, T_{y1}^{A-}, T_{y2}^{A-}$ – значения начала интервала прерывания луча от ИИ2 в A_x и лучей от ИИ3 и ИИ4 в A_y соответственно; $T_{x1}^{A+}, T_{x2}^{A+}, T_{y1}^{A+}, T_{y2}^{A+}$ – значения конца интервала прерывания лучей от ИИ1–ИИ4 в A_x и A_y соответственно.

Будем считать, что для всех 8 лучей по x и по y без ММ время формирования и отключения завесы одинаковое и равно:

$$T_{c3} = T_{c3-} = T_{c3+} = \frac{N_{отр} l_y}{c \sin(\gamma)} \quad (2.15)$$

где c – скорость света в вакууме.

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

$$T_{x1}^{A-} = T_{cз} - T_{x2}^{A-} - T_{D_{Mx}}^A = T_{x1}^{B-} + T_{x2}^{B-} - T_{x2}^{A-}, \quad (2.16)$$

где $T_{D_{Mx}}^A = T_{cз} - (T_{x1}^{A-} + T_{x2}^{A-})$.

Размер ММ по оси x D_{Mx}^B (см. рисунок 2.14) и координата x_M^B центра ММ по оси x в завесе B_x определяются через измерение времени начала прерывания луча от ИИ1 и ИИ2, с помощью следующих преобразований времени:

$$\begin{aligned} T_{D_{Mx}}^B &= T_{cз} - (T_{x1}^{B-} + T_{x2}^{B-}), \\ T_{Mx}^B &= T_{x1}^{B-} - \frac{T_{cз} - (T_{x1}^{B-} + T_{x2}^{B-})}{2} = \frac{T_{cз} + T_{x1}^{B-} - T_{x2}^{B-}}{2}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

где $T_{D_{Mx}}^B$ – время отсутствия сигнала при влете ММ в ПСЗ B_x , T_{Mx}^B – время начала регистрации для центральной точки ММ.

С учетом траектории многократно отраженного луча получается масштабированная координата, которая при точном пространственно-временном совпадении места и величины дискреты шкалы таймера и пространственных шкал l_x и l_y завес дает точное значение координаты центра ММ x_M^B и размера ММ по оси x D_{Mx}^B :

$$x_M^B = cT_{Mx}^B \cos(\gamma), \quad D_{Mx}^B = cT_{D_{Mx}}^B \cos(\gamma). \quad (2.18)$$

Аналогичным способом определяются значения координат x_M^A , y_M^A , y_M^B и геометрические размеры D_{Mx}^A , D_{My}^A , D_{My}^B :

$$\begin{aligned} x_M^A &= cT_{Mx}^A \cos(\gamma), & D_{Mx}^A &= cT_{D_{Mx}}^A \cos(\gamma) \\ y_M^A &= cT_{My}^A \cos(\gamma), & D_{My}^A &= cT_{D_{My}}^A \cos(\gamma) \\ y_M^B &= cT_{My}^B \cos(\gamma), & D_{My}^B &= cT_{D_{My}}^B \cos(\gamma) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Координаты ММ по оси z известны априорно: $z_M^A = 0$, $z_M^B = l_z$.

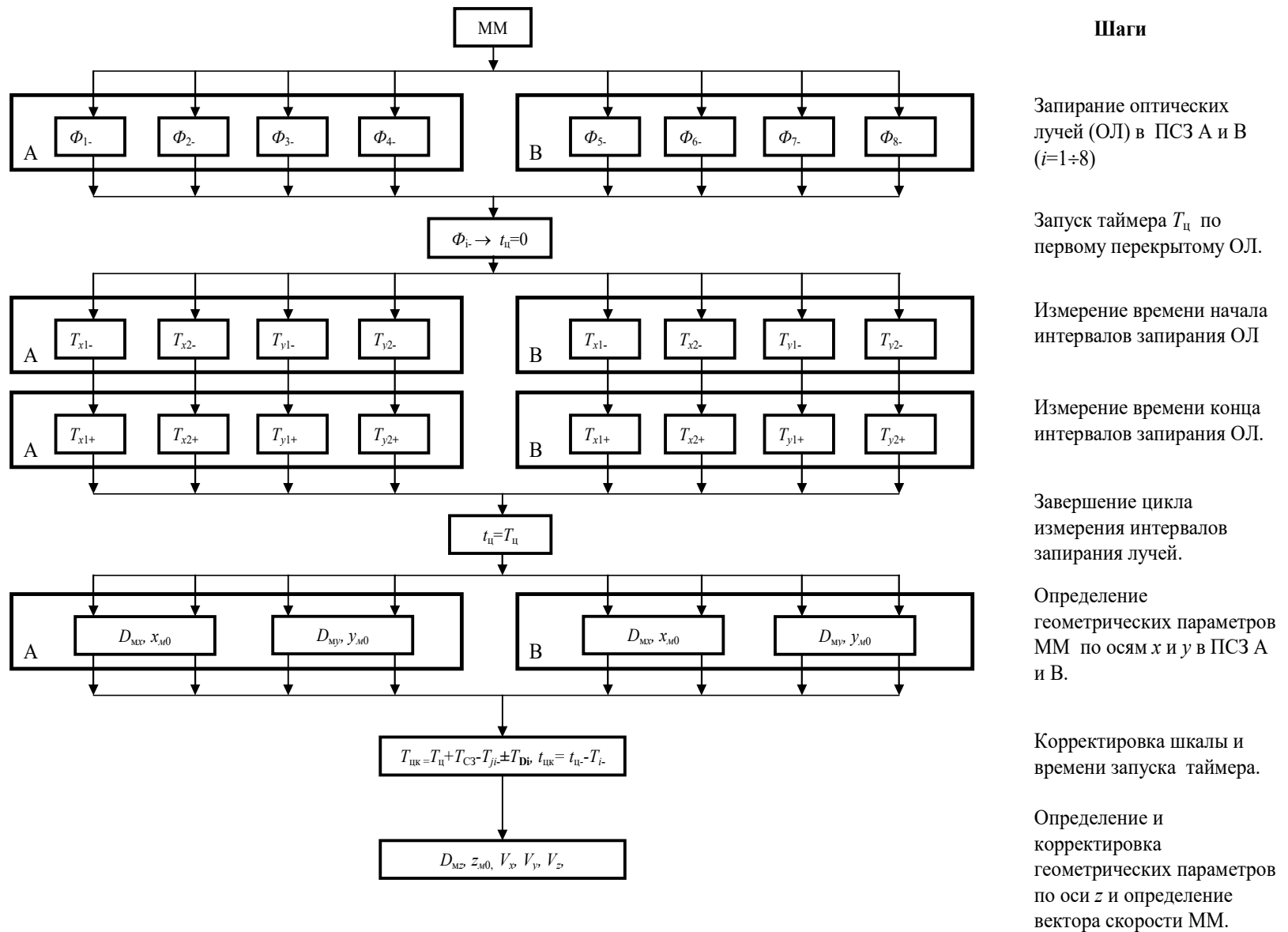


Рисунок 2.14 – Графовая модель определения геометрических параметров и вектора скорости ММ

Если считать, что ускорение $d\vec{V}_{MM}/dt = 0$, то по полученным значениям координат x_M, y_M и интервалов лучепрерывания в завесе А или в завесе В измеряется промежуток времени T_{MZ}^B между началом пересечения родственных координаточувствительных завес плоскостей А и В и далее косвенным методом определяются модуль и пространственные углы вектора скорости:

$$|\vec{V}_{MM}| = \sqrt{\left(\frac{x_M^{B-} - x_M^{A-}}{T_{Mx}^{B-} - T_{Mx}^{A-}}\right)^2 + \left(\frac{y_M^{B-} - y_M^{A-}}{T_{My}^{B-} - T_{My}^{A-}}\right)^2 + \left(\frac{l_z}{T_{Mz}^{B-}}\right)^2} \quad (2.20)$$

$$\alpha_x = \arccos\left(\frac{x_M^B - x_M^A}{|\vec{V}_{MM}|(T_{Mx}^B - T_{Mx}^A)}\right); \alpha_y = \arccos\left(\frac{y_M^B - y_M^A}{|\vec{V}_{MM}|(T_{My}^B - T_{My}^A)}\right); \quad (2.21)$$

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

После определения полного вектора скорости размер ММ по оси z определяется по формуле

$$D_{Mz} = |\vec{V}_{MM}| \cos \alpha_z (T_{x1}^{A+} - T_{x1}^{A-}) \quad (2.22)$$

2.4. Математическая модель взаимодействия микрометеороида с зоной регистрации из группы плоских световых завес без функции измерения координат

В БОЭ ИИС заложена ограниченная функциональность, связанная с выходом из строя отдельных источников и приемников излучения. В таком режиме выполняется функция определения не всех параметров движения ММ через ПСЗ и их геометрических размеров, а только вектора скорости ММ. Для этого в ЗРМ вводятся дополнительные ПСЗ с пространственным смещением и угловой ориентацией относительно базовых.

На рисунке 2.15 представлена ЗРМ из четырех попарно-параллельных ПСЗ А, В, С и D, попарно расположенными под разными углами по

отношению друг к другу. Значения времени начала интервала пересечения лучей ПСЗ при пролете ММ через световую завесу равны T_A , T_B , T_C и T_D соответственно.

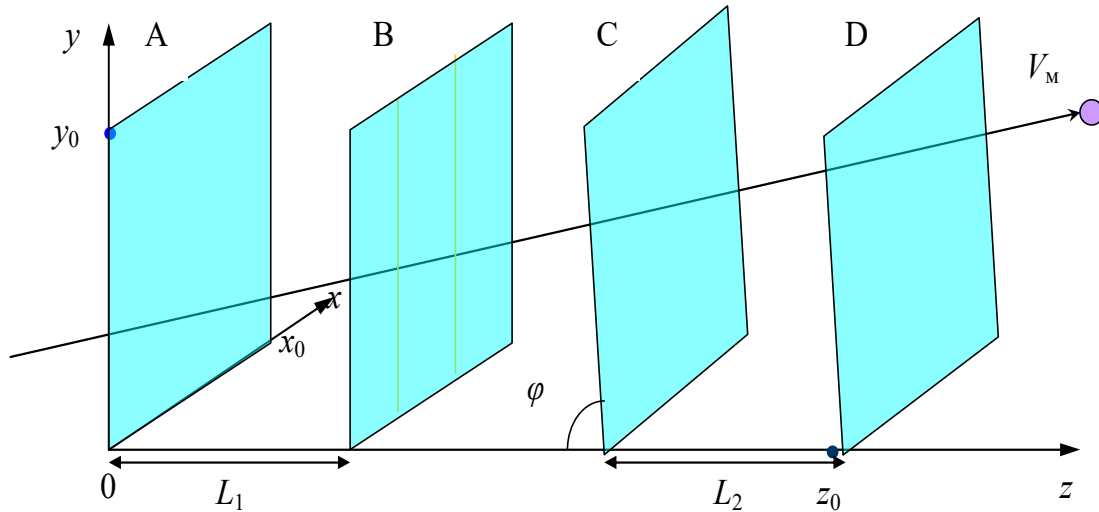


Рисунок 2.15 – Взаимодействие ММ с ЗРМ из четырех световых завес

Угол наклона вектора скорости по отношению к плоскости расположения базовых ПСЗ определяется по формуле

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{K - \sin(\varphi)}{-\cos(\varphi)} \right) \quad (2.25)$$

где φ – угол наклона ПСЗ C и D относительно базовых A и B;

$$K = \frac{T_B - T_A}{T_D - T_C}. \quad (2.26)$$

Модуль вектора скорости ММ равен

$$|V| = \frac{L_1}{(T_B - T_A) \cos(\alpha)} = \frac{L_2}{(T_D - T_C) \cos(\varphi + \alpha)}$$

$L_1 = L_{AB}$, $L_2 = L_{CD}$ – расстояния между смежными параллельными плоскостями.

Для упрощения вычислений эти расстояния приняты одинаковыми:

$$L_1 = L_2$$

Для определения точных координат фиксации необходимо произвести расчет, исходя из временных отметок исследуемого объекта на первой и третьей системе. Тогда:

$$n = |V|(T_3 - T_1) \cdot \cos(\alpha) \quad (2.27)$$

где n – длина от нормали к плоскости первой системы до точки пересечения исследуемого объекта третьего элемента системы.

Зададимся следующими характеристиками системы: w – расстояние между параллельными элементами устройства (первой и второй системой и третьей и четвертой).

Исходя из вышеизложенного, можно определить координаты пересечения двух световых завес (первой и третьей) по оси расположения систем исследуемыми объектами:

$$\Delta x = (n - 2w)tg(\varphi), \quad (2.28)$$

$$\Delta x_1 = \Delta x - ntg(\alpha), \quad (2.29)$$

где Δx – координата пересечения третьей систем,

Δx_1 – координата пересечения первой системы.

Используя полученные данные можно построить уравнение проекции вектора скорости исследуемых объектов на плоскость расположения фотодиодов устройства:

$$y = \frac{x(\Delta x - \Delta x_1)}{n} + \Delta x_1, \quad (2.30)$$

Для определения вектора скорости в пространстве необходимо наличие двух проекций вектора в ортогональных плоскостях. Поэтому воспользуемся вторым устройством с аналогичным расположением рабочих компонентов, но смещенным на некоторое расстояние b относительно первого, а также расположенные под углом 90° относительно друг друга (на рисунке 2.14 приведен пример пространственного расположения световых завес).

Таким образом, учитывая аналогичность ПСЗ устройств и уравнения (2.25) – (2.30), получается следующее уравнение движения ММ:

$$\frac{x}{w} = \frac{(y - \Delta x_1)}{w(\Delta x - \Delta x_1)} = \frac{n(z - \Delta x_3) + b(\Delta x_2 - \Delta x_3)}{w(\Delta x_2 - \Delta x_3)} \quad (2.31)$$

где Δx_2 – координата пересечения третьей системы для второго устройства;

Δx_3 – координата пересечения первой системы для второго устройства.

Для сравнительного проведения аналитических исследований была построена модель движения ММ через ЗРМ из четырех завес (рисунок 2.16) с применением САПР «Creo Parametric» [72].

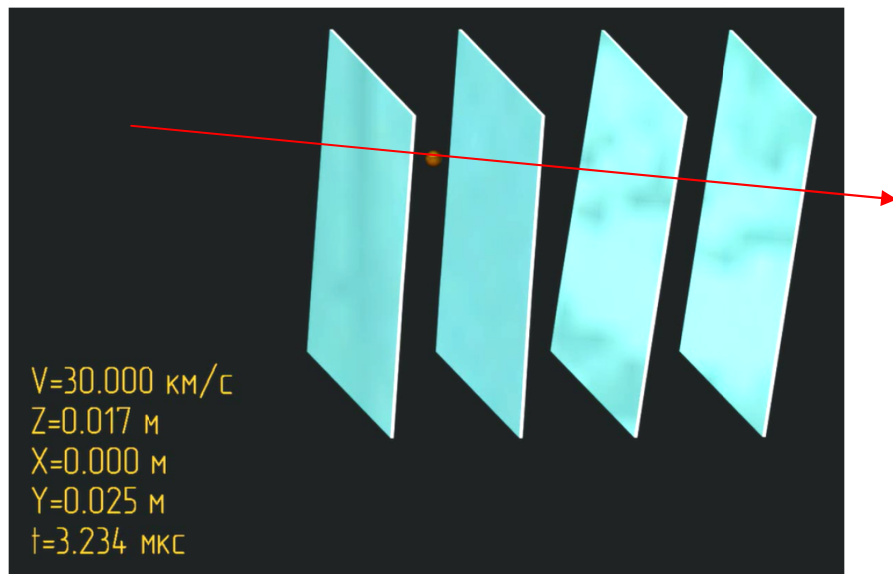


Рисунок 2.16 – Иллюстрация модели пролета частицы через предложенную систему, состоящую из четырех световых завес

Результаты показывают возможность определения скорости движения ММ через ЗРМ без определения координат пересечения ПСЗ и геометрических размеров частиц.

Рассмотрен также вариант измерения скорости ММ при пролете через группу завес, выстроенных в ЗРМ кубической формы по углу пролета α [93].

Чтобы найти угол α между траекторией пролёта частицы M_1M_2 и осью Oz построим плоскость по точкам $M_1(x_1, y_1, z_1)$, $M_2(x_2, y_2, z_2)$ и базисным вектором оси Ox $(1, 0, 0)$, после чего найдём искомый угол по известному соотношению для угла между векторами:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\vec{N}_1 \vec{N}_2}{\vec{N}_1 \cdot \vec{N}_2}\right) = \arccos\left(\frac{A_1 A_2 + B_1 B_2 + C_1 C_2}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2} \sqrt{A_2^2 + B_2^2 + C_2^2}}\right) \quad (2.32)$$

где \vec{N}_1 – единичный вектор оси Oz (0, 0, 1);

\vec{N}_2 – нормальный вектор плоскости частицы;

A, B и C – коэффициенты векторов.

Для построения плоскости пролёта частицы представим произвольную точку M(x, y, z), принадлежащую этой плоскости. Тогда вектора

$$\begin{cases} M_1 M = (x - x_1, y - y_1, z - z_1) \\ M_2 M_1 = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1) \\ Ox = (1, 0, 0) \end{cases} \quad (2.33)$$

компланарны.

Достаточным условием компланарности векторов является равенство нулю их смешанного произведения, тогда

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = y(z_2 - z_1) + z(y_2 - y_1) + (y_2 z_1 - y_1 z_2) \quad (2.34)$$

$$y(z_2 - z_1) + z(y_2 - y_1) + (y_2 z_1 - y_1 z_2) = 0$$

Имея выражения для плоскости (2.34), возвращаемся к формуле для нахождения угла (2.32), в результате получаем:

$$\begin{aligned} \alpha &= \left| \begin{matrix} A_1 = 0, B_1 = 0, C_1 = 1 \\ A_2 = z_2 - z_1, B_1 = 0, C_1 = y_2 - y_1 \end{matrix} \right| = \\ &= \arccos\left(\frac{0 \cdot A_2 + 0 \cdot B_2 + 1 \cdot C_2}{\sqrt{0^2 + 0^2 + 1^2} \sqrt{A_2^2 + B_2^2 + C_2^2}}\right) = \\ &= \arccos\left(\frac{y_2 - y_1}{\sqrt{(z_2 - z_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}\right) \end{aligned}$$

Выводы по главе 2

1. Разработан метод встречно-параллельного времяпролетного метода измерения параметров объекта, новизна которого состоит в

преобразовании времени записывания и восстановления измерительного канала из двух встречных оптических лучей в координату пересечения измерительного канала крайними точками объекта. Обосновано построение измерительного канала в форме плоской световой завесы (ПСЗ) из многократно отраженных лучей от двух плоских параллельных зеркальных поверхностей, расположенных на расстоянии l друг относительно друга, соответствующем разрешающей способности таймера. Измерительный канал в форме ПСЗ позволяет уменьшить шаг шкалы измерительного канала до диаметра оптического луча лазерных диодов, применяемых в качестве источников излучения, и увеличить высоту зоны чувствительности измерительного канала до величины l . Показано, что из групп ПСЗ возможно построение зон регистрации, в которых определяются трехмерные проекции вектора скорости движения и геометрических параметров объекта.

2. Построены пространственно-временные математические модели однокоординатных двулучевых ПСЗ со встречным и встречно-параллельным измерительными каналами. Определены коэффициенты заполнения световых завес и максимальные углы наклона оптических лучей, при которых исключены ошибки пропуска ММ со средним диаметром не менее 1 мкм вследствие их попадания в «слепые» зоны, не заполненные прямыми и отраженными оптическими лучами.

3. Построена пространственно-энергетическая модель однокоординатной ПСЗ, определяющая зависимость геометрических параметров ПСЗ от энергетических параметров источников излучения, чувствительности фотоприемников и коэффициента отражения зеркальных поверхностей. Показано, что совмещение в одной плоскости пространственно ортогональных ПСЗ позволяет определять две координаты (x_m и y_m) пересечения центром микрометеороида плоскости совмещенной ПСЗ. Определены предельные значения размеров ПСЗ прямоугольной формы

и пути достижения ПСЗ квадратной формы при заданных значения мощности лазерного диода и порога чувствительности фотодиода.

4. Построены пространственно-временные модели взаимодействия ММ с однокоординатными и совмещенными двухкоординатными ПСЗ, а также с зоной регистрации микрометеороидов (ЗРМ) из пространственно разнесенных по оси z параллельных друг другу групп одно- и двухкоординатных ПСЗ. Пространственно-временная модель взаимодействия ММ с ПСЗ и ЗРМ подтверждает расширенные функциональные возможности ИИС, которые в отличие от известных моделей позволяет определять три координаты вектора скорости ММ и его геометрических параметров.

5. Показана возможность и построены модели определения скорости движения ММ за счет создания ЗРМ из четырех разноракурсных попарно параллельных однолучевых световых завес и ЗРМ в форме куба из шести завес без функции измерения координат лучепрерывания и размеров ММ.

3 МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕСКОНТАКТНОЙ ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ИИС ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ МИКРОМЕТЕОРОИДОВ И МЕТОДЫ ИХ УЛУЧШЕНИЯ

3.1 Метрологическая модель основных погрешностей БОЭ ИИС

Суммарная погрешность БОЭ ИИС определения вектора скорости ММ обусловлена физической природой и технической реализацией метода аналого-цифрового преобразования измеренных значений времени начала и конца интервалов лучепрерывания микрометеороидами световых завес в пространственные координаты мест лучепрерывания.

Результирующая погрешность E_0 пространственно-временного квантования складывается, как показано на рисунке 3.1, из методической погрешности E_1 квантования, создаваемой идеальной шкалой времени, совмещенной с идеальной шкалой траектории каждого одиночного оптического луча между ИИ и ФП ПСЗ, и сочетания методической и инструментальной составляющих погрешности E_2 воспроизведения уровней квантования луча во времени и пространстве: $E_0 = E_1 + E_2$. Методическая погрешность в E_2 связана с характерными особенностями лазерного зондирования области световой завесы и преобразования в координату измеряемого времени начала и конца интервалов лучепересечения микрометеороидами световых завес [33].

Информационная емкость ИИС, содержащей J измерительных каналов, определяется как максимально возможное количество информации $M=NJ$, получаемое при единичном отсчете по всем отдельным i_j -м кодовым комбинациям, где $i_j = 0, 1, 2, \dots, N_j$; $N_j = 2^{n_j} - 1$; $j = 1, 2, \dots, J$; n_j – число разрядов АЦП (таймера), приходящееся на j -й измерительный канал, представляющий собой оптронную пару ИИ $_j$ -ФП $_j$.

Погрешность квантования для n_j -разрядного АЦП, преобразующего интервал прерывания оптического луча в цифровой код координаты

лучепрерывания, является случайной величиной, в подавляющем большинстве случаев с равномерной функцией распределения в диапазоне $[-\delta T, +\delta T]$, где $\delta T = \delta T_{\text{ц}}$ – шаг квантования, привязанный к разрешающей способности таймера времени $T_{\text{ц}}$ цикла измерения времени пролета ММ через ЗРМ с минимальной измеряемой скоростью $V_{\text{ММ}min}$. По значениям $V_{\text{ММ}min}$ и $T_{\text{ц}}$ строится $R_{\text{ЗРМ}} = |V_{\text{ММ}min}|T_{\text{ц}}$ – виртуальная пространственно-временная шкала ЗРМ от времени и координаты прерывания первого луча до времени и координаты восстановления последнего луча в ЗРМ.

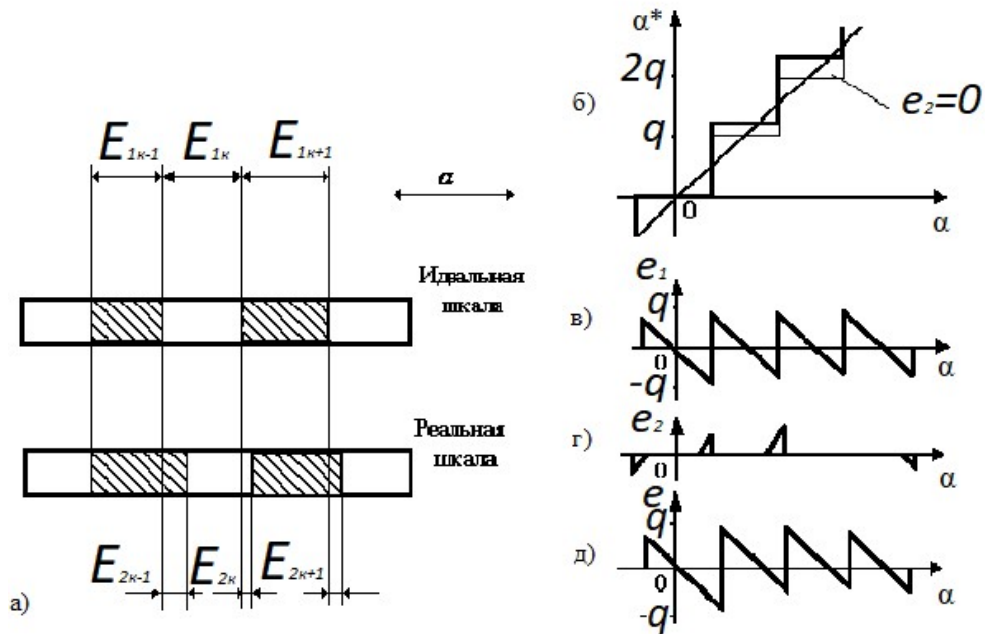


Рисунок 3.1 – Пространственно-временное квантование шкалы Q:
 а) структура погрешностей идеальной и реальной шкал; б) процесс квантования;
 в) формирование погрешности E_1 ; г) формирование погрешности E_2 ;
 д) формирование полной погрешности E_0

Таймер в составе блока первичной обработки выполняет функции J-канального АЦП, который преобразует координаты пересечения микрометеороидом всех оптических завес в дискретные электрические сигналы. Например, в ПСЗ А эквивалент координаты $r_{M1}^{A-} = 0 \dots R_{M1}^{A-}$ луча ИИ1 (рисунки 2.13, 2.15) получается в соответствии с выражением

$r_{m1}^{A-} = cT_{mr1}^{A-}$, где c – скорость света в вакууме, T_{mr1}^{A-} – время начала прерывания луча ИИ1.

Для приема-передачи текущих меток времени прерывания и восстановления лучей установлена связь ЗРМ с выносным блоком первичной обработки, содержащим таймер (АЦП) и блок регистров кодов времени прерывания и восстановления оптических лучей. Связь может осуществляться по проводному или волоконно-оптическому каналу.

Информационная емкость I_{1N}^A луча ИИ1 в ПСЗ А определяется как максимально возможное количество информации, получаемое при единичном отсчете по отдельной i_{m1}^{A-} -й кодовой комбинации координаты r_{m1}^{A-} лучепрерывания без учета преобразования длины луча от ИИ1 до точки лучепрерывания в координату x_{m1}^{A-} , где $i_{m1}^{A-} = 0, 1, \dots, N_M^{A-}$; $N_M^{A-} = 2^{n_M^{A-}} - 1$; n_M^{A-} – число разрядов регистра кодовой шкалы R_M^{A-} завесы А [101]. При диапазоне R_M^{A-} изменения координаты r_{m1}^{A-} лучепрерывания в завесе А истинное значение координаты должно находиться внутри одного из интервалов $\pm 0,5 \cdot \delta r_M^{A-} = \pm 0,5 \cdot c \cdot \delta T_{ц}$, где $\delta r_M^{A-} = R_M^{A-} / 2^{n_M^{A-}}$ – шаг пространственного квантования. В реальных световых завесах и ЗРМ в целом координаты границ квантов не совпадают с расчетными вследствие погрешности E_2 воспроизведения уровня квантования. Текущее значение этой погрешности в i_{m1}^{A-} -й кодовой комбинации одинаково для всех лучей завесы А и обозначается символом e_{2i}^{A-} .

В частности, количество информации в i_{m1}^{A-} -й кодовой комбинации с учетом погрешности e_{2i}^{A-} для луча ИИ1 завесы А оценивается величиной [88]:

$$I_{i1}^{A-} = \log_2 \left(\frac{R_{m1}^{A-}}{2(0,5\delta r_M^{A-} + |e_{2i}^{A-}|)} \right) = \log_2 \left(\frac{x_{m1}^{A-}}{2(0,5\delta x_M^{A-} + |e_{2i}^{A-}|\cos\gamma)} \right) \quad (3.1)$$

Это выражение с учетом соответствующего изменения индексов справедливо для значений координат прерывания (-) и восстановления (+) всех лучей световых завес А и В.

Инструментальная составляющая погрешности E_2 включает большое число доминирующих и слабо зависимых величин, которые по функциональным признакам можно представить суммой групп независимых слагаемых. В первую группу входят составляющие основной инструментальной погрешности $E_{2ио}$, показатели которых определяются принятой технологией изготовления отражающих пластин, изготовления комплектующих деталей и элементов, их сборки в единую конструкцию с последующей юстировкой и настройкой. Вторая группа представляет собой составляющие дополнительной погрешности $E_{2ид}$ воспроизведения квантованных уровней, порождаемые воздействием внешних воздействующих факторов (ВДФ) дестабилизации в процессе функционирования ИИС, а также естественным износом и старением материалов.

В соответствии с принятыми условиями и допущениями все однокоординатные завесы в составе базовой трехкоординатной ЗРМ должны быть идентичны по геометрическим, оптическим и энергетическим параметрам, а также содержать одинаковые типы лазерных диодов и фотодиодов. Поэтому при построении структурной схемы погрешности БОЭ ИИС необходимо учесть синхронизацию во времени функционирования всех измерительных каналов посредством таймера в составе контроллера блока первичной обработки информации, а также идентичность алгоритмов преобразования времени начала и конца прерывания лучей в координаты $r_{m1} \div r_{mJ}$ прерывания (-) и восстановления (+) луча, которые после этого преобразуются в координаты $x_{m1} \div x_{m4}$ и $y_{m1} \div y_{m4}$ во всех $J=8$ идентичных попарно встречно направленных однолучевых однокоординатных завесах

$A_{x1}, A_{x2}, A_{y1}, A_{y2}$, составляющих ЗРМ А, и в однолучевых однокоординатных завесах $B_{x1}, B_{x2}, B_{y1}, B_{y2}$, составляющих ЗРМ В (см. рисунки 2.13, 2.15).

На рисунке 3.2 представлена структурная схема погрешности БОЭ ИИС. Результирующая инструментальная погрешность измерительной системы параллельного типа, к которым относится разработанная система, складывается из методической погрешности выбранного способа формирования цифрового кода значений времени прерывания и восстановления оптических лучей и инструментальной погрешности.

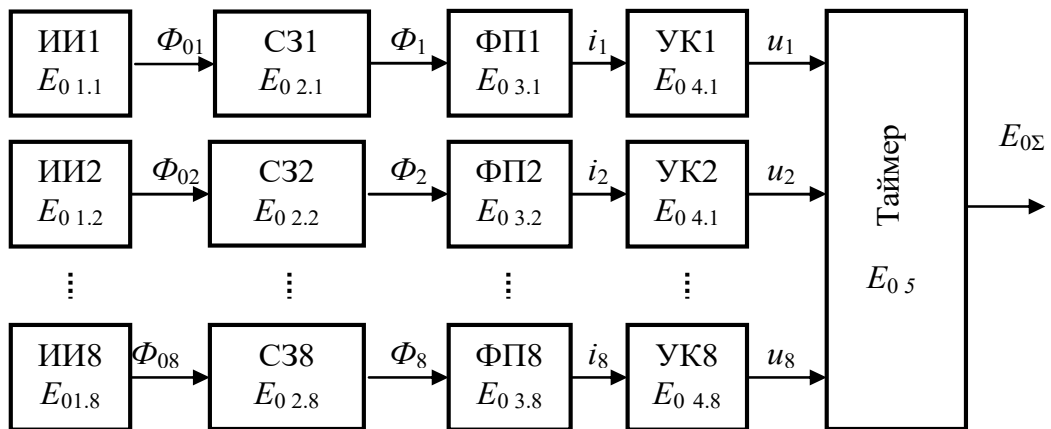


Рисунок 3.2 – Структурная схема формирования суммарной погрешности БОЭ ИИС: ИИ1–ИИ8 – источники излучения и вносимые ими погрешности; СЗ1–СЗ8 – однолучевые световые завесы; ФП1–ФП8 – фотоприемники; УК1–УК8 – усилители-компараторы

Погрешности элементов и каналов измерительной части системы будем считать независимыми друг от друга. Тогда аддитивная инструментальная погрешность на входе регистра кодов таймера определяется выражением:

$$E_{\Sigma} = \sum_{j=1}^J E_{01.j} + \sum_{j=1}^J E_{02.j} + \sum_{j=1}^J E_{03.j} + \sum_{j=1}^J E_{04.j} + E_{05} \quad (3.2)$$

где E_{Σ} - суммарная составляющая погрешностей источников излучения;

$E_{01.j}$ – погрешности, вносимые источниками излучения;

$E_{02.j}$ – погрешности, вносимые однолучевыми световыми;

$E_{03.j}$ – погрешности, вносимые фотоприемниками;

$E_{04.j}$ – погрешности, вносимые усилителями-компараторами и ими; E_{05} – полная погрешность, вносимая таймером;

$J=8$ – количество измерительных каналов.

Среднеквадратическая инструментальная погрешность, исходя из допущения, что все составляющие погрешности имеют нормальный закон распределения, измерительной части ИИС равна

$$E_0 = \sqrt[1,4]{\sum_{j=1}^J E_{01.j}^2 + \sum_{j=1}^J E_{02.j}^2 + \sum_{j=1}^J E_{03.j}^2 + \sum_{j=1}^J E_{04.j}^2 + E_{05}^2} \quad (3.3)$$

В процессе проектирования ИИС определяется степень критичности составляющих методической и инструментальной погрешностей измерительных каналов. Методическая погрешность определяется ограничениями, связанными с методами измерения и преобразования и техническим уровнем их реализации без учета инструментальных погрешностей: конечная ширина индикатрисы зондирующего потока, конечные размеры чувствительной поверхности ФП, ограничения по мощности ИИ и чувствительности ФП, достижимый коэффициент отражения зеркальных поверхностей и т.п. Инструментальная погрешность формируется из большого числа доминирующих и слабо зависимых величин, которые по функциональным признакам так же можно представить суммой групп независимых слагаемых. Она определяется следующими источниками пространственно-временного и энергетического характера, требующими анализа их особенностей, учета и возможностей компенсации при проведении измерений: подбор оптоэлектронных устройств с максимально близкими пространственными и энергетическими параметрами, юстировка зеркал, установка ИИ и ФП под заданными углами к осям координат; геометрические параметры, плоскостность и шероховатость поверхности

зеркал; идентичность, зависимость от ВДФ и деградация пространственно-временных и энергетических параметров зеркал, ИИ и ФП в процессе эксплуатации. 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 ($|\vec{V}_{mm}| = 30 \text{ км/с}$) 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.

3.2 Составляющие погрешности измерения параметров движения микрометеороидов

При измерении параметров движения ММ через ПСЗ времяпролетным лучепрерывающим методом учитываются как неточность математической модели, так и отдельные составляющие методической погрешности [94].

Среди наиболее значимых – составляющие, связанные с измерением времени пролета в ЗРМ, вызванные особенностями отражения света от ММ и зеркальных поверхностей, а также с преобразованием света в ФП.

Составляющая, связанная с измерением времени пролета ММ через ЗРМ, зависит от разрешающей способности таймера и характера движения объекта. Так как девиация скорости движения ММ в ЗРМ практически отсутствует, то эта составляющая не зависит от количества ПСЗ и расстояния между ними, не учитывается в математической модели и сводится к погрешности квантования $\delta T = \delta T_{ц}$ шкалы времени цикла измерения (см. рисунок 3.1).

Наибольшее влияние на методическую погрешность оказывают особенности отражения светового луча от ММ, представленные на рисунке 3.3. Особое значение в литературе уделяется комбинационному рассеянному излучению [95].

ММ могут представлять по своему составу диэлектрик или проводящее вещество. Учитывая факт наличия мнимой части в показателе преломления некоторых материалов (соотношение Крамерса-Кронига) следует учитывать потери световой энергии за счет диэлектрической составляющей или конечной проводимости.

Угловое распределение рассеянного света ММ определяет важную характеристику светового потока – индикатрису рассеяния, представляющую графическое изображение зависимости интенсивности рассеянного света от угла рассеяния [95, 96].

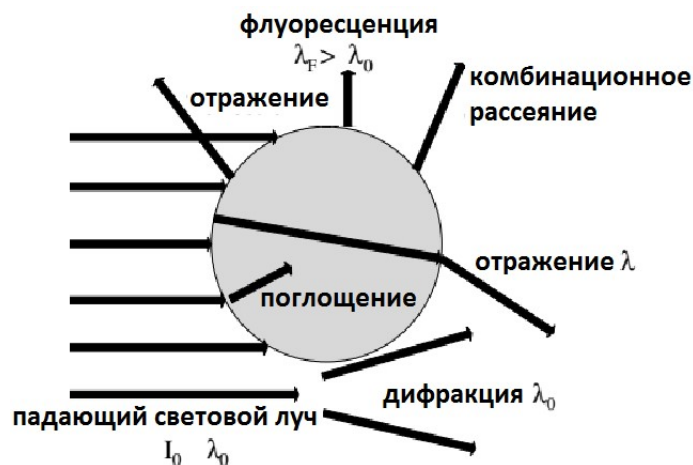


Рисунок 3.3 – Эффекты взаимодействия ММ с оптическим лучом

Для ММ, соизмеримых с длиной волны допускается использовать теорию Ми. Рассеяние, в данном случае, описывается безразмерными функциями, представляющими относительное угловое распределение интенсивности рассеянного света [95, 96], индикатрисами $\xi(\vartheta, \varphi)$:

$$\xi(\vartheta, \varphi) = S_{\perp} S_{\perp}^* \cdot \sin^2(\varphi) + S_{\parallel} S_{\parallel}^* \cdot \cos^2(\varphi), \quad (3.4)$$

где φ - угол падения света; ϑ - угол рассеяния света.

В (3.4) $[S]$ – матрица рассеяния, которая в системе отсчета, связанной с плоскостью рассеяния, имеет диагональный вид:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{\perp} & 0 \\ 0 & S_{\parallel} \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

где S_{\perp} и S_{\parallel} – безразмерные комплексные амплитудные функции рассеяния для составляющих, перпендикулярной и параллельной плоскости рассеяния.

Общие выражения для S_{\perp} и S_{\parallel} в виде рядов Ми имеют вид:

$$S_{\perp} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \cdot (a_n \pi_n + b_n \tau_n); \quad (3.6)$$

$$S_{\parallel} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \cdot (b_n \pi_n + a_n \tau_n), \quad (3.7)$$

где a_n, b_n – не зависящие от угла рассеяния коэффициенты рядов Ми [96];

τ_n, π_n – зависящие от угла рассеяния коэффициенты рядов Ми [96];

$$a_n = \frac{\left(\frac{A_n(mx)}{m} + \frac{n}{x}\right) \cdot \operatorname{Re}(\omega_n(x)) - \operatorname{Re}(\omega_{n-1}(x))}{\left[\frac{A_n(mx)}{m} + \frac{n}{x}\right] \cdot \omega_n(x) - \omega_{n-1}(x)}; \quad (3.8)$$

$$b_n = \frac{\left(mA_n(mx) + \frac{n}{x}\right) \cdot \operatorname{Re}(\omega_n(x)) - \operatorname{Re}(\omega_{n-1}(x))}{\left[mA_n(mx) + \frac{n}{x}\right] \cdot \omega_n(x) - \omega_{n-1}(x)}, \quad (3.9)$$

где $A_n(mx)$ – множители, определяющиеся с помощью функции Бесселя комплексного аргумента;

$\omega_n(x)$ – круговые функции, которые для рассматриваемого случая имеют действительный аргумент и совпадают с функциями Рикатти - Бесселя [96].

Для малоразмерных ММ функции $\omega_n(x)$ определяются с использованием рекуррентных соотношений:

$$\omega_n(x) = \frac{2n-1}{x} \omega_{n-1}(x) - \omega_{n-2}(x);$$

$$\omega_0(x) = \sin(x) - i \cos(x);$$

$$\omega_{-1}(x) = \cos(x) - i \sin(x);$$

$$A_n(mx) = -\frac{n}{y} + \left[\frac{n}{y} - A_{n-1}(mx)\right]^{-1};$$

$$A_0(mx) = \frac{\sin(p) \cdot \cos(p) + i \cdot sh(q) \times ch(q)}{\sin^2(p) + sh^2(q)};$$

$$p = Re(m) \cdot x;$$

$$q = Im(m) \cdot x.$$

где y – безразмерный комплексный аргумент mx функции A_n ,

$m = \frac{n_1}{n_2}$ – относительный показатель преломления (n_1 - показатель преломления частицы, n_2 - показатель преломления среды,

$x = k \times a = \frac{2\pi \times n_2}{\lambda} a$ – безразмерный параметр в теории Ми,

a – радиус частицы,

λ – длина волны световой завесы.

Так как соотношения Ми включают в себя функцию бесконечного ряда, то редко представляется возможным получить аналитические выражения, описывающие индикатрисы рассеяния. Ввиду чего сумму ряда ищут, используя рекурсию и ограничиваясь заданной точностью (то есть, оставляя лишь конечное число членов).

Например, τ_n, π_n вычисляют с использованием рекуррентных соотношений для полиномов Лежандра и их производных [97]:

$$\pi_n(\vartheta) = \cos(\vartheta) \frac{2n-1}{n-1} \pi_{n-1}(\vartheta) - \frac{n}{n-1} \pi_{n-2}(\vartheta);$$

$$\tau_n(\vartheta) = \cos(\vartheta) [\pi_n(\vartheta) - \pi_{n-2}(\vartheta)] - (2n-1) \sin^2(\vartheta) \pi_{n-1}(\vartheta) + \tau_{n-2}(\vartheta),$$

где $\pi_0(\vartheta) = 0, \pi_1(\vartheta) = 1, \pi_2(\vartheta) = 3 \cos(\vartheta), \tau_0(\vartheta) = 0, \tau_1(\vartheta) = \cos(\vartheta),$

$$\tau_2(\vartheta) = 3 \cos(2\vartheta).$$

Рассмотрим диаграмму рассеяния для проводящей и диэлектрической частиц. Как видно из рисунков 3.4, 3.5 – при малых значениях x график рассеяния приближается по форме к Рэлеевскому рассеянию.

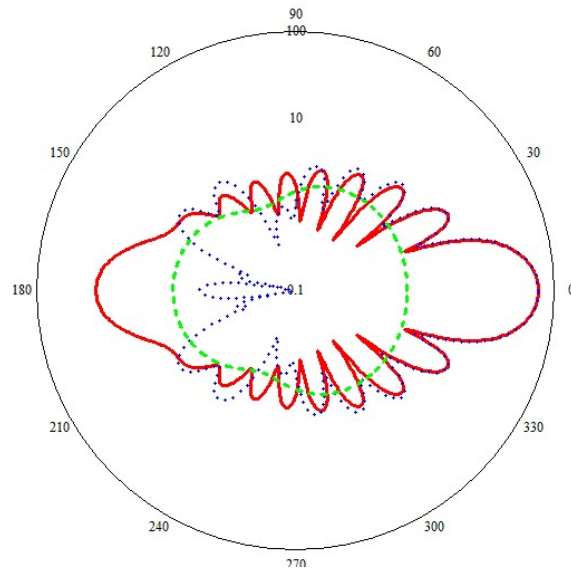


Рисунок 3.4 – Рассеяние в полярной системе координат для ММ из железа ($m=1,28-1,37i$) в зависимости от x : красная линия $-x=100$, синяя линия $-x=10$, зеленая линия $-x=1$

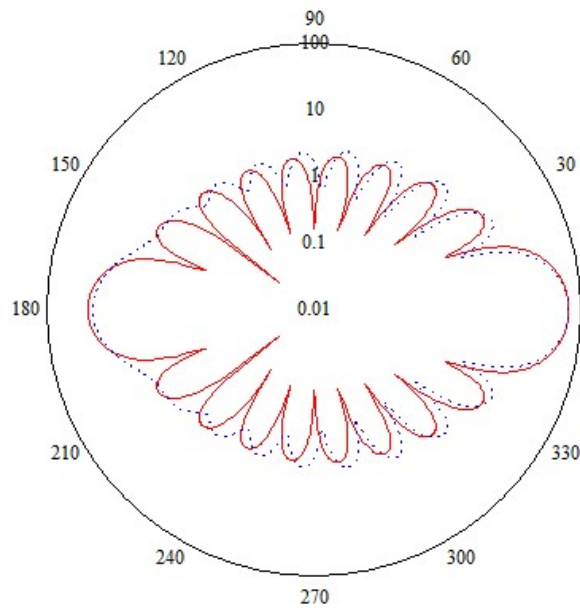


Рисунок 3.5 – Рассеяние в полярной системе координат для ММ из железа (синяя линия) и из диэлектрического материала с $m=5$ при $x=100$

Из рисунков 3.4 и 3.5 видно, что индикатриса рассеяния имеет сложный многолепестковый характер. При соизмеримости малоразмерных ММ и диаметра оптического луча такое рассеяние приводит к составляющим методической погрешности которые проиллюстрированы на рисунке 3.6 для завесы A_x .

Эти составляющие вызываются:

- попаданием ММ на границу смежных лучей ПСЗ, из-за чего часть светового потока рассеивается и суммируется с фоновым потоком, а оставшаяся часть попадает на ФП;
- частичным или полным совпадением траектории и энергии отраженного от ММ луча с траекторией и энергией луча завесы без ММ;
- особенностями движения ММ в ЗРМ: низкой скоростью ММ; траекторией ММ, совпадающей с плоскостью световой завесы; пространственными колебаниями ММ в зоне отсутствия лучепрерывания или наличия многократного лучепересечения смежных завес и т.п.

В соответствии с времяпролетным методом измерения при $D_{mx} \approx d_x$ микрометеороид может пересекать ПСЗ по границе смежных лучей, в результате чего могут произойти следующие события:

- световой поток $\Phi_{ФП}$ на чувствительной поверхности ФП, создаваемый не прерванной частью оптического луча $\Delta\Phi_{01}$ и фоновым потоком $\Phi_{Ф}$ превышает порог $\Phi_{пор}$ срабатывания ФП на лучепрерывание:

$$\Phi_{ФП} = \Phi_{Ф} + \Delta\Phi_{01} > \Phi_{пор};$$

и событие лучепрерывания не фиксируется;

и событие лучепрерывания фиксируется, но со смещением метки времени лучепрерывания на величину ΔT_{mx1}^{A-} ;

- световой поток $\Phi_{ФП}$ на чувствительной поверхности ФП, создаваемый не пересеченной частью оптического луча $\Delta\Phi_{01}$ и фоновым потоком $\Phi_{Ф}$ спорадически пересекает порог $\Phi_{пор}$ срабатывания ФП в сторону прерывания и восстановления луча от ИИ1, что приводит к появлению многократных временных отметок T_{mx1}^{A-} и T_{mx1}^{A+} , сигнализирующего согласно алгоритму функционирования ИИС (рисунок 1.12) об ошибке измерения.

При реализации времяпролетного метода в ПСЗ с нефокусируемой оптикой при изменении расстояния r между ИИ и ФП световой поток на

поверхности ФП при отсутствии ММ изменяется от 10–20% (при удалении) до 1,5–2 раз (при приближении) [97]. Это необходимо учитывать при задании высоты ПСЗ, диаметра и угла γ оптического луча. В целях исключения потребности в корректировке погрешности нефокусируемого оптического канала в БОЭ ИИС эта составляющая исключается на этапе проектирования введением в ПСЗ фокусирующей оптики [98-102].

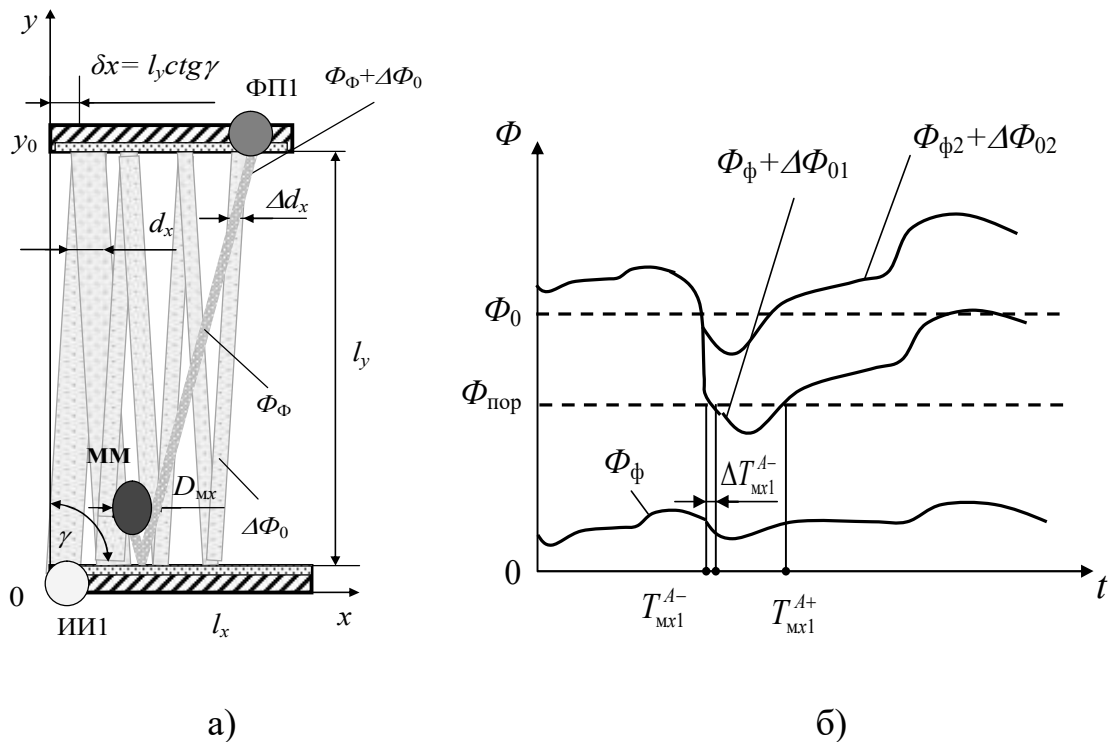


Рисунок 3.6 – Погрешности пропуска и смещения метки времени лучепрерывания светового потока вследствие попадания ММ на границу смежных лучей ПСЗ:

- а – неполное прерывание микрометеороидом луча ИИ1 в ПСЗ A_x ($\Delta d_x < D_{mx} \approx d_x$) и формирование фоновой засветки Φ_Φ при отражении светового потока от ММ;
 б – эпюра светового потока на входе ФП при частичном перекрытии луча ИИ1 и пространственных колебаниях ММ в зоне ПСЗ

К составляющим основной погрешности относятся:

- систематическая погрешность, обусловленная различием мощности и индикатрис излучения лазерных диодов, площадью и параметрами чувствительности фотодиодов;

- систематическая и случайная инструментальные составляющие квантования времени таймером при отсутствии внешних воздействий;
- систематическая и случайная составляющие статической и динамической погрешностей измерения начала и конца интервалов времени лучепрерывания, обусловленные различиями пространственных и энергетических параметров ИИ, ФП и отражающих поверхностей.

По аналогии с источниками методической погрешности инструментальная погрешность фиксации начала и завершения интервала времени прерывания (-) и восстановления (+) лучей от ИИ в основном связана с перепадом светового потока на чувствительной поверхности ФП и может изменяться на несколько порядков в зависимости от погрешностей позиционирования оптоэлектронных устройств и зеркальных пластин при изготовлении ЗРМ, предпусковой юстировке и настройке ИИС.

Кроме этого, на световой поток также накладываются фоновое излучение, зависящее от неточности позиционирования и юстировке ЗРМ, а на ФП накладываются шумы и помехи приемного канала. Эти факторы приводят к искажению формы электрического сигнала на выходе ФП и, как следствие, к погрешности фиксации момента прихода данного импульса пороговым устройством (рисунок 3.7). При практической неизменности формы сигнала, характерной для системы с фиксированными геометрическими параметрами разброс момента фиксации у фотодиодов находится в пределах 100 пс в зависимости от технологии изготовления [88].

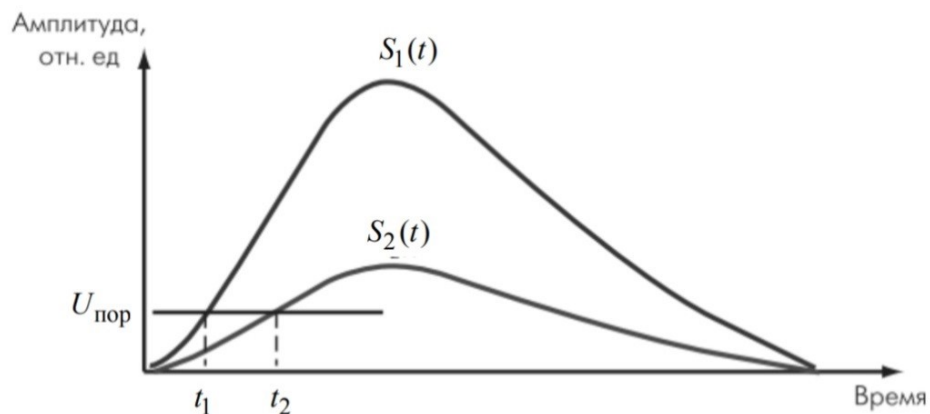


Рисунок 3.7 – Смещение времени фиксации значений времени при сравнении амплитуды информационного сигнала с уровнем пороговой чувствительности ФП

Решающее влияние на дополнительную погрешность $E_{2д}$ при эксплуатации измерительного оборудования в условиях околоземного космического пространства оказывают непосредственные виброударные воздействия (ВУВ) и линейные напряжения (ЛН), приложенные к отражающим пластинам и к корпусу ЗРМ [104-110]. Температура приводит к низкоскоростной деформации отражающих пластин, взаимному линейному и угловому смещению ИИ и ФП. Оцениваемым результатом пространственного характера воздействия ВДФ является изменение геометрических параметров области геометрического сопряжения ИИ и ФП относительно идеальных, влияющее на время распространения оптического луча от ИИ до ФП или ММ. Источники этого изменения – отклонение формы и смещение отверстий несущей конструкции и отражающих пластин ЗРМ.

В общем случае влияние ВУВ и ЛН может быть описано следующим выражением

$$P(t) = P_0 + P_1(t) + P_2(t) \quad (3.10)$$

где P_0 – усилие реакции от линейной нагрузки;

$P_1(t)$ – кратковременное усилие реакции от ударов;

$P_2(t)$ – усилие реакции от вибрации. В реальных условиях на блок ЗРМ и входящие в него ПСЗ действуют переменные по времени воздействия, имеющие сложный спектральный состав:

$$P_2(t) = P_{12} \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + P_{22} \cdot \sin(\omega_2 t + \varphi_2) + \dots + P_{m2} \cdot \sin(\omega_m t + \varphi_m).$$

Как правило, одна из переменных составляющих вибрации доминирует над остальными, т.е. можно считать, что $P_2(t) = P_2 \cdot \sin(\omega t + \varphi)$.

Воздействие линейной нагрузки и ударов $p_{\text{лн}}$ можно охарактеризовать при помощи коэффициента запаса K_3 :

$$K_3 = \frac{p_{\text{лну}}}{p_a} \quad (3.11)$$

где p_a – напряжение разрушения конструкции ЗРМ.

На рисунке 3.8 приведены кривые, характеризующие зависимость прироста взаимного смещения центров индикатрисы ИИ и чувствительной поверхности ФП от воздействия ВУВ и температуры соответственно. При расчетах предполагалось, что вибро-ударное и температурное воздействия действуют постоянно в течение времени эксплуатации и неизменны по величине, а радиационному воздействию ЗРМ подвергается кратковременно. Величины площади $A_{\text{ИИ}}$ поперечного сечения ИИ и площади ФП $A_{\text{ФП}}$ также изменяются с изменением температуры. Прирост величин этих площадей можно описать следующим образом

$$\frac{\Delta A_{\text{кс}}}{A_{\text{кс}}} = \alpha_1 \Delta T, \quad \frac{\Delta A_{\text{сч}}}{A_{\text{сч}}} = \alpha_2 \Delta T \quad (3.12)$$

где α_1, α_2 - коэффициент линейного расширения материалов ИИ и ФП. Зная температурную стабильность материала

(на рисунке 1.5,г 1 – стекло, 2 – бронза, 3 – сталь), из которого выполнены отдельные компоненты оптической системы, ИИ и ФП, подводящие и отводящие свет оптические волокна, можно рассчитать температурный диапазон, в котором погрешность ИИС будет соответствовать требуемой.

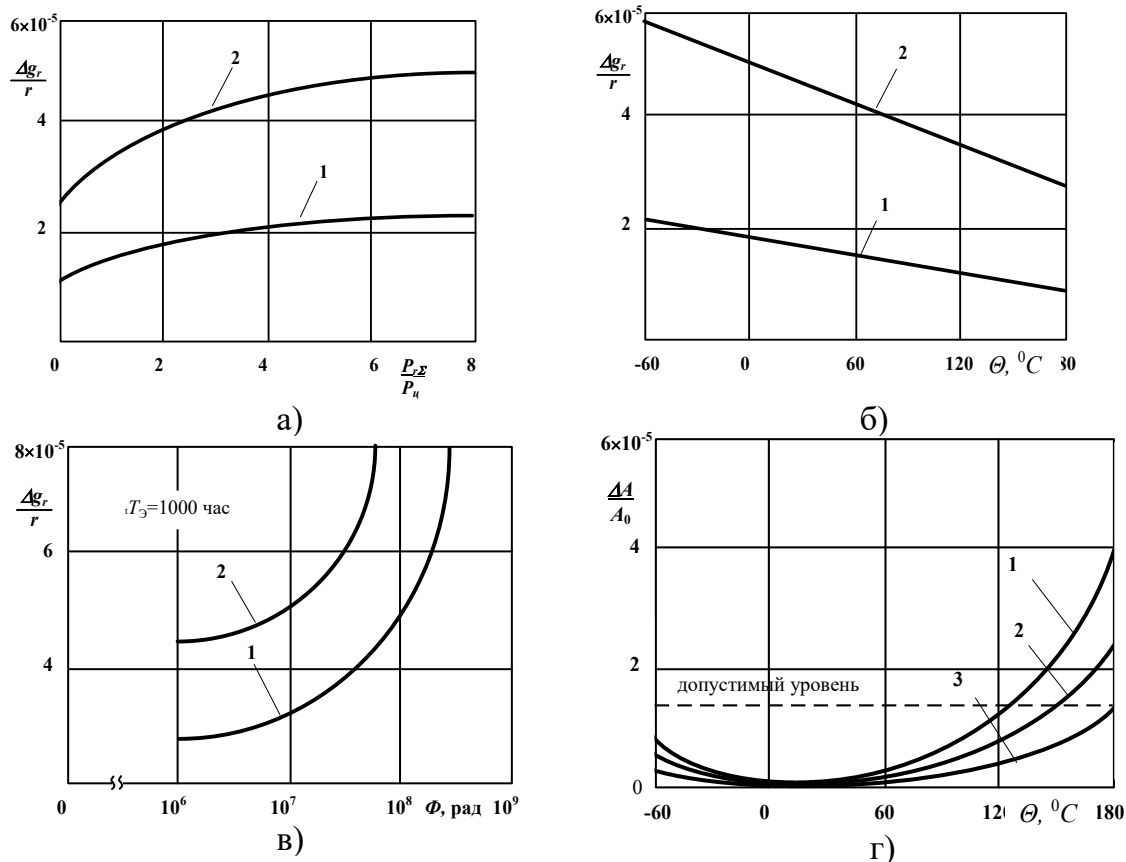


Рисунок 3.8 – Зависимости относительного прироста смещения центров индикатрисы ИИ и чувствительной поверхности ФП от: а – силовой нагрузки, б – температуры, в – радиации, г – зависимость относительного изменения площади оптического сопряжения ИИ и ФП от температуры

Ряд погрешностей зависит от энергетических факторов эксплуатационного характера. При воздействии на систему ВДФ, характерных для незащищенных частей бортового оборудования КА, в различных блоках, устройствах и элементах системы формируются источники энергетических потерь, повышающих погрешность измерения. Если исключить аварийные ситуации, то все они относятся к блоку ЗРМ (рисунок 3.9).

Параметрические факторы обусловлены особенностями материалов, используемых при изготовлении элементов ЗРМ. Это, например, затухание света по всему спектру или по отдельным спектральным составляющим из-за поглощения и рассеяния отражающими пластинами, потери мощности при

преобразовании оптического сигнала в электрический в ФП, при взаимном наложении световых лучей в световых завесах. Дополнительные потери вносят устройства и элементы электронного блока, входящие в состав усилителей, преобразователей, компараторов, схем питания, регистров и т.д.

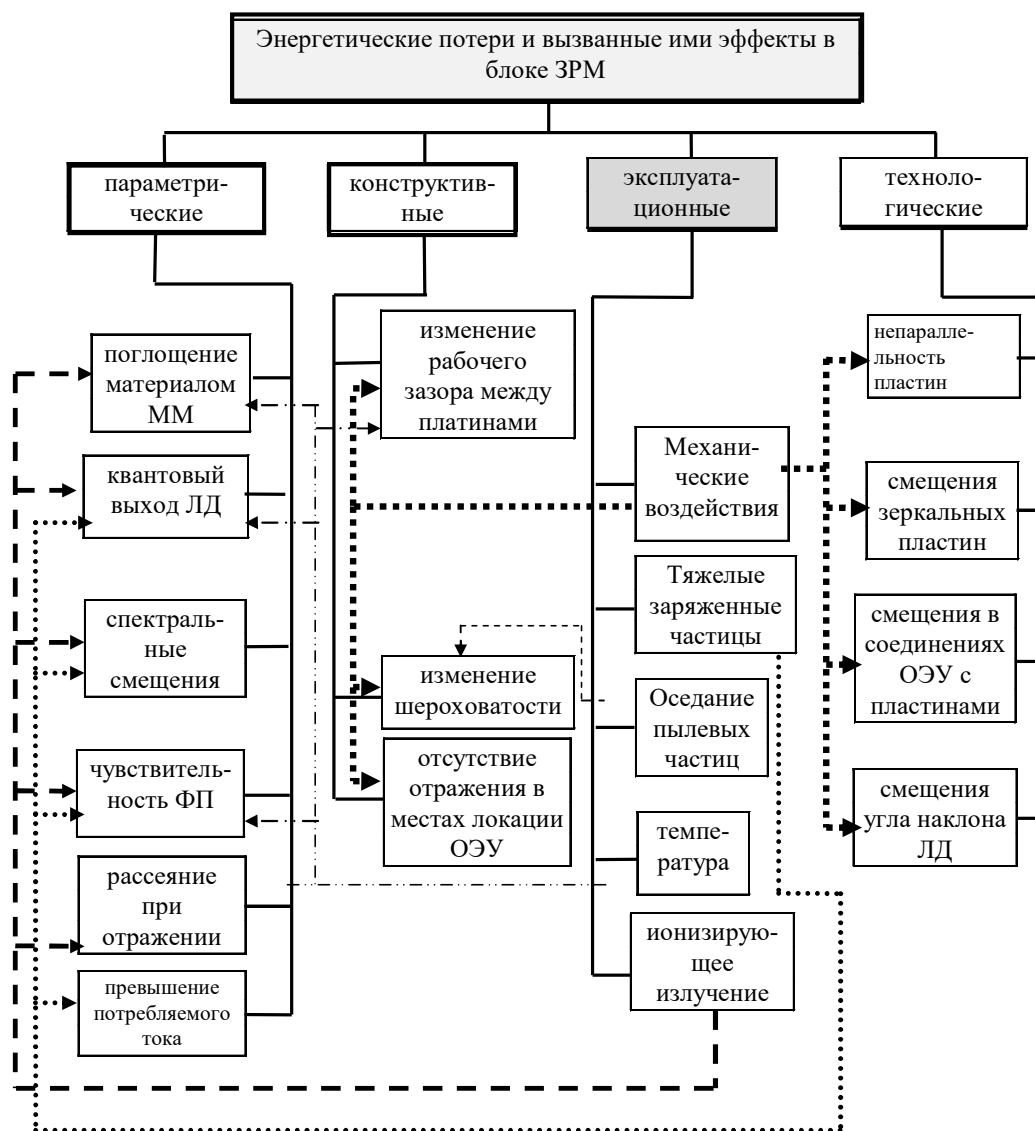


Рисунок 3.9 – Источники энергетических потерь и вызванных ими эффектов в блоке ЗРМ, повышающих погрешность измерения

Потери мощности вследствие конструктивных факторов обусловлены выбором той или иной конструктивной схемы ЗРМ, в которой формируются световые завесы. Сюда можно отнести потери вследствие особенностей конструкции различных оптических и механических соединений и

сопряжений из-за рабочих зазоров и смещений, френелевского отражения на них. Снижение конструктивных потерь достигается путем применения более совершенных конструкций ЗРМ, компактных энергетически эффективных ОЭУ, введения компенсирующих и корректирующих устройств и электронных схем

Технологические энергопотери напрямую связаны с инструментальными погрешностями, имеющими место при изготовлении и сборке деталей и элементов блока ЗРМ: отражающих пластин, оптических соединений, источников и приемников излучения, корпуса блока ЗРМ целом. Причинами их возникновения являются несовершенство и ограниченные возможности оборудования, используемого при изготовлении ИИС, ее узлов, деталей и элементов. Источниками значительных технологических потерь являются узлы стыковки пластин с источниками и приемниками излучения, фокусирующими устройствами.

Потери мощности эксплуатационного характера обусловлены воздействием ВДФ, вызывающим изменение энергетических показателей ИИ, ФП и элементов электронного узла, ухудшение функции отражающих пластин. Влияние ВДФ можно существенно уменьшить для отдельных узлов и элементов ИИС (например, для электронного узла) выносом последних в более комфортные условия.

В качестве основной характеристики оптического канала, являющегося в общем случае оптронной парой, принято использовать коэффициент передачи тока, представляющий собой отношение выходного и входного токов:

$$K_I = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}} = S_i K_{\text{ОПТ}} S_{\text{Ф}} \quad (3.13)$$

где S_i , Вт/А, – эффективность излучателя, определяемая видом выбранного излучателя, режимом его возбуждения, температурой;

S_{ϕ} , А/Вт, – чувствительность фотоприемника, зависящая от внутреннего усиления этого прибора;

$K_{\text{опт}}$ – передаточная функция оптического канала.

Для описания мощностных потерь удобно использовать приращение коэффициента передачи тока, вызванного изменением параметров доминирующих ВДФ:

$$\frac{\Delta K_I}{K_I} = \frac{1}{K_I} \frac{dK_I}{d\Theta} \Delta\Theta + \frac{1}{K_I} \frac{dK_I}{d\phi} \Delta\phi + \frac{1}{K_I} \frac{dK_I}{dF} \Delta F, \quad (3.14)$$

где Θ – температура;

ϕ – радиация;

F – приведенная сила виброударных воздействий.

Для построения модели влияния ВДФ на параметры выходной мощности блока ЗРМ необходимо определить слагаемые в правой части выражения (3.14). Рассмотрим их последовательно.

Характер влияния изменения температуры Θ на K_I определим без учета потерь в оптической среде (в том числе, линзы, материал ФП и т.д.). За основу в расчетах приняты параметры диодных оптронов с ЛД в качестве ИИ, так как они являются наиболее стойкими к воздействию ВДФ. С ростом температуры величина K_I эквивалентного оптрона падает приблизительно по линейному закону:

$$\frac{1}{K_{I,\text{оп}}} \frac{dK_{I,\text{оп}}}{dT} = -(0,003 \dots 0,007) K^{-1}. \quad (3.15)$$

Чем ниже температура, тем более линейна зависимость $I_{\text{вых}}(I_{\text{вх}})$. Учитывая, что наиболее существенный вклад температурные изменения вносят в изменения зазора между отражающими пластинами:

$$\frac{1}{K_{\text{ов}}} \frac{dK_{\text{ов}}}{dT} = \frac{1}{K_h} \frac{dK_h}{dT} + \frac{1}{K_{\text{изг},\Sigma}} \frac{dK_{\text{изг},\Sigma}}{dT} \quad (3.16)$$

Концентрация радиационных дефектов в ИИ линейно зависит от потока облучения в широких пределах изменения последнего [93]. Теоретический

анализ известных данных приводит к следующему выражению, определяющему уменьшение (деградацию) коэффициента передачи тока арсенид-галлиевого излучателя после радиационного воздействия [73]:

$$K_I = K_{I0}(1 + \tau_0 K_{\gamma, n} \Phi_{\gamma, n})^{-m} \quad (3.17)$$

где τ_0 – время жизни носителей заряда до воздействия радиации;

$\Phi_{\gamma, n}$ и $K_{\gamma, n}$ – интегральный поток γ -лучей или нейтронов и соответствующие константы повреждения;

m – постоянный коэффициент, равный 0,5 и 1 (при постоянном прямом смещении) и 0,75 и 1,5 (при постоянном прямом токе) для малых и больших смещений соответственно.

Из структуры этой формулы видно, что излучатель будет тем устойчивее к воздействию радиации, чем меньше начальное значение времени жизни носителей заряда и чем меньше константа повреждения. Наименее стойкими являются излучатели из арсенида галлия, легированного кремнием, полученные методом жидкофазной эпитаксии; $\tau_0 K_{\gamma} \approx (6...8,5) \cdot 10^{-7} \text{ рад}^{-1}$ и $\tau_0 K_n \approx (3...14) \cdot 10^{-12} \text{ см}^2$. Для излучателей, изготовленных путем диффузии цинка в арсенид галлия, значения этих констант в 20...30 раз меньше. Однако использование таких излучателей приводит к снижению K_I в необлученном состоянии. Характерно для этих излучателей, что радиационные дефекты, созданные γ -облучением, почти полностью «отжигаются» после пропускания импульса прямого тока, чего нет в случае GaAs(Si).

Описанные изменения свойств эквивалентной оптронной пары (уменьшение K_I) относятся ко времени после прекращения действия облучения, так как непосредственно в течение облучения передаточные свойства оптронной пары на порядок-два хуже (вплоть до полной потери ее работоспособности). Время восстановления работоспособности после прекращения импульсов облучения, т. е. времени достижения нового

равновесного состояния, близко к $3 \cdot 10^{-7}$ секунд для GaAs(Si) – и к $3 \cdot 10^{-8}$ секунд для GaAs(Zn) излучателей.

Приведенные данные показывают, что принципиально арсенид-галлиевые излучатели могут быть стойкими к воздействию потока нейтронов вплоть до $10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и дозы γ -лучей до $10^6 - 10^7$ рад. Сложность гарантированного обеспечения такой стойкости связана с тем, что практически невозможно прогнозировать точное значение $\tau_0 K_{\gamma,n}$ для каждого конкретного образца излучателя. Повышение радиационной стойкости оптронной пары остается не до конца решенной задачей.

С учетом (3.17) и изложенного материала можно записать для эквивалентной оптронной пары с GaAl(Zn) излучателем:

$$\frac{1}{K_I} \frac{dK_I}{d\Phi_\gamma} \approx -(2 \dots 4,5) \cdot 10^{-8} \text{ рад}^{-1}, \frac{1}{K_I} \frac{dK_I}{d\Phi_\Pi} \approx -(1 \dots 7) \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-2} \quad (3.18)$$

$$\frac{1}{K_I} \frac{dK_I}{d\Phi_{\gamma,\Pi}} = \frac{1}{K_I} \frac{dK_I}{d\Phi_\gamma} + \frac{1}{K_I} \frac{dK_I}{d\Phi_\Pi} \quad (3.19)$$

Виброударные воздействия могут привести к изменению рабочего зазора между отражающими пластинами, потери мощности от которого характеризуются коэффициентом K_h , и потери мощности от изгибной деформации отражающих пластин $K_{\text{изг},\Sigma}$. При этом:

$$\frac{1}{K_I} \frac{dK_I}{dF} = \frac{1}{K_h} \frac{dK_h}{dF} + \sum_{m=1}^c \left(\frac{1}{K_{\text{изг},\Sigma}} \frac{dK_{\text{изг},\Sigma}}{dF} \right) \quad (3.20)$$

где

$$\frac{1}{K_h} \frac{dK_h}{dF} = - \frac{\sqrt{2\varrho}}{2,5D - h\sqrt{2\varrho}} \frac{dh}{dF}, \quad (3.21)$$

$$\frac{1}{K_{\text{изг},\Sigma}} \frac{dK_{\text{изг},\Sigma}}{dF} = \frac{D}{l_{\text{изг}}(l_{\text{изг}}\varrho - D)} \frac{dl_{\text{изг}}}{dF} \quad (3.22)$$

В (3.20) – (3.22) $l_{\text{изг}}$ – расстояние, которое проходит луч после попадания в зону изгиба зеркальной поверхности; D – диаметр изгиба;

h – расстояние между зеркальными поверхностями после изгиба; ϱ – высота изгиба.

Таким образом, на основе выражения (3.14), подставив в него уравнения (3.15), (3.15), (3.18) – (3.20) и значения ВДФ, получаем модель влияния ВДФ на энергетические параметры БОЭ ИИС:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta K_I}{K_I} = & \frac{1}{K_h} \frac{dK_h}{dT} + \frac{1}{K_{\text{изг},\Sigma}} \frac{dK_{\text{изг},\Sigma}}{dT} + \frac{(1 + \tau_0 K_{y,n} \Phi_n)^{-m}}{K_{I0}} \left(\frac{dK_I}{d\Phi_y} + \frac{dK_I}{d\Phi_n} \right) \\ & + \frac{\sqrt{2\varrho}}{2,5D - h\sqrt{2\varrho}} \frac{dh}{dF} + \sum_{m=1}^c \left(\frac{D_m}{R_m(R_m\varrho - D_m)} \frac{dR}{dF} \right) \end{aligned} \quad (3.23)$$

Полученная модель влияния планируется к применению в процессе изготовления при оценке методов и средств компенсации погрешностей, вызванных ВДФ.

3.3 Компенсация погрешности измерений вектора скорости и геометрических параметров ММ

Особенности конструкции и области применения БОЭ ИИС а также разработанного метода измерения позволяют использовать следующие способы и методы снижения погрешности измерений и исключения получения недостоверной измерительной информации:

- выполнение многократных измерений с последующим усреднением результатов;
- периодическое или постоянное использование тестовых сигналов;
- допусковый контроль доминирующих составляющих и полной погрешности;
- контроль работоспособности и калибровка ИИС в процессе эксплуатации.

Выполнение многократных наблюдений с последующим усреднением их результатов эффективно при доминировании случайной составляющей погрешности измерений. Применение этого метода возможно, если в течение

интервала времени усреднения не происходит заметное изменение текущих значений измеряемой величины и, в то же время, в течение этого же интервала существенно меняется погрешность измерений текущих значений. Другими словами частотный спектр случайной составляющей погрешности измерений текущих значений должен быть значительно более высокочастотным по отношению частотного спектра процесса изменения измеряемой величины.

Формальным условием результативности снижения случайной составляющей погрешности измерений путем усреднения результатов измерений текущих значений является следующее:

$$\tau_{\text{зх}} \gg \eta T \gg \tau_{\text{зп}},$$

где: $\tau_{\text{зх}}$ – интервал времени затухания корреляционной функции измеряемой величины;

$\tau_{\text{зп}}$ – интервал времени затухания корреляционной функции случайной составляющей погрешности измерений;

T – интервал времени между измерениями текущих значений;

$\eta \eta$ – число усредняемых результатов измерений текущих значений в течение интервала усреднения.

В этом случае СКО случайной составляющей погрешности измерений средних значений при числе измерений текущих значений n за интервал времени усреднения ηT будет равно: $\sigma_{\text{ср}} = \frac{\sigma_{\text{т}}}{\sqrt{\eta \eta}}$,

где: $\sigma_{\text{ср}}$ – СКО случайной составляющей погрешности измерений средних значений;

$\sigma_{\text{т}}$ – СКО случайной составляющей погрешности измерений текущих значений.

Если случайная составляющая погрешности измерений доминирует, то при вышеуказанном условии коэффициент снижения погрешности измерений приближенно будет составлять $1/\sqrt{\eta \eta}$.

3.4 Снижение погрешности измерения параметров движения микрометеороида, вызванной рассеянным излучением

Анализ источников [72, 97, 109, 111,112] показывает, что систему регистрации показателей движения ММ можно модифицировать, добавив принцип контроля появления бокового рассеяния (на рисунке 3.10 схематично показан конструктив ЗРМ). Принцип работы ЗРМ заключается в том, что ММ, пролетая первую световую завесу, распределяет световую энергию лазера во все стороны. Для снижения погрешности измерения необходимо учитывать изменение световой энергии, поступающей на измерительный ФП. Для этого в «слепую» зону ПСЗ вводится дополнительный ФП (ДПФ). В случае отсутствия частицы сигнал с ДПФ $D2$ равен нулю, смещение обусловлено только шумами диода и позволяет их учитывать в процессе работы. При этом на $D1$, $D3$ поступает световой поток Φ .

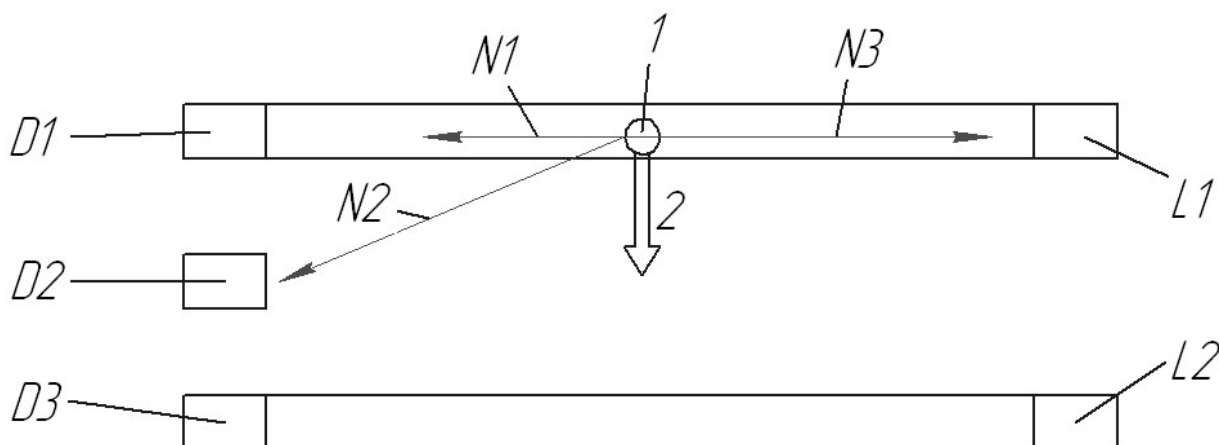


Рисунок 3.10 – Конструкция системы измерения скорости микрочастицы: $D1$, $D2$, $D3$ – фотодиоды; $N1$, $N2$, $N3$ – направления распространения световой энергии; $L1$, $L2$ – лазеры

При появлении ММ по направлению $N2$ за счет описанных выше свойств распространится часть светового потока, который в свою очередь

создаст сигнал на фотоприемнике D_2 , уровень которого будет пропорционален энергии Φ_2 .

Таким образом, введя дополнительный элемент в конструкцию базовой ИИС, снижается возможность ошибочных срабатываний измерительного канала и уменьшается погрешность определения времени начала и конца интервала лучепрерывания.

3.5 Согласование энергетических и позиционных параметров

При определении информационных параметров ИИС необходимо учитывать энергетическое обеспечение пространственных показателей. Поставленная задача может быть решена путем вывода уравнения согласования информационной способности измерительного канала ИИС по пространственно-временным (позиционным) и энергетическим параметрам. Результатом решения этой задачи может быть подбор элементов оптоэлектронного тракта исходя из заданных габаритных размеров ЗРМ, снижение инструментальной погрешности при изготовлении и юстировке отражающих пластин, либо изменение технологии производства элементов и сборки ЗРМ с целью уменьшения допусков на инструментальные погрешности.

Энергетический динамический диапазон информационно-измерительного канала определяется, как:

$$D = \frac{P_{cmax}}{P_{cmin}} \quad (3.24)$$

где P_{cmax} и P_{cmin} максимальное и минимальное значения мощности информационного сигнала. Текущее количество информации без учета информационной емкости измерительного канала можно записать:

$$I_{jk} = 0,5 \log_2(1 + D_{jk}) \quad (3.25)$$

где

$$D_{jk} = \frac{P_{cjk}}{P_{cjmin}} \quad (3.26)$$

P_{cjk} , P_{cjmin} – текущая мощность сигнала и минимальное значение регистрируемого уровня мощности сигнала при прохождении светового потока от ИИ до ФП.

Уравнение (3.25) позволяет сформулировать требования, предъявляемые к энергетическим характеристикам ПСЗ. Условие, обеспечивающее согласование пространственных и энергетических параметров в измерительном канале записываются в виде неравенства:

$$1 = I_{кв} = 0,5 \log_2(1 + \rho_{min}) \geq \log_2\left(\frac{\delta r}{2|e_2|}\right) \quad (3.27)$$

где $\rho_{min} = \min(P_c/P_{ш})$ – минимальное отношение сигнал/шум, обеспечивающее устойчивое выделение сигнала из смеси сигнала и шума выбранным методом (.

Левая часть неравенства в (3.27) обозначает пространственную границу погрешности, ниже которой опускать энергетическую информационную способность нецелесообразно, так как рост энергетических показателей не ведет к уменьшению позиционной погрешности. Правая часть неравенства показывает энергетическую границу, ниже которой наступает метрологический отказ.

При этом можно считать, что ИИ создает одинаковую освещенность по всей площади чувствительной части ФП. Тогда максимальное значение светового потока, соответствующее цене кванта δx позиционной шкалы может быть определено по формуле:

$$\Phi_{квmax} = E_0 S_{ФП} k_{отр} \quad (3.28)$$

где $S_{ФП}$ - площадь чувствительной части ФП.

Суммарную спектральную плотность мощности помех можно представить в виде суммы слагаемых, по-разному зависящих от параметров оптической системы и электронного тракта. Внутренние шумы

фотоприемника – дробовые, токовые, тепловые и генерационно-рекомбинационные шумы (в том числе шумы типа $1/f$) – имеют спектральные плотности мощности, которые в общем виде определяются выражениями [99]:

$$S_{i_{др}}(\omega) = k_{др} q \langle i \rangle; S_{i_{ТСК}}(\omega) = k_{ток} \frac{(\langle i \rangle)^\alpha}{\omega^\beta};$$

$$S_{i_{теп}}(\omega) = \frac{2k\Theta}{R_{фп}}; S_{i_{г-р}}(\omega) = \frac{k_{г-р} (\langle i \rangle)^2}{1 + \omega^2 \tau_H^2},$$

где $\langle i \rangle$ – среднее значение силы тока, протекающего через ФП;

q – заряд электрона;

k – постоянная Больцмана;

Θ – абсолютная температура ФП;

τ_H – среднее время жизни носителя заряда в полупроводниковых ФП;

$R_{фп}$ – внутреннее сопротивление инфракрасного ФП;

$k_{др}$, $k_{ток}$, $k_{г-р}$ – коэффициенты, получаемые эмпирическим путем.

При работе фотоприемника в фотодиодном режиме можно считать, что $\langle i \rangle = I_p$. Шумы типа $1/f$ резко ослабляются введением модуляции светового потока по каналу питания ИИ.

Дополнительные внутренние шумы генерируются активными сопротивлениями нагрузочной цепи $R_{нш}$ и в элементах усилителя фототока $R_{уш}$. В точке приложения на входе в усилитель суммарный шум можно представить спектральной плотностью мощности:

$$S_{шэ}(\omega) = 2kT(R_{нш} + R_{уш}) |W_y(j\omega)|^2$$

Суммарная спектральная плотность мощности помех описывается выражением:

$$S_{\Sigma ш}(\omega) = S_{i_{ф}}(\omega) + S_{i_{др}}(\omega) + S_{i_{ТСК}}(\omega) + S_{i_{теп}}(\omega) + S_{i_{г-р}}(\omega) + S_{шэ}(\omega) \quad (3.29)$$

В общем случае отношение сигнал/шум определяется по формуле:

$$\rho = \frac{(\Phi_{c0} S_{is} k_y k_n)^2}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|U_c(j\omega)|^2}{S_{шз}(\omega)} d\omega \quad (3.30)$$

Если значение отношения вычислено по заданному отношению сигнал/шум, то в правой части уравнения (3.30) регулируемые или выбираемыми параметрами являются значения Φ_0 , k_y , k_n , и S_{ic} . Нахождение этих параметров осуществляется численным способом в форме решения оптимизационной задачи. Дополнительные накладываемые условия – ограничение габаритов, веса, энергоемкости и др.

В качестве примера можно привести методику расчета диаметра чувствительной поверхности ФП. Для упрощения расчетов будем считать, что суммарный шум состоит из дробовых шумов ФП и тепловых шумов на нагрузочном сопротивлении.

Максимальная амплитуда тока в процессе отсчета на нагрузочном сопротивлении, соответствующая совпадению геометрических проекций ИИ и ФП:

$$I_{p\max} = \Phi_0 S_{ic} = E_0 S_{ФП} S_{ic}$$

С учетом дробового и теплового шумов спектральная плотность мощности флуктуаций тока в нагрузочном сопротивлении равна:

$$S_{\Sigma ш}(\omega) = qk_{др} S_{ФП} + \frac{2kT}{R} \quad (3.31)$$

Подставляя значения параметров сигнала и помехи из (3.31) в формулу (3.28), получим:

$$\rho = \frac{(\langle i \rangle)^2}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\tilde{i}(j\omega)|^2}{S_{\Sigma ш}(\omega)} d\omega = \frac{(K_c S_{ФП})^2}{4\pi \left[qk_{др} S_{ФП} + \frac{2kT}{R} \right]} \int_{-\infty}^{+\infty} |\tilde{i}(j\omega)|^2 d\omega \quad (3.32)$$

где $\tilde{i}(j\omega)$ - спектр последовательности счетных прямоугольных импульсов таймера единичной амплитуды длительностью t_c и периодом следования T_0 . В соответствии с теоремой Парсеваля при периоде наблюдения $T_y = NT_0$:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |\tilde{i}(j\omega)|^2 d\omega = \int_0^{T_H} \tilde{i}^2(t) dt = H t_c \quad (3.33)$$

Подставив (3.33) в (3.32), получим:

$$\rho = \frac{K_c^2 S_{\Phi\Pi}^2 H t_c}{q k_{\text{др}} S_{\Phi\Pi} + K_{\text{др}} S_{\Phi\Pi} + \frac{2k\theta}{R}} \quad (3.34)$$

Решая уравнение (3.34) относительно неизвестного $S_{\Phi\Pi}$, определим значение площади чувствительной части ФП, обеспечивающей нижнюю границу погрешности воспроизведения уровней квантования:

$$S_{\Phi\Pi\text{min}} = \frac{\rho(qk_{\text{др}} + K_c)}{2K_c^2 H t_c} \left[1 \pm \sqrt{1 + \frac{kTK_c H t_c}{R\rho(qk_{\text{др}} + K_c)}} \right]. \quad (3.35)$$

Методика согласования энергетических и пространственно-временных параметров измерительного канала может применяться для всех типов лазерных световых завес построенных на принципе амплитудной модуляции светового потока.

3.6 Учет и компенсация дополнительной погрешности применением тестовых сигналов

Опыт эксплуатации бортовых ИИС показывает, что в ряде случаев могут наступать события, когда на выходе измерительного канала формируется величина, не соответствующая истинному значению измеряемого параметра. Блок ЗРМ, содержащий незащищенные оптоэлектронные устройства, наиболее чувствительная к воздействиям ВДФ часть ИИС. Статистика отказов показывает, что до 80% метрологических отказов относится к ЗРМ и только 20% приходится на цифровую часть системы, линии питания и связи [92]. Поэтому задача повышения надежности работы и уменьшение погрешности ЗРМ представляется особенно актуальной.

В результате воздействия ВДФ и естественного старения устройств и элементов ЗРМ могут возникнуть следующие метрологические ситуации:

1. Измеренное значение вектора скорости ММ становится недостоверным, т.е. вероятность получения адекватного цифрового значения $P(V) \rightarrow 0$;

2. Измеренное значение вектора скорости ММ имеет достоверность ниже допустимой: $P(V) < P_{\text{доп}}$, но позволяет получать качественную оценку изменения параметра (например индицировать направление движения ММ);

3. Достоверность находится в пределах допустимой, но с прогнозируемым выходом за границу $P_{\text{доп}}$ до окончания заданного периода T_3 эксплуатации;

4. Достоверность измеряемого значения находится в пределах допуска и прогнозируется ее невыход за пределы допуска в течение заданного периода эксплуатации.

Возможность возникновения ситуаций 1 – 3 тем вероятней, чем жестче условия эксплуатации и чем уязвимей для ВДФ, в первую очередь, конструкция блока ЗРМ (применяемые детали, элементы и материалы, их соединения и крепления). В зависимости от заданных технических характеристик ЗРМ и ММ при разработке ИИС ставятся и решаются следующие задачи:

1 – обеспечения достоверности в пределах допуска в период заданного срока эксплуатации;

2 – исключения получения информации при возникновении ситуаций 1 и 2 с учетом или без учета прогноза по метрологическому отказу (ситуация 3).

Первая задача, помимо подбора вариантов конструкции, учета свойств применяемых деталей, элементов и материалов, решается введением в ЗРМ элементов защиты от ВДФ и расчетом допусков на достоверность измеряемых параметров на время эксплуатации КА. В процессе расчета исключаются катастрофические ситуации, когда в результате воздействия ВДФ достоверность информации мгновенно падает до $P(V)=0$.

При прохождении ММ через ПСЗ возникают два оптических эффекта: перекрытие лазерного луча и возможная фоновая засветка ФП лучом, отраженным от ММ или от ММ и зеркальных пластин. Для регистрации ММ предложен вариант исключения влияния фоновой засветки, расположив в каждой световой завесе максимально приближенного дополнительного ФД, на который не будет поступать полезный сигнал, но будет поступать максимально приближенная к основному фоновая засветка, в таком случае возможно выделить полезный световой поток:

$$\Phi_{\Pi} = \Phi_1 - \Phi_2,$$

где Φ_1 – суммарный световой поток на основном ФП;

Φ_2 – паразитный световой поток на дублирующем ФП.

Для более подробного анализа погрешностей измерения необходимо рассмотреть внешние воздействующие факторы (ВВФ), влияющие на результаты измерений. На рисунке 3.11 представлен пример случайного распределения фонового шума, а также измеренный световой поток на основном и дублирующем ФП.

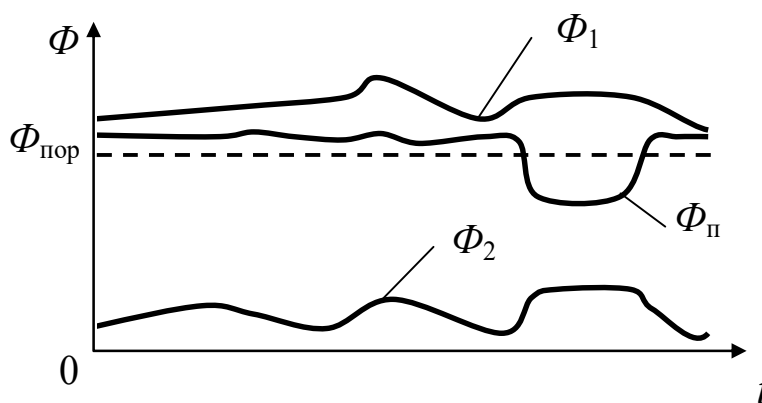


Рисунок 3.11 – Вариант компенсации фонового шума

3.7 Самотест информационно-измерительной системы

Для реализации самоконтроля ИИС рассмотрен следующий алгоритм работы, представленный на рисунке 3.12.

Основа самоконтроля заключается в проверке работоспособности линии ИИ – ФП, а именно:

- 1) базовый контроль получения сигнала всеми ФП
- 2) В случае отсутствия одного или нескольких сигналов на ФП требуется юстировка ИИ и зеркальных поверхностей, а также проведение повторного самоконтроля с начала алгоритма.
- 3) Кратковременное на 10 мс с шагом 10 мс отключение ИИ и контроль факта пропадания сигнала до уровня шума на всех ФД с соответствующей задержкой по времени и последующее их восстановление.
- 4) Проведение повторного контроля по п.3 не менее 3 раз.
- 5) Контроль времени пропадания и восстановления сигнала на ФП относительно времени отключения ИИ.
- 6) В случае несоответствий в п.5 необходим перерасчет времени получения сигнала на ФП (возможный вариант при смещении положения зеркальных поверхностей или угла наклона ИИ).
- 7) Завершение алгоритма и переход на штатную работу.

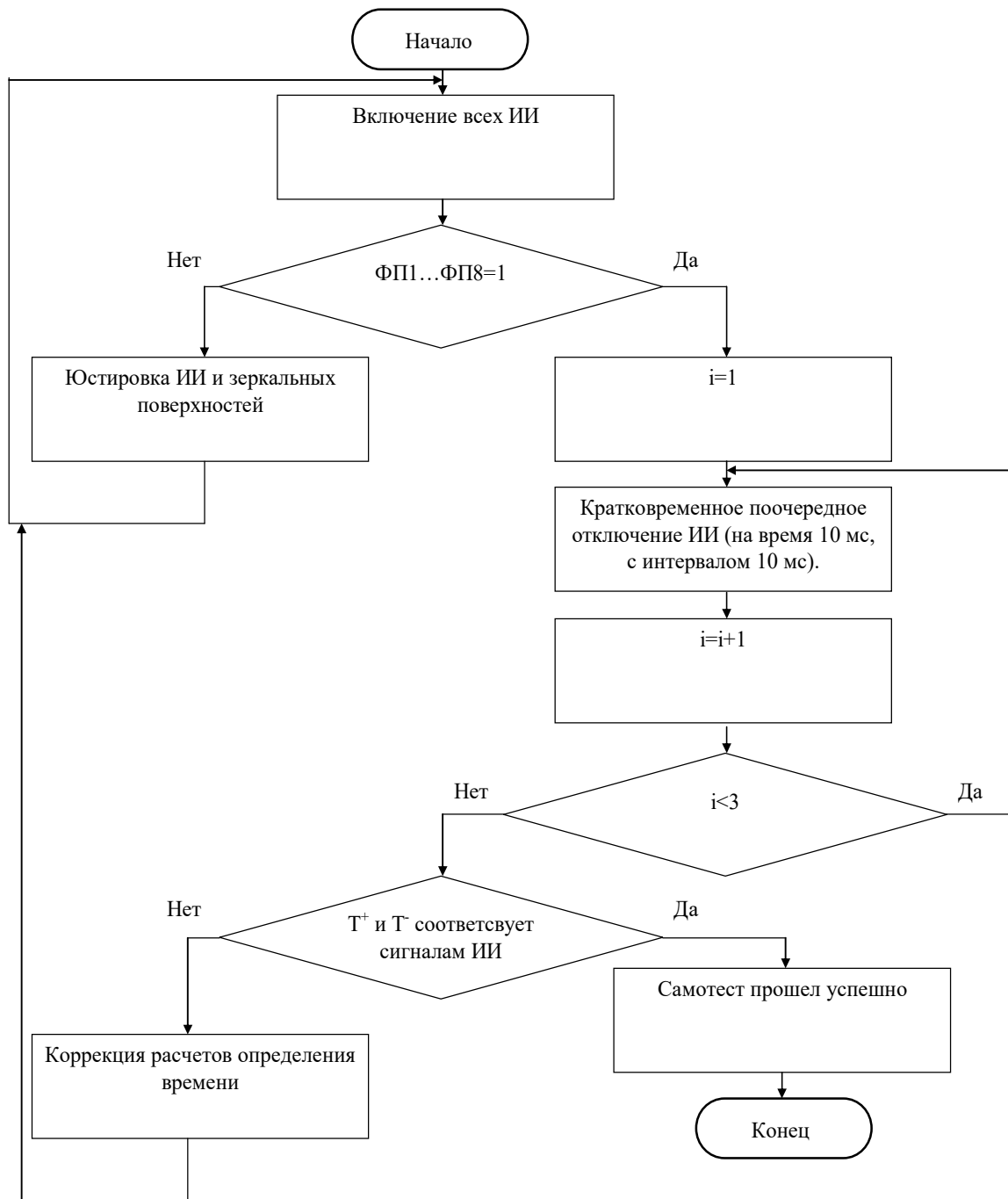


Рисунок 3.12 – Алгоритм самотестирования ИИ

3.8 Допусковый контроль

Если характер изменения суммарной погрешности ЗРМ рассматривается как нестационарный случайный процесс (за счет роста систематической составляющей), то поведение погрешности во времени можно аппроксимировать линейной зависимостью:

$$\Delta(t) = \Delta_0 + k_{\Delta}t \quad (3.36)$$

где Δ_0 - начальное значение абсолютной погрешности;

k_Δ – скорость изменения погрешности, определяемая для блока ЗРМ наличием Δ_0 и воздействием ВДФ.

Характер нестационарного случайного процесса с аппроксимациями вида (3.43) представляет собой семейство квазилинейных реализаций, каждая из которых соответствует возрастанию погрешности измерения до допустимого предельного значения $\Delta_{\text{доп}}$. Значения Δ_0 и k_Δ для блока ЗРМ можно представить как случайные величины. Эти значения взаимозависимы, так как определяются одними и теми же внешними и внутренними воздействующими факторами.

Используя метод канонического разложения случайной функции (3.36), из рекуррентных соотношений получим составляющие случайной:

$$\Delta_{t'} = \hbar_1, \delta_{\Delta(t)} = g(t)\hbar_1 + \hbar_2 \quad (3.37)$$

где \hbar_1, \hbar_2 – некоррелированные случайные величины с нулевым математическим ожиданием, $\delta_{\Delta(t)}$ распределение приращений погрешности за время t ;

$g(t) = \sigma_{\Delta_0} \sigma_{k_\Delta} \dot{k} t$ – координатная функция, учитывающая корреляционную связь между Δ_0 и k_Δ ;

σ_{Δ_0} и σ_{k_Δ} - среднеквадратические отклонения величин Δ_0 и k_Δ ;

\dot{k} – коэффициент корреляции между Δ_0 и k_Δ .

Значения Δ_0 и k_Δ в соответствии с экспериментальными данными распределены по нормальному закону. Величины \hbar_1 и \hbar_2 также распределены нормально, поскольку линейно связаны с Δ_0 и k_Δ . Вместе с тем, введение некоррелированных величин \hbar_1 и \hbar_2 позволяет привести случайные величины к системе независимых величин, что в конечном итоге существенно упрощает получение функции распределения предельных значений погрешности измерений (при условии, что $\Delta(t \leq T_9) \leq \Delta_{\text{доп}}$).

Тогда функция (3.36) может быть записана:

$$\Delta(t) = M_{\Delta}(t) + [1 + g(t)]\hbar_1 + \hbar_2 = \Delta_0 + m_{k_{\Delta}} + (1 + \sigma_{\Delta_0} \sigma_{k_{\Delta}} kt)\hbar_1 + \hbar_2 \quad (3.38)$$

где $m_{k_{\Delta}}$ – математические ожидания начального значения погрешностей;

Δ_0 – скорости их приращения.

Применяя в качестве критерия условие вероятности $P\{g(t) < P_{\text{доп}}\}$ [113], получим следующую функцию ее распределения во времени:

$$F(t) = \Phi \left\{ \frac{m_{k_{\Delta}} t - (\Delta_{\text{доп}} - \Delta_0)}{\sqrt{\sigma_{\Delta_0}^2 t + \sigma_{\Delta_0}^2 + 2\sigma_{\Delta_0}^2 \sigma_{k_{\Delta}} kt}} \right\}. \quad (3.39)$$

Из (3.46) при заданном $\Delta_{\text{доп}}$ определяется среднестатистическое время нахождения параметров погрешности в заданных пределах, которое должно быть большим или равным времени цикла измерения $T_{\text{ц}}$ ИИС. Сложным в реализации рассмотренного метода является установление значения коэффициента корреляции k между Δ_0 и $\sigma_{k_{\Delta}}$, имеющего большой разброс для различных условий работы ИИС в целом и ее узлов в отдельности.

Функция распределения (3.46) позволяет учесть зависимость скорости изменения погрешности измерения в течение времени $T_{\text{ц}}$ от начального значения погрешности и, следовательно, определить при заданном $\Delta_{\text{доп}}$ среднестатистическое значение времени нахождения погрешности в заданных пределах. Если начальные значения погрешности не имеют разброса в группе ЗРМ, то $\sigma_{\Delta_0} = 0$ и $k=0$. В этом случае функция распределения (3.46) имеет характер α -распределения. Если при этом k_{Δ} не зависит от Δ_0 , то функция $F(t)$ соответствует закону распределения Бернштейна [95].

Если в ИИС предусмотрена периодическая автоматическая поверка и калибровка то, на межповерочном интервале времени $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i, i = 0, 1, 2 \dots$ можно использовать финитное распределение:

$$F_{Ci}(t) = \kappa\{F(t_{i+1}) - F(t_i)\}, \quad (3.40)$$

где κ – нормирующий множитель, определяемый граничными условиями (например, $\Delta_{\text{доп}}$), достижение которого значением погрешности измерений означает метрологический отказ ИИС.

Значение множителя κ находится по формуле:

$$\kappa = \left\{ \Phi(m_{k_{\Delta}}/\sigma_{k_{\Delta}}) + \Phi[(\Delta_{\text{доп}} - \Delta_0)/\sigma_{k_{\Delta}}] - 1 \right\} \quad (3.41)$$

Вероятность того, что за время T_M ИИС останется метрологически безотказным, определяется как:

$$P(t > T_M) = \kappa^{-1} \left[\Phi\left(\frac{m_{k_{\Delta}}}{\sigma_{k_{\Delta}}}\right) - \Phi\left\{ \frac{m_{k_{\Delta}} T_M - (E_{\text{доп}} - E_0)}{[\sigma_{k_{\Delta}}^2 T_M^2 + \sigma_{\Delta_0}^2 + 2\kappa \sigma_{k_{\Delta}} \sigma_{\Delta_0} T_M]^{0,5}} \right\} \right] \quad (3.42)$$

3.9 Исследование достоверности результатов измерения методом корреляционного анализа и метода Монте-Карло

Зададимся для проведения анализа с помощью САПР MathCad количеством 10^5 микрометеороидов, пролетающих случайно в области размерностью 0,1x1 метр.

С помощью функции rnd построим схематично места пролета частиц в предполагаемой световой завесе (рисунок 3.13).

Зададимся следующими условиями:

$$Sm(\gamma, 1) = \int_0^l (x \cdot \text{tg}(\gamma)) dx - \int_{\frac{1}{2}}^{\frac{l-1}{2}} \left(\frac{1}{2} + x \cdot \text{tg}(\gamma) \right) dx + l \cdot \frac{d}{\sin(\gamma)}, \quad (3.43)$$

где Sm – глобальный параметр сглаживания функции;

d – линейный размер ММ;

γ – угол наклона светового потока;

x – проекция расстояния, которое проходит луч, на зеркальную поверхность.

Н,м

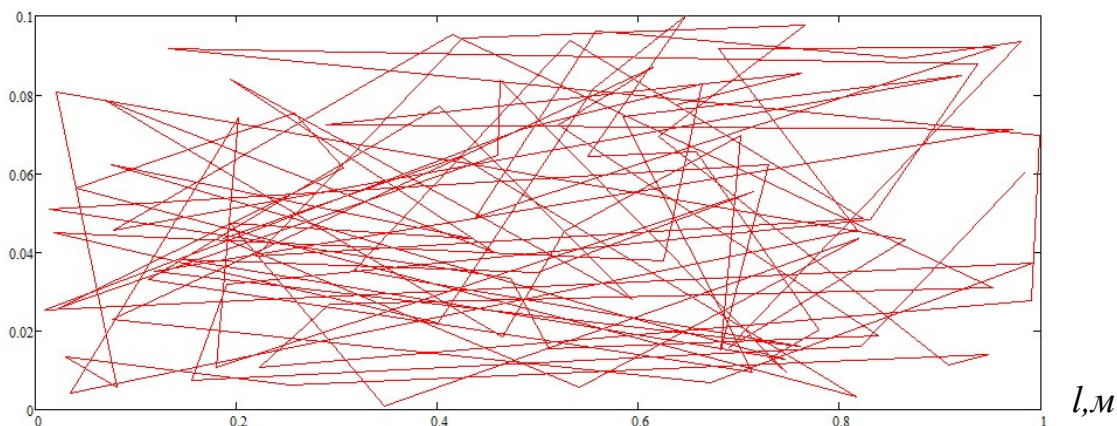


Рисунок 3.13 – Схематичные вероятные места попадания ММ в световую завесу

Для определения вероятности регистрации факта пролета частицы произведем расчет по следующим формулам:

$$P(\gamma, d) = \begin{cases} \left| \frac{Sm(\gamma, d)}{Sp(\gamma, d)} \right|, & \frac{Sm(\gamma, d)}{Sp(\gamma, d)} \leq 1 \\ 1, & \frac{Sm(\gamma, 1)}{Sp(\gamma, 1)} > 1 \end{cases}, \quad (3.44)$$

где $Sp(\gamma, d) = \int_{\frac{1}{2}}^{\frac{h-1}{2} + x \cdot \text{tg}(\gamma)} \left(\frac{1}{2} + x \cdot \text{tg}(\gamma) \right) dx$.

На рисунке 3.14 представлен график зависимости вероятности регистрации факта пролета частицы в зависимости от размеров частицы и угла наклона луча.

Поскольку заранее такие параметры как плотность распределения вероятности и функция корреляции неизвестны, то оценка вероятности пролета метеороида непосредственно через световую завесу может быть получена лишь после проведения измерений. Для предварительной оценки необходимого числа отсчетов можно допустить, что ММ пролетают через устройство со случайными координатами пересечения плоскостей устройства. Для таких объектов исследования плотность распределения определена методом статистических испытаний Монте-Карло путем компьютерного моделирования процесса измерений.

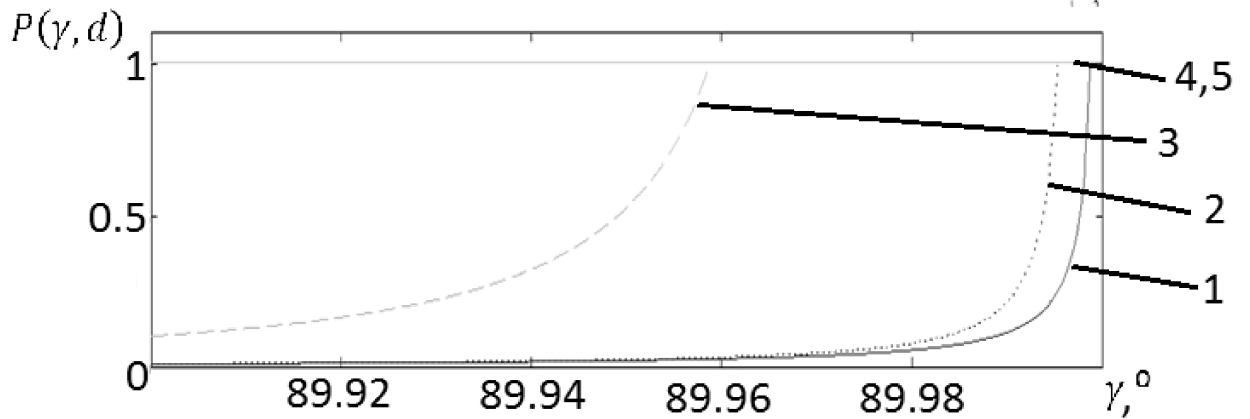


Рисунок 3.14 – График зависимости вероятности обнаружения частицы от её размеров и угла хода луча (1 – для $P(\gamma, 10^{-6})$, 2 – для $P(\gamma, 10^{-5})$, 3 – для $P(\gamma, 10^{-4})$, 4 – для $P(\gamma, 10^{-3})$, 5 – для $P(\gamma, 10^{-2})$)

Для каждого из углов первоначального положения лазера γ было построено множество моделей (для измерений от 10 до 10000 точек), в каждом из которых вычислялось количество попаданий частицы непосредственно в световую завесу относительно частиц, попавших в плоскость устройства (N). Приняв допущение, что вероятность обнаружения объекта одинакова для каждого звена световой завесы, получим следующие условия:

$$y(x) = \begin{cases} x \cdot \operatorname{tg}(\gamma), & 0 < x < \frac{l}{\operatorname{tg}(\gamma)} \\ 2h - x \cdot \operatorname{tg}(\gamma), & \frac{l}{\operatorname{tg}(\gamma)} < x < 2 \frac{l}{\operatorname{tg}(\gamma)} \end{cases}, \quad (3.45)$$

где l – расстояние между зеркалами;

γ – начальный угол наклона лазерного излучения.

На рисунке 3.15 изображен фрагмент полученной световой завесы для $\gamma = \operatorname{arctg}\left(\frac{h}{5 \cdot 10^{-6}}\right)$ и $h=0,1$.

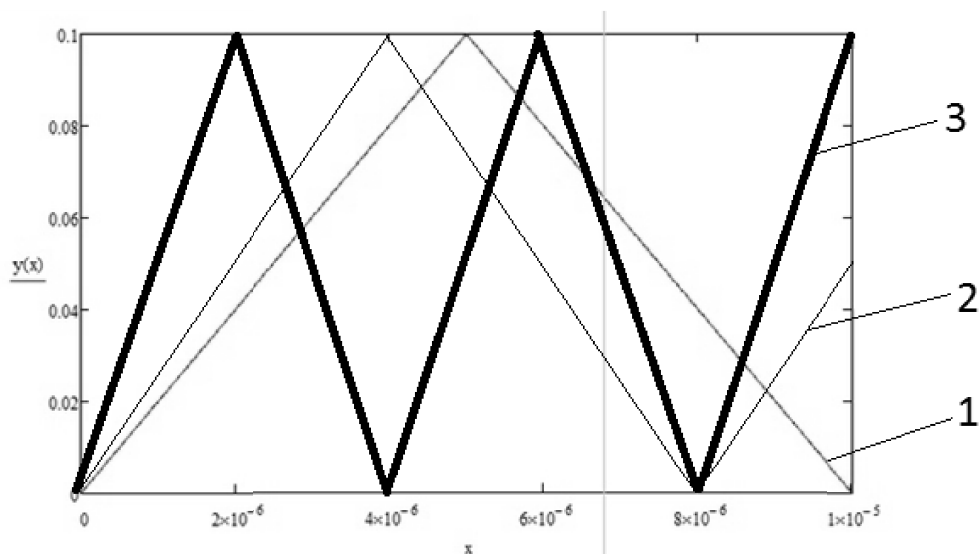


Рисунок 3.15 – Фрагмент световой завесы для обнаружения со 100% вероятностью частиц (1 – размером не менее 10 мкм, 2 – размером не менее 8 мкм, 3 – размером не менее 4 мкм)

По алгоритму, реализующему формулу (3.45), разработана программа расчета вероятности необнаружения ММ, представленная на рисунке 3.16. Был задан массив из множества точек (от 10 до 10000) в различных случайных координатах, а также сопоставлено уравнение кривой световой завесы и положения полученных точек с учетом того, что пересечением считалось положение точек соответствующее действительному значению с допуском отклонением в половину размера исследуемого объекта (5 мкм).

В результате полученные случайным образом координаты точек были сформированы и просчитаны вероятности получения информации о факте пролета частицы для различных значений первоначального угла положения лазера (рисунок 3.17).

```


$$N = 10^6$$

for i ∈ 1..N                                     = 1
  h ← 0.1
   $\gamma \leftarrow \operatorname{atan}\left(\frac{0.1}{5 \cdot 10^{-6}}\right)$ 
   $a_i \leftarrow \operatorname{md}(h)$ 
  -----
   $b_i \leftarrow \operatorname{md}\left(\frac{h}{\tan(\gamma)}\right)$ 
  K ← K + 1 if  $a_i - 10^{-5} \cdot \tan(\gamma) \leq b_i \cdot \tan(\gamma) \leq a_i + 10^{-5} \cdot \tan(\gamma)$ 
  K ← K otherwise
   $\frac{K}{N}$ 

for i ∈ 1..N                                     = 0.36
  h ← 0.1
   $\gamma \leftarrow \operatorname{atan}\left(\frac{0.1}{5 \cdot 10^{-5}}\right)$ 
   $a_i \leftarrow \operatorname{md}(h)$ 
  -----
   $b_i \leftarrow \operatorname{md}\left(\frac{h}{\tan(\gamma)}\right)$ 
  K ← K + 1 if  $a_i - 10^{-5} \cdot \tan(\gamma) \leq b_i \cdot \tan(\gamma) \leq a_i + 10^{-5} \cdot \tan(\gamma)$ 
  K ← K otherwise
   $\frac{K}{N}$ 

```

Рисунок 3.16 – Программа расчета вероятности фиксации факта пролета исследуемого объекта

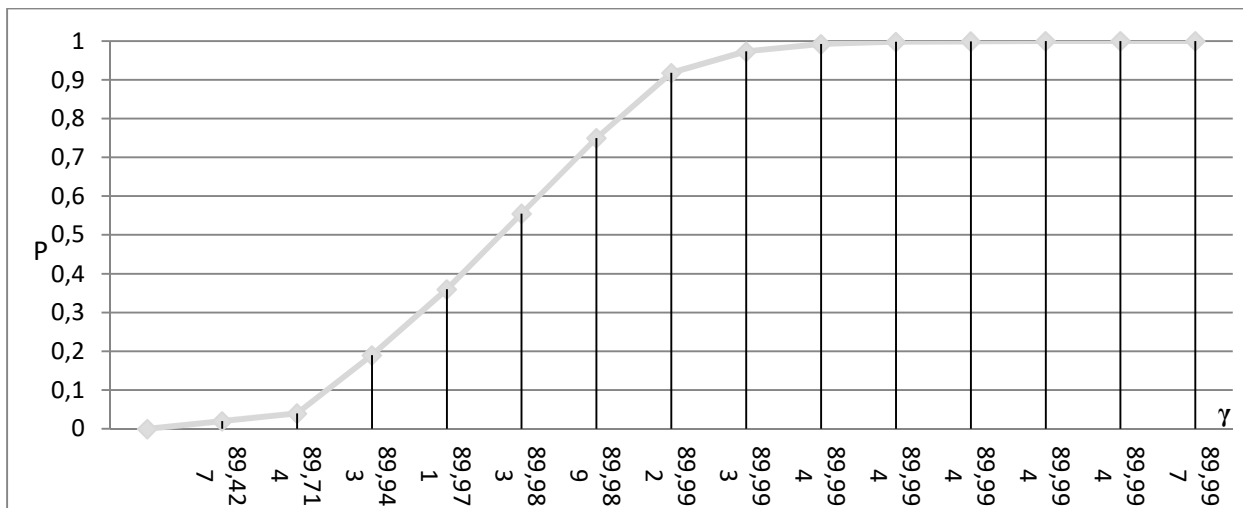


Рисунок 3.17 – График зависимости вероятности лучепрерывания микрометеороидом ПСЗ при изменении угла луча ИИ

Как видно из графика (рис. 3.17), при значении угла наклона лазера $89,994^\circ$ вероятность обнаружения частицы размером не менее 10 мкм составляет 100%.

Выводы по главе 3

1. Выполнена классификация погрешностей БОЭ ИИС, выявлен комплексный характер погрешности, связанный с измерением временных интервалов и их преобразования в позиционные параметры движения ММ с учетом геометрических и энергетических параметров ПСЗ.

2. Проведен анализ составляющих методической погрешности. Разработана методика оценки методической погрешности, в соответствии с которой определены доминирующие составляющие погрешности

3. Выполненный анализ инструментальной погрешности устройства показал, что основным фактором формирования инструментальной погрешности являются технологические неточности изготовления, установки и юстировки ЗРМ.

4. Анализ дополнительных погрешностей показал доминирующий характер влияния температуры, виброударных воздействий и ионизирующего излучения окружающей среды на погрешность измерений.

5. Предложены методы и средства уменьшения погрешностей, основанные на введении дополнительных ПСЗ, дополнительных ФП для измерения фонового светового потока и согласование пространственных и энергетических характеристик. Получена оценка теоретически достижимого уменьшения погрешности измерения до $\delta V=(3 - 5)\%$ при использовании современной компонентной базы.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ И ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА БОЭ ИИС ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕКТОРА СКОРОСТИ МИКРОМЕТЕОРОИДОВ

4.1 Исследование имитационной модели модели БОЭ ИИС с плоскими световыми завесами

В компьютерную модель вводились данные из имеющейся в распоряжении АО «Прогресс» базы характеристик материалов, а также характеристик компонентов устройства исследования компьютерной модели БОЭ ИИС. С применением САПР TracePro 7.0 (моделирование методом конечных элементов, трассировка лучей методом Монте-Карло) получены результаты моделирования и сравнения параметров световых завес.

Процесс моделирование включает в себя:

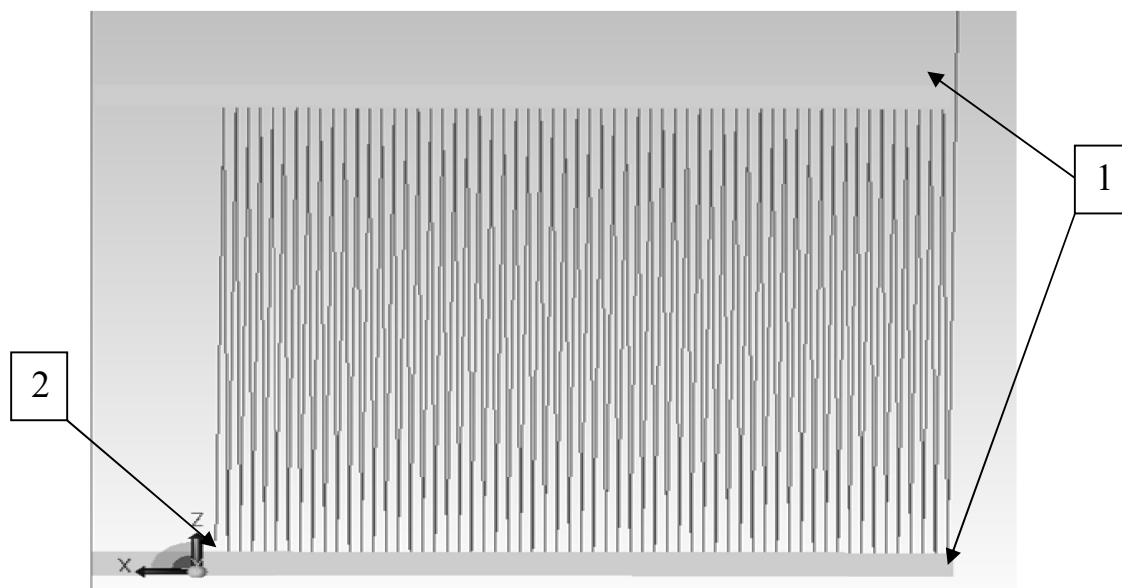
1. Создание зеркальной поверхности необходимой формы;
2. Задание характеристик зеркальной поверхности (шероховатость, коэффициент отражения);
3. Создание светоизлучающего элемента (лазера);
4. Расположение лазера в ИИС (координаты, угол излучения и пр.).

Рассмотрим вариант, когда в качестве зеркальной поверхности применено «идеальное зеркало» (коэффициент отражения 100%). Моделирование выполняется с учетом следующих допущений:

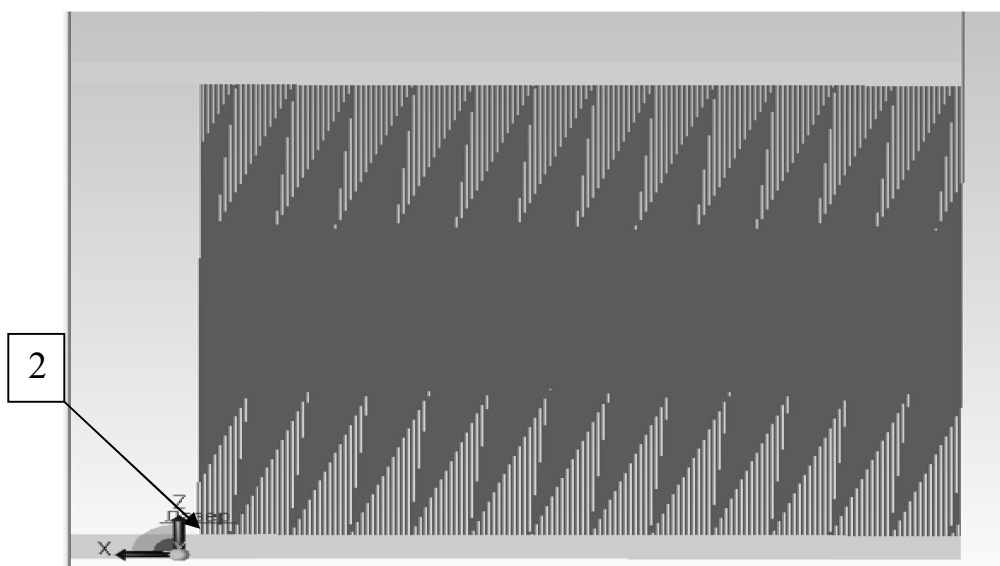
1. Коэффициент отражения поверхностей равен 100%.
2. Поверхность зеркал имеет шероховатость равную 0.
3. На поверхности зеркал отсутствуют микрочастицы (микронеровности).

На рисунке 4.1 представлено графическое отображение модели ПСЗ с «идеальным зеркальным покрытием» (коэффициент отражения 100%) и идеально отполированной поверхностью.

При пролете ММ через такую ПСЗ фиксируемые ММ пересекают лучи мощность которых зависит только от расстояния между ИИ и ФП.



а)



б)

Рисунок 4.1 – Ход луча при использовании поверхности типа «идеальное зеркало» (1 – зеркальные поверхности, 2 – ИИ):

а) для осевой линии индикатрисы излучения $89,5^\circ$,

б) для осевой линии индикатрисы излучения $89,9^\circ$

На рисунке 4.2 представлено графическое отображение одной из моделей ПСЗ БОЭ ИИС с зеркальным покрытием из реально существующих материалов, как видно, даже при коэффициенте отражения более 98% [105, 106] затухание луча уже после 1 сантиметра зеркальной поверхности,

учитывая расстояние между зеркалами в 10 см и ширину пучка 1 мкм составляет более 99% (красная зона).

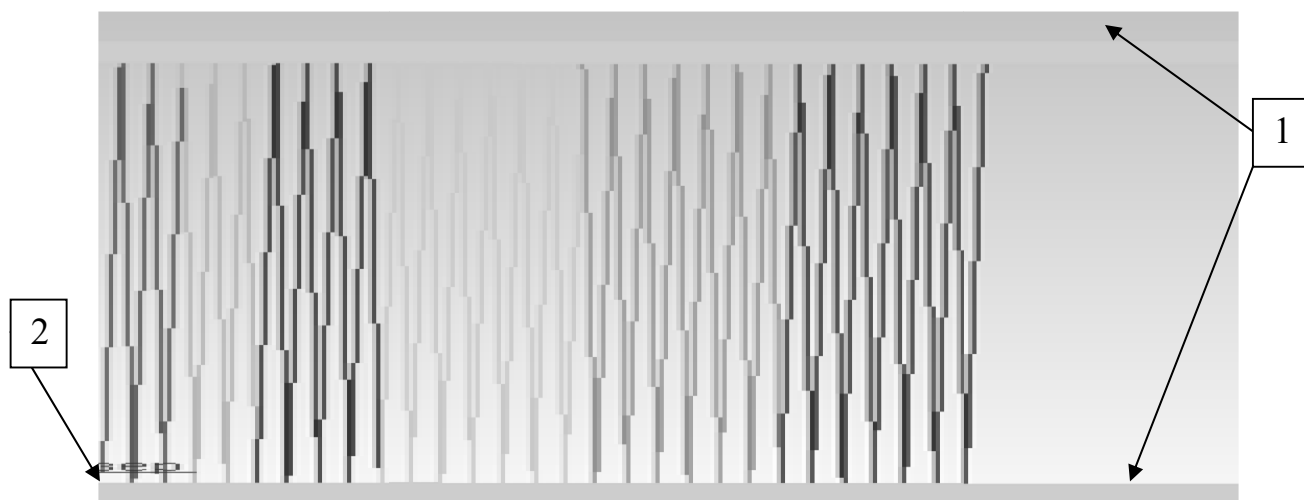


Рисунок 4.2 – Ход луча при отражении через зеркальное покрытие с коэффициентом отражения 98% (1 – зеркальные поверхности, 2 – ИИ).

На основании построенной модели проведен анализ зависимости затухания луча от количества отражений и расстояния между ИИ и ФП:

$$\psi(R_{л}, \chi, l, \gamma) = \chi^{-R_{л}/(l \cos(\gamma))} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

где ψ – затухание мощности ИИ на входе ФП, %;

$R_{л}$ – расстояние от излучателя, м;

χ – коэффициент отражения;

l – расстояние между зеркальными поверхностями;

γ – угол между зеркальной поверхностью и лучом.

На рисунке 4.3 представлена зависимость допустимого расстояния покрытия ИИС от ряда параметров (4.1). Одним из путей устранения проблем, связанных с затуханием оптического луча, является принцип ячеечного построения ПСЗ, который представлен на рисунке 4.4.

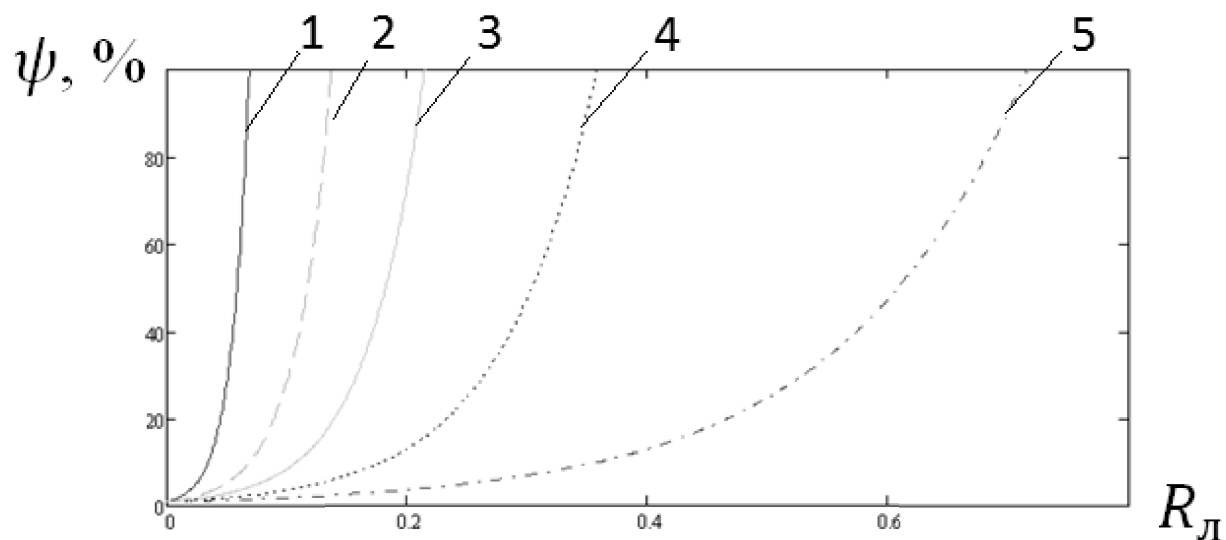


Рисунок 4.3 – Взаимосвязь длины координаточувствительных поверхностей ПСЗ и энергетических характеристик комплектующих (1 – для $\psi(R_{л}, 0.9, 0.1, \frac{99}{200}\pi)$, 2 – для $\psi(R_{л}, 0.98, 0.1, \frac{99}{200}\pi)$, 3 – для $\psi(R_{л}, 0.9, 0.2, \frac{99}{200}\pi)$, 4 – для $\psi(R_{л}, 0.98, 0.2, \frac{99}{200}\pi)$, 5 – для $\psi(R_{л}, 0.98, 0.2, \frac{99.7}{200}\pi)$)

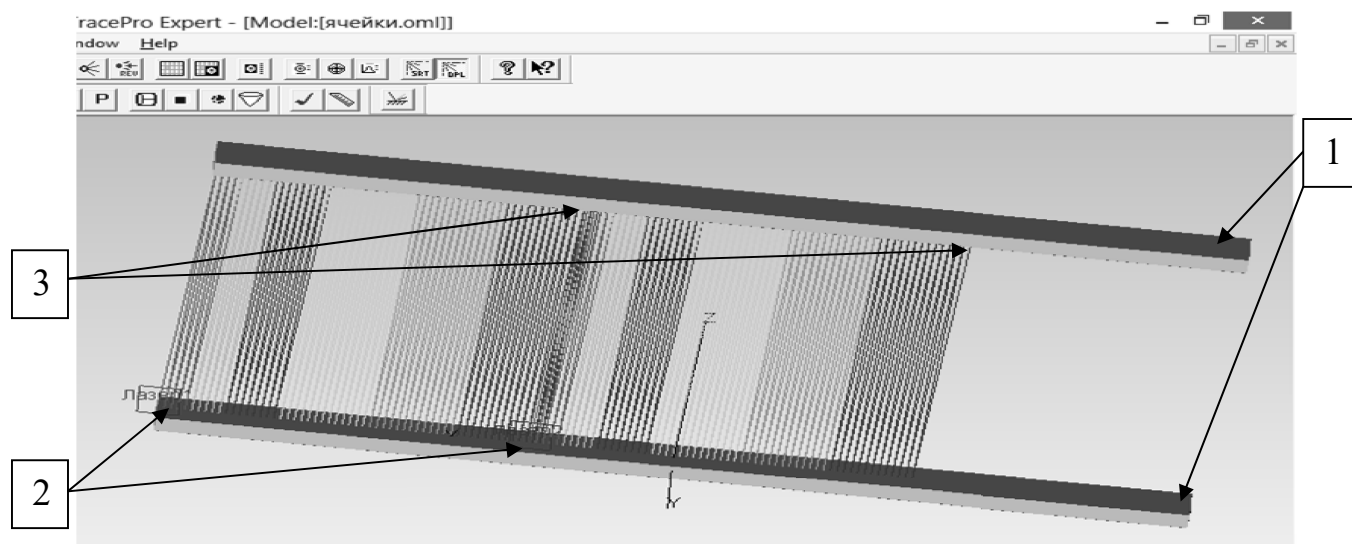


Рисунок 4.4 – Ход луча в ПСЗ при отражении от зеркального покрытия с коэффициентом отражения 98% и наличии двух источников в ячейистой структуре (1 – зеркальные поверхности, 2 – ИИ, 3 - ФП)

4.2 Моделирование взаимодействия световой завесы на зеркальной поверхности с микрочастицами, соизмеримыми с шириной луча

В реальных условиях невозможно избежать появления частиц пыли или иного космического мусора на поверхности зеркал. Поэтому для исследования взаимодействия ММ с лучом ПСЗ на поверхности одного из зеркал была смоделирована частица пыли размером 2 мкм (на 1 мкм больше диаметра луча), которая частично преломляет и частично отражает световой поток. Графическое отображение результатов моделирования представлено на рисунке 4.5.

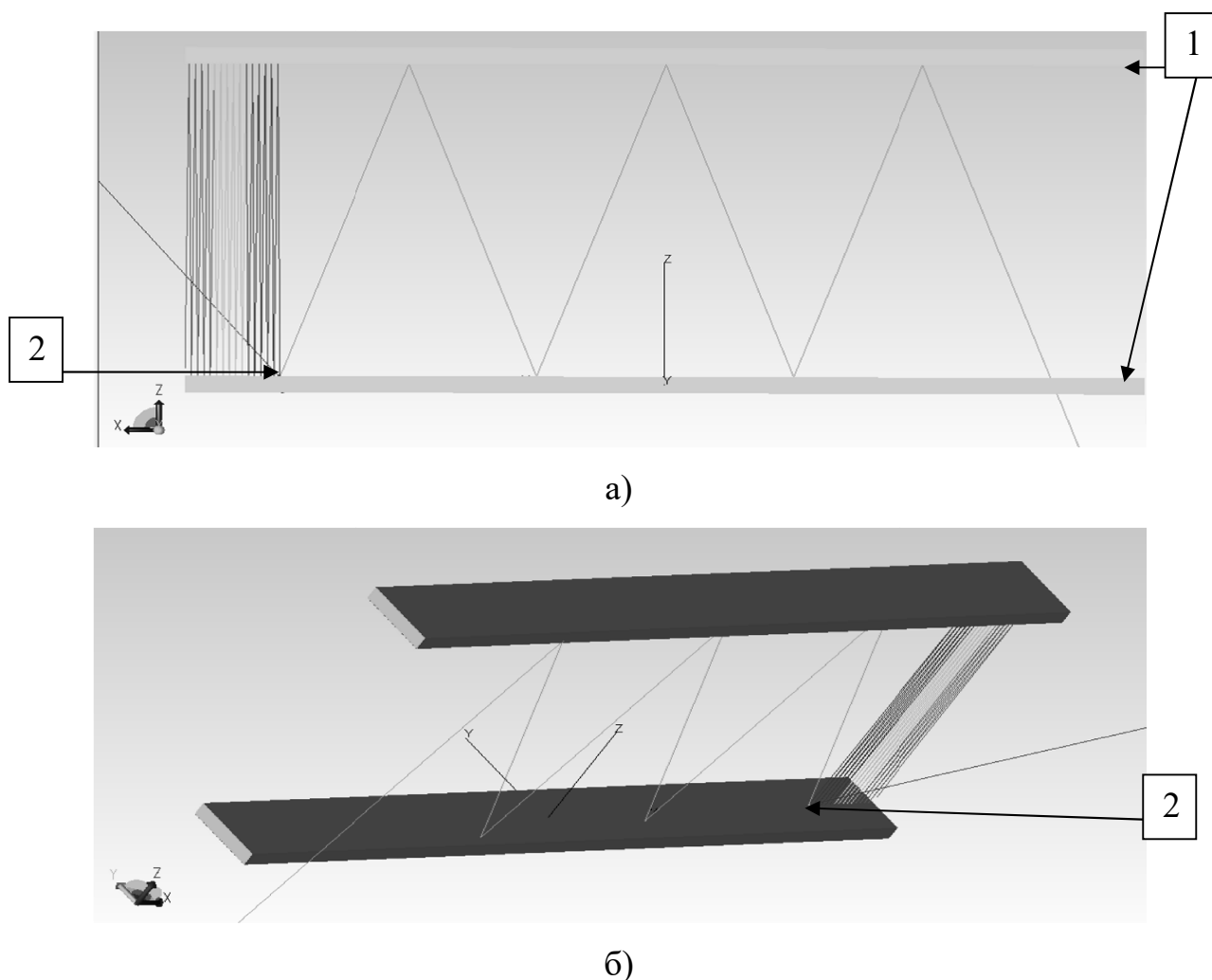


Рисунок 4.5 – Ход луча при наличии микрочастиц на поверхности зеркала (1– зеркальные поверхности, 2 – пылевая частица на зеркальной поверхности).

а) двумерное изображение, б) трехмерное изображение

Как видно из рисунка 4.5 – результат измерения искажается из-за смещения времени регистрации вследствие увеличения фонового излучения, вызванного преломлением и отражением луча от ММ, совмещенного с зеркальной поверхностью.

4.3 Экспериментальные исследования лабораторного макета БОЭ ИИС

4.3.1 Затухание оптического луча при отражении в системе из двух параллельных зеркал

При изготовлении лабораторного образца БОЭ ИИС одним из наиболее критичных параметров является затухание потока излучения, которое определяется коэффициентом отражения материала, из которого состоит отражающая поверхность.

Отражательные свойства некоторых материалов для инфракрасного диапазона излучения приведены в таблице 4.1 [114].

На основании [115] были сделаны выводы, о том что максимальный коэффициент отражения материалов составляет не более 99.2% и относится к серебряным покрытиям. При этом коэффициент отражения начинает значительно уменьшаться при температурах эксплуатации более 100 С. Как следует из рисунка 4.6. наиболее стабильный коэффициент отражения в условиях различных температур, характерных для изделий ракетно-космической техники, имеет полированный алюминий, максимальное значение коэффициента отражения которого составляет 90 %.

Рассмотрены возможные варианты применения полупроводниковых лазеров различных диапазонов длин волн и различного уровня мощности. Ограничением является чувствительность светодиода на приемной стороне оптической системы. На рисунке 4.7 представлена зависимость выходной мощности от числа отражений лазерного луча для различных типов материалов (при входной мощности 30 мВт, для инфракрасного излучения). Здесь: зависимости мощности на входе приемника для оптической системы,

построенных на зеркалах, изготовленных, соответственно, из серебра – 1, и алюминия – 3.

Таблица 4.1 – Виды материалов и значения коэффициентов отражения

Материал	Коэффициент отражения, для длины волны 0,5 мкм, %	Коэффициент отражения, для длины волны 5 мкм, %
Cu	63.2	98.9
Ag	95.5	99.2
Au	68.8	98.95
Zn	-	97.9
Al	91.4	98.2
Sn	80.5	96.2
Pb	62.6	95
Ti	52.5	87.4
Nb	56	96.2
Fe	63.7	90.8
Co	65.9	92.8
Ni	61.6	94.8
Pt	65.7	93.7

Максимальное допустимое количество отражений излучения луча ЛД от зеркальных пластин, после которого возможно зафиксировать сигнал в ФД, определяется выражением:

$$N_{\text{отрmax}} = \log_{k_{\text{отр}}} \left(\frac{P_{\text{ФДпор}}}{P_{\text{ЛД}}} \right), \quad (4.2)$$

где $k_{\text{отр}}$ – коэффициент отражения материала зеркальных пластин;

$P_{\text{ЛД}}$ – мощность излучения ЛД;

$P_{\text{ФДпор}}$ – порог чувствительности ФД.

Зададимся значением порога чувствительности фотодиода $P_{\text{ФДпор}}=0.039$ мВт [4]. Исходя из начального условия $P_{\text{ЛД}} = 30$ мВт, (4.2), в соответствии с

(4.2) получим максимальное допустимое число отражений $N_{\text{отрmax}} = 107$, после которых уровень потока излучения будет достаточным для получения информации. При этом необходимо учитывать изменения свойств материалов от температуры окружающей среды. На рисунке 4.7 показаны изменения коэффициента отражения зеркальных поверхностей из наиболее распространённых материалов от температуры [64]

На рисунке 4.6 приведены примеры зависимостей значения мощности излучения ЛД с $P_{\text{ЛД}} = 30$ на входе ФД после числа $N_{\text{отр}}$ отражений от материала из алюминия анодированного и полированного с $k_{\text{отр}} = 0,95$ (кривая 1) и из чистого алюминия с $k_{\text{отр}} = 0,993$ (кривая 3).

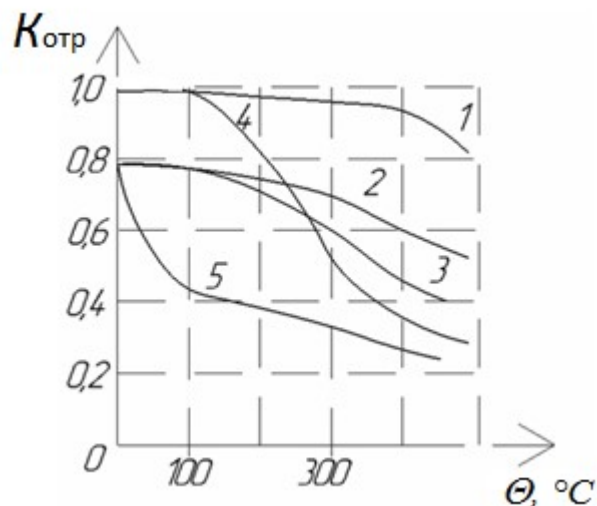


Рисунок 4.6 – Зависимость коэффициента отражения для различных материалов в зависимости от температуры (1 – алюминий анодированный и полированный, 2 – хромовое покрытие, 3 – алюминий чистый, 4 – серебряное покрытие, 5 – медь)

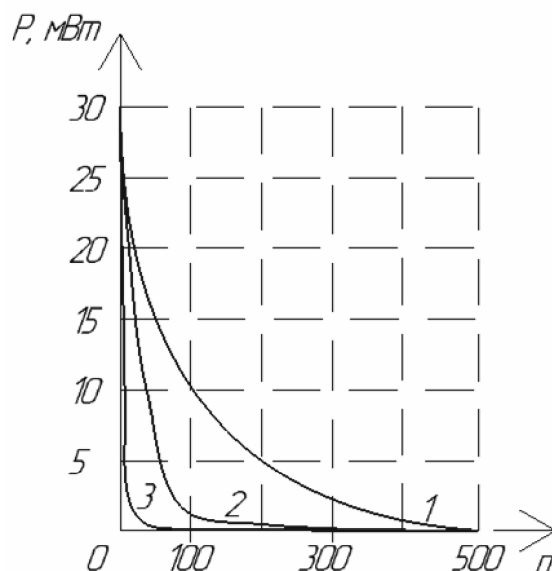


Рисунок 4.7 – Зависимость мощности излучения ЛД на входе ФД от количества отражений

Если для увеличения максимально допустимого числа отражений увеличить мощность лазерного излучения до 1 Вт, то получим $N_{\text{отрmax}} = 164$ и $N_{\text{отрmax}} = 502$ для коэффициентов отражения $k_{\text{отр}} = 0,95$ и $k_{\text{отр}} = 0,993$ соответственно. Длина световой завесы при $k_{\text{отр}} = 0,993$ составляет $l = N_{\text{отрmax}} \cdot d_{\text{ЛД}} = 502 \cdot 10 = 5020$ мкм, то есть не более 5,02 мм.

Увеличения количества отражений и длины световой завесы, соизмеримой с ее высотой (10-15 мм) можно достичь следующими путями:

- увеличение мощности входного сигнала;
- увеличение длины волны излучения;
- использование материалов с большим коэффициентом отражения;
- увеличение чувствительности ФП.

4.3.2 Ограничения, накладываемые параметрами источников и приемников оптического излучения

Поскольку размеры и скорости исследуемых объектов для наиболее экстремальных случаев известны из [65], необходимо рассмотреть

ограничения, накладываемые на характеристики рабочих элементов (лазерного излучателя и фотодиода).

Для обеспечения требуемой разрешающей способности должно выполняться условие:

$$\gamma(d) > \arctg\left(\frac{2l}{d}\right),$$

где l – высота завесы;

d – диаметр луча ЛД.

Другим ограничением является быстродействие фотодиода. Параметры требуемого быстродействия устройства определяются предельными значениями максимальной скорости и минимального размера регистрируемых микрометеороидов:

$$T_{\text{ФДmin}} = \frac{D_{\text{min}}}{V_{\text{max}}} \quad (4.3)$$

где $T_{\text{ФДmin}}$ – быстродействие ФД в секундах;

D_{min} – минимальный линейный размер регистрируемого ММ;

V_{max} , км/с – максимальная скорость регистрируемого ММ.

На рисунке 4.8 представлены полученные зависимости требуемого быстродействия от скорости исследуемого объекта для значений размеров микрочастиц 100 мкм и 500 мкм) [31].

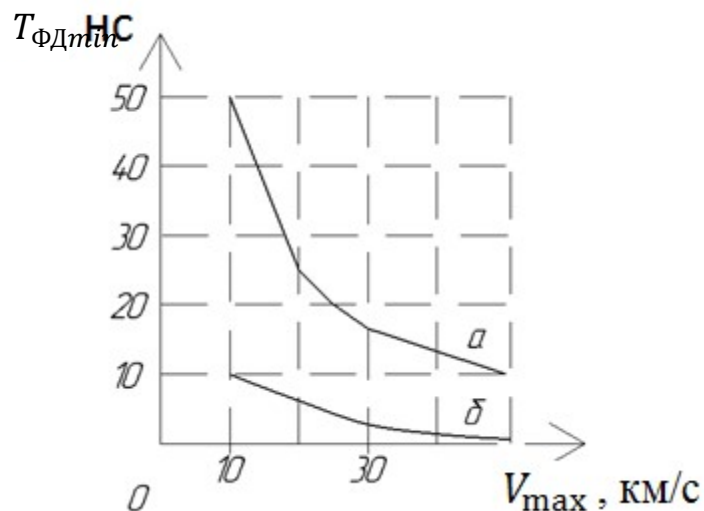


Рисунок 4.8 – Зависимость требуемых параметров быстродействия элементов от размеров и скорости исследуемых микрочастиц (а - для значения линейного размера частицы 20 мкм, б - для значения линейного размера частиц 10 мкм)

Для большинства микрометеороидов, представляющих опасность для систем космических аппаратов и требующих изучения, типовое быстродействие известных оптоэлектронных радиоэлементов [116] достаточно для построения системы определения параметров движения микрометеороидов.

В таблице 4.2 представлены количественные значения быстродействия фотодиодов, требуемые для определения скорости движения микрометеороидов.

Таблица 4.2 – Количественные значения требуемых параметров быстродействия

Размер частиц	Скорость микрометеороидов, км/с				
	10	20	30	40	50
	Требуемое быстродействие, пс				
Для частиц размером 10 мкм	1000	500	330	250	200
Для частиц размером 20 мкм	2000	1000	660	500	400

4.4 Экспериментальные исследования лабораторного макета ОЭБ ИИС на основе лучей светодиодов

На рисунке 4.9 представлен внешний вид измерительной части лабораторного макета БОЭ ИИС для измерения параметров скорости частиц, имитирующих низкоскоростные крупноразмерные микрометеороиды.

В таблицах 4.3, 4.4, 4.5 и 4.6. приведены результаты измерения выходных параметров различных фотоэлементов, из которых видно, что освещение в помещении оказывают значительное влияние на результаты измерений. Поэтому лабораторный макет ИИС был оснащен

дополнительным каркасом для защиты фоточувствительных элементов от фоновой засветки.



Рисунок 4.9 – Лабораторный макет ЗРМ БОЭ ИИС определения скорости движения имитаторов ММ

Лабораторный макет БОЭ ИИС содержит:

- металлический каркас, который является несущей конструкцией (1);
- светодиодная ячеистая структура (световой поток на 1 м – 405 Лм) (2);
- фотоэлементы (3);

Таблица 4.3 – Выходные данные фотодиодов

Наименование	Напряжение на элементе при включенном свете и выключенной установке, В	Напряжение на элементе при включенном свете и включенной установке, В	Напряжение на элементе при выключенном свете и выключенной установке, В	Напряжение на элементе при выключенном свете и включенной установке, В
ВРW41	0.226	0.232	0.001	0.036
ВРW34	0.285	0.321	0.001	0.398

Таблица 4.4 – Выходные данные фоторезисторов

Наименование	Сопротивление на элементе при включенном свете и выключенной установке, Ом	Сопротивление на элементе при включенном свете и включенной установке, Ом	Сопротивление на элементе при выключенном свете и выключенной установке, Ом	Сопротивление на элементе при выключенном свете и включенной установке, Ом
ФР-765	1620	602	> 20 МОм	1182
ФР-764	1800	750	> 20 МОм	1441

Таблица 4.5 – Выходные данные фотодиода

Наименование	Напряжение на элементе при включенном свете и выключенной установке, В	Напряжение на элементе при включенном свете и включенной установке, В	Напряжение на элементе при выключенном свете и выключенной установке, В	Напряжение на элементе при выключенном свете и включенной установке, В
ВРW34	0.12	0.342	0,001	0,34

Таблица 4.6 – Выходные данные фоторезистора

Наименование	Сопротивление на элементе при включенном свете и выключенной установке, Ом	Сопротивление на элементе при включенном свете и включенной установке, Ом	Сопротивление на элементе при выключенном свете и выключенной установке, Ом	Сопротивление на элементе при выключенном свете и включенной установке, Ом
ФР-765	> 20 МОм	780	> 20 МОм	720

По результатам оценки регистрации пролета исследуемого объекта были получены результаты измерений, представленные на рисунках 4.10 и 4.11.

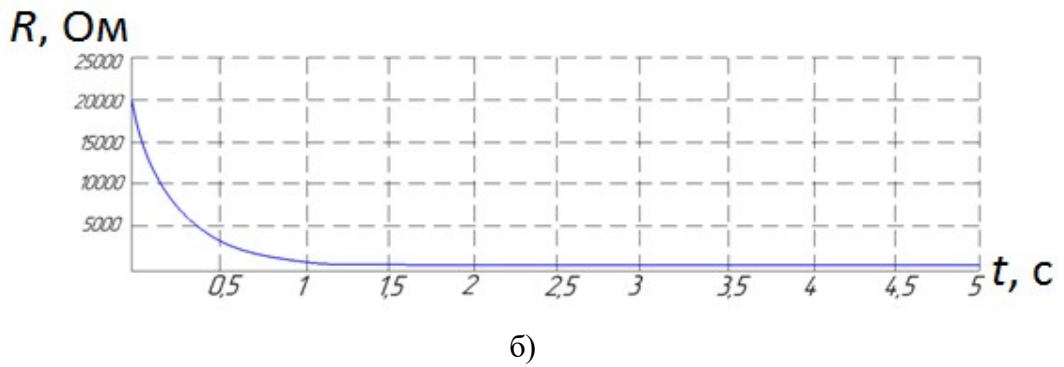
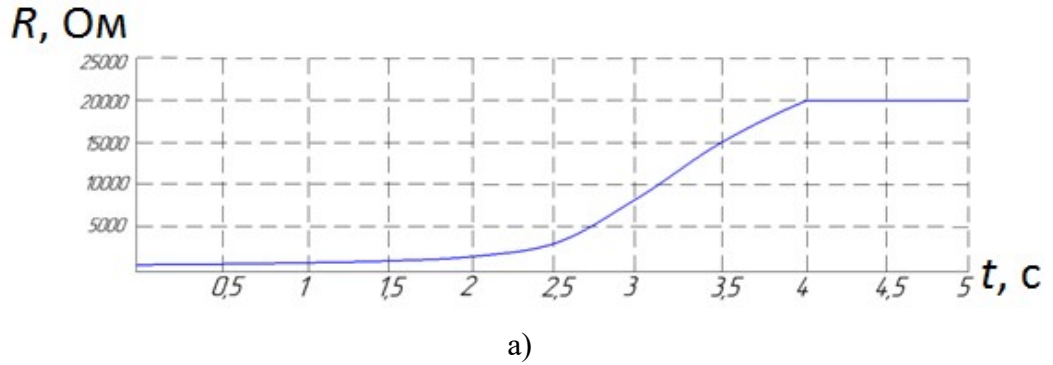


Рисунок 4.10 – Результаты измерений сопротивления на фоторезисторе при пролете объекта: а) при движении объекта в области светодиод-фототранзистор, б) восстановление сопротивления после пролета объекта.

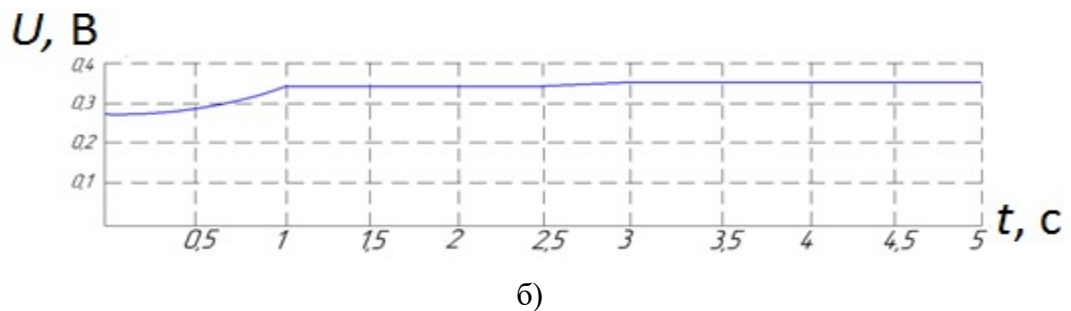
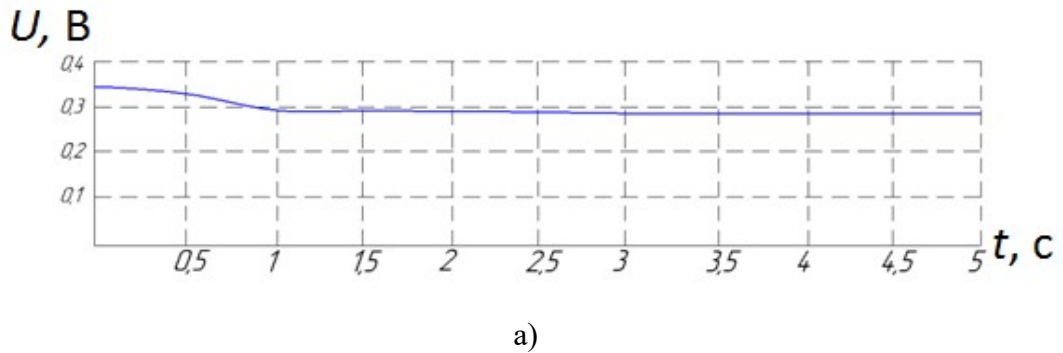


Рисунок 4.11 – Результаты измерений напряжения на фотодиоде при пролете объекта: а) при движении объекта в области светодиод-фотодиод, б) восстановление напряжения после пролета объекта

Как видно из представленных данных при наличии системы защиты ФП от фонового излучения оно практически не оказывает влияния на результаты измерений, а время восстановления сопротивления фоторезистора значительно выше времени восстановления напряжения на фотодиоде. В проведенном эксперименте подтвердился факт влияния быстродействия ЭКБ на результаты измерений. При отсутствии защиты необходимо применять изложенные в 3.5 способы и средства автокомпенсации погрешности, вызванной фоновым излучением.

4.5 Экспериментальное исследование лабораторного макета ОЭБ ИИС на основе лучей лазерных диодов

Макет представляет собой ИИС (рисунок 4.12), содержащую:

- две зеркальные поверхности (1);
- металлический каркас, который является несущей конструкцией с возможностью регулировки в 4 положениях (положение зеркальных поверхностей установки регулируется с помощью лазерного уровня) (2);
- лазерная установка (TYLaser 303, выходная мощность 100 мВт, длина волны 532 нм);
- фотоэлементы;

В разделах 1 и 3 обоснована необходимость проведения начальной и периодической юстировки ЗРМ. На макете БОЭ ИИС проведен эксперимент по юстировке ПСЗ с применением помощью лазерного уровня с погрешностью 3° . На рисунке 4.13 показан выход луча за пределы ПСЗ при нарушении угловой юстировки зеркал.

Результаты эксперимента показывают необходимость уменьшения погрешности юстировки положения отражающих поверхностей с увеличением размеров ПСЗ. Для оценки требуемой погрешности юстировки разработан и создан лабораторный макет завесы на основе лазерных дисков.

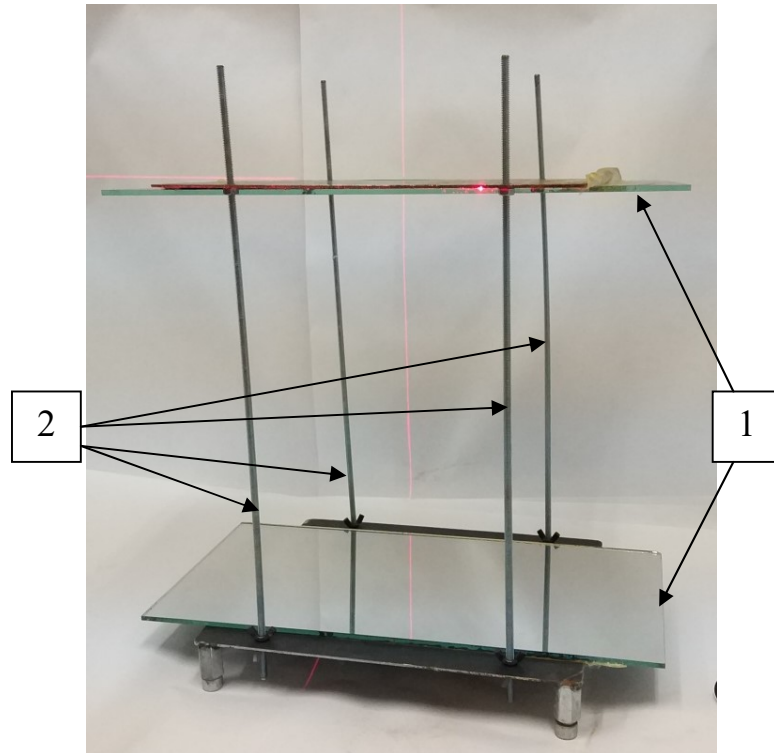


Рисунок 4.12 – Макет устройства на основе лазерного диода
1 – зеркала, 2 – стойки для юстировки зеркал

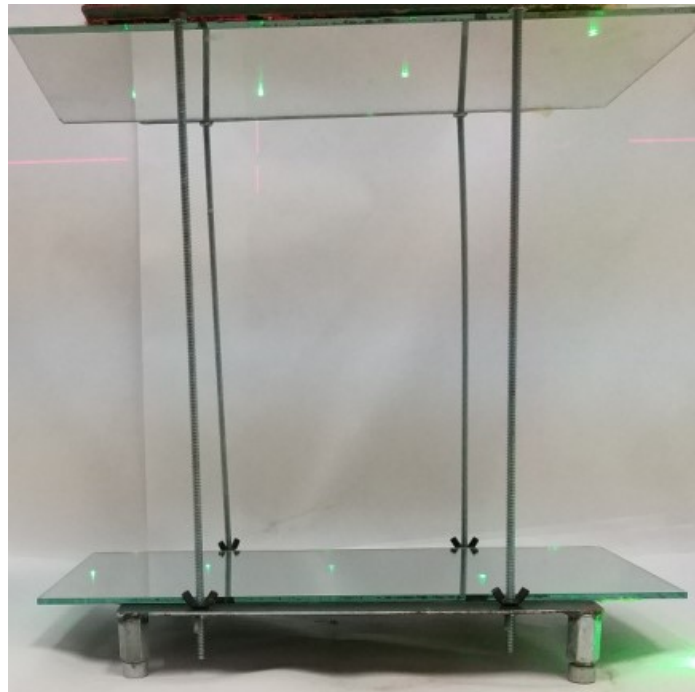


Рисунок 4.13 – Эксперимент с юстировкой зеркал

На рисунке 4.14 представлен вариант устройства, в котором удалось достичь девяти отражений, создав световую завесу общей длиной рабочей зоны 50 мм.

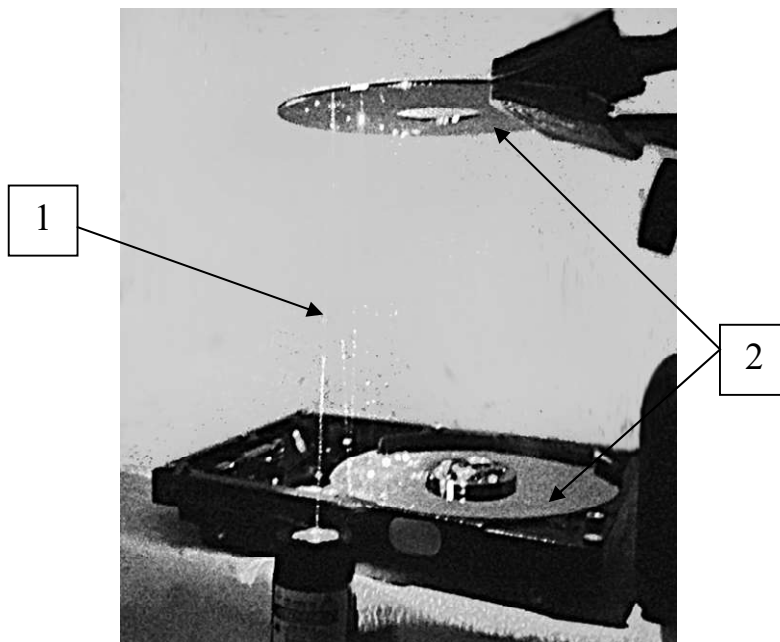


Рисунок 4.14 – Световая завеса, построенная на основе лазерных дисков:

1 – модель световой завесы, 2 – зеркальное покрытие на основе оптического диска

На рисунке 4.15 представлен полный комплект лабораторного макета БОЭ ИИС на основе лазерных дисков.

В ходе создания каждого макета использовался лазерный уровень для юстировки каждой составляющей устройства, а также электронный угломер для регистрации угла наклона лазера. С целью измерения временных отметок используется двухканальный осциллограф. Фотодиоды располагаются на макетной плате для их надежной фиксации. В результате эксперимента получены статистические данные по факту регистрации пролетающего объекта, соответствующие теоретическим.

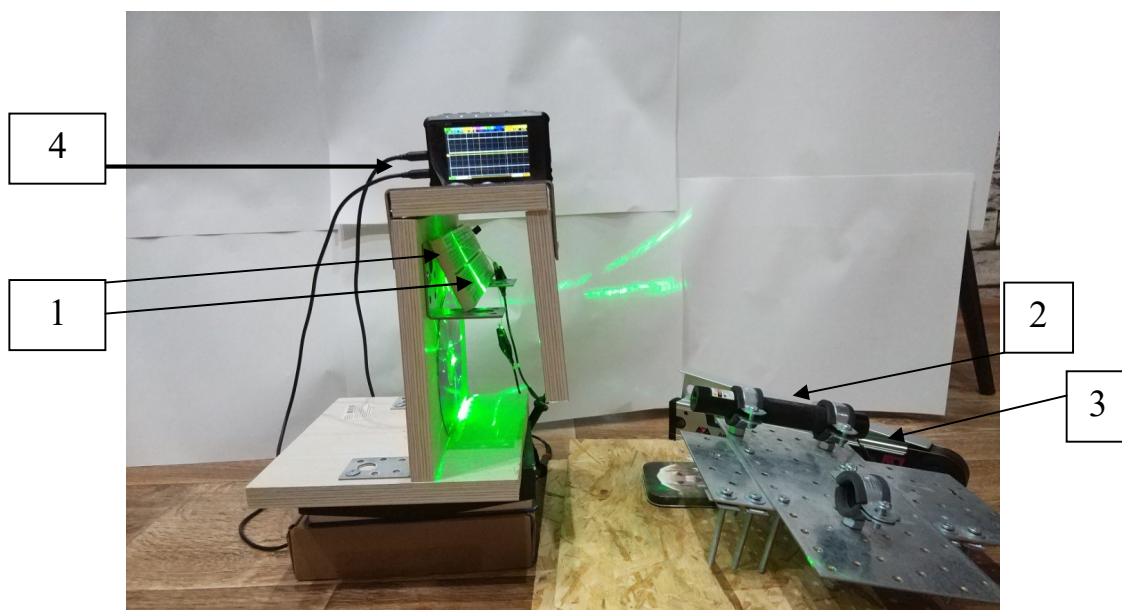


Рисунок 4.15 – Макет устройства на основе лазерных дисков
 1) фотодиоды, 2) TYLaser 303, 3) угломер, 4) двухканальный осциллограф DS203

В ходе выполнения экспериментальной работы в качестве объекта исследования выступали пули пневматического пистолета Stalker S92PL (берета) [117]. В соответствии с техническими характеристиками скорость пули составляет до 120 м/с. По результатам эксперимента с двумя световыми плоскостями на расстоянии 30 см (возможно измерить только объект, пролетающий под углом 90° к световой завесе) измерены скорости исследуемого объекта (см. таблицу 4.5) от 90 до 110 м/с. Учитывая что при проведении эксперимента отсутствовала возможность контролировать угол выстрела примем данный угол за 90 ± 10 .

Полученные результаты подтверждают возможность создания световых завес на основе многократного отражения лазерного луча для измерения скорости движения микрометеороидов.

Микрометеороид - это частички камня и металла, при этом в ходе эксперимента для их имитации использовались стальные и свинцовые пули. Допустимо считать, что экспериментальные образцы и реальные ММ обладают близкими свойствами при пересечении оптоэлектронной световой завесы.

Таблица 4.7 – Результаты измерения скорости с помощью макетного образца

№ образца	Скорость по ТТХ, м/с	Измеренная разница во времени пролета, мс	Измеренная скорость, м/с	Погрешность измерения, %
1	120	2,8	107,14	10,72
2	120	2,7	111,11	7,41
3	120	2,6	115,38	3,85
4	120	2,85	105,26	12,28
5	120	2,7	111,11	7,41
6	120	2,8	107,14	10,72
7	120	2,75	109,91	8,41
8	120	2,85	105,26	12,28

Относительная погрешность измерения скорости пули с помощью макетного образца составила 12,28 %. Теоретическое значение погрешности измерений с учетом всех временных задержек для примененных в эксперименте ЭКБ составляет 200 мкс, что в переводе на измерение скорости означает фактически возможные показания от 111,11 до 120 м/с. То есть теоретическое значение относительной погрешности составляет 7,4%. При этом применение современной ЭКБ позволяет достигать временных задержек до 300 пс, что будет способствовать уменьшению погрешности эксперимента до значения менее 1%.

Выводы по главе 4

1. Проведены исследования компьютерной и лабораторной моделей БОЭ ИИС скорости движения микрометеороидов (ММ) и их геометрических размеров.

2. Выявлена необходимость прецизионной (1–5 нм по расстоянию и 89,91–89,98 градусов по углу) юстировки взаимного положения и плоскостности зеркальных поверхностей и конструктивных элементов ИИС.
3. Для обеспечения заданных геометрических размеров плоскости световой завесы при ограниченной мощности источника излучения и пониженной отражательной способности зеркал целесообразно создавать ячеистую структуру из источников излучения и фотоприемников.
4. По результатам эксперимента подтверждена возможность измерения вектора скорости исследуемых объектов, погрешность измерения в условиях доступной компонентной базы и шероховатостей и неоднородностей примененных поверхностей составляет 12,28%, при этом расчетная погрешность измерений при условии применения современных дорогостоящих материалов и ЭКБ составляет менее 5÷8%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задачи, поставленные в диссертационном исследовании решены полностью. Теоретически обосновано и экспериментально доказано, что при использовании разработанной оптоэлектронной ИИС получения информации о параметрах движения микрометеороидов достигается снижение погрешностей измерения и расширяются функциональные возможности.

Предлагаемые методы позволяют увеличить зону регистрации параметров движения микрометеороидов, измерить с помощью светового потока параметры движения микрометеороидов (скорость, направление).

Для достижения поставленной в диссертации цели был решен ряд задач, а именно:

1. Произведен обзор и сравнительный анализ альтернативных методов измерения параметров движения микрометеороидов. Установлено, что эксперименты, связанные с применением бесконтактных методов измерения параметров движения микрометеороидов являются актуальными, в том числе и по информации из иностранной литературы. Проведен обзор методов измерения параметров движения микрочастиц. Показано, что оптические методы измерения являются одними из перспективных, ввиду возможности определения скорости и направления частиц без механического контакта с устройством.
2. Разработан принцип действия и структурная схема модифицированного двунаправленного времяпролетного метода измерения скорости.
3. Построены математические модели формирования плоских световых завес и зон регистрации микрометеороидов из групп плоских световых завес с различной взаимной пространственной ориентацией.
4. Разработана математическая модель взаимодействия зоны регистрации и микрометеороидов, основанная на измерении времени начала и конца

взаимодействия микрометеороидов и информационно-измерительной системы.

5. Произведен анализ погрешностей измерения вектора скорости, как методических, так и инструментальных, разработаны способы их компенсации, достигнуты практические значения погрешности до 12,5%, проанализированы теоретически возможные погрешности – в настоящее время с применением современной электронной компонентной базы возможно достичь погрешности менее 1%.

6. Разработан алгоритм самоконтроля работоспособности информационно-измерительной системы, основанный на тестовых сигналах, позволяющих определить необходимость юстировки системы.

7. Проведен лабораторный и вычислительный эксперименты - результатами подтверждена возможность измерения вектора скорости исследуемых объектов с применением юстировки взаимного положения конструктивных элементов ИИС и плоскостности зеркальных поверхностей с коэффициентом отражения не менее 98,5%.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АЦП – аналогово-цифровой преобразователь
- ББПП – блок беспроводных приемо-передатчиков
- БВО – блок вторичной обработки информации
- БВС – бортовая вычислительная система
- БКУ – бортовой комплекс управления
- БОД – блок обработки данных
- БОП – блок определения положения
- БСИ – блок сбора информации
- ВДФ – внешние дестабилизирующие факторы
- ВИП – вторичный источник питания
- ВУВ – виброударные воздействия
- ДК – диагностический контроль
- ЗРМ – зона регистрации микрометеороидов
- ИИС – информационно-измерительная система
- ИС – интегральные схемы
- КА – космический аппарат
- КМДП – комплементарные металл-диэлектрик-полупроводник
- КНС – кремний на сапфире
- ЛД – лазерный диод
- ЛЗ – линия задержки
- ЛС – лазерная система
- МДП – металл-диэлектрик-полупроводник
- ММ – микрометеороид
- МХ – метрологические характеристики
- ОЭБ ИИС – оптоэлектронная бесконтактная информационно-измерительная система
- ПДК – параметры допускового контроля

ПЗС – приемник с зарядовой связью

ПСЗ – плоская световая завеса

РК – радиоканал

СУ – сумматор

СУД – система управления движением

СУИИУ – система управления информационно-измерительным устройством

СУПК – система управления приводом крышки

ФД – фотодиод

ФП – фотоприемник

ЭКБ – электронная компонентная база

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Телегин, А.М. Детектор микрометеороидов и частиц космического мусора для малого космического аппарата «АИСТ-2» / А.М. Телегин, Н.Д. Семкин // Вестник СГАУ. – 2013. – №4 (42). – С. 261–263.
2. Балебанов, В.М. Описание и научные задачи международного проекта Венера-Галлей (1984–1986) / В.М. Балебанов, Г.А. Скуридин, Э.В. Воронцова / Международный научно-технический комитет по проекту Венера-Галлей. - 1984. – 259 с.
3. Сагдеев, Р.З. Пылевая оболочка кометы Галлея по данным прибора ПУМА / Р.З. Сагдеев, Е.Н. Евланов, Б.В. Зубков и др. // Космические исследования, т.ХХV, вып.6. – 1987. – С. 840–855.
4. Патент №2457986 Российская Федерация, МПК В64G 1/68, Датчик для регистрации и замера параметров метеороидных и техногенных частиц, межзвездной и межпланетной пыли, воздействующих на космический аппарат, 20111114041/11: заявл. 12.04.2011: опубл. 10.08.2012 / А.Н. Иванов, Н.Н. Иванов. – 2 с.
5. Патент №2454628 Российская федерация, МПК G01C 21/24 Устройство регистрации частиц космического мусора и микрометеороидов, заявл. 30.06.2011: опубл. 27.06.2012 / Е.Ю. Барышев, Н.Д. Семкин, В.В. Любимов, В.И. Абрашкин, А.М. Телегин, М.П. Калаев. – 4 с.
6. Патент №2610342 Российская федерация, МПК В64G1/68 Устройство для исследования потоков микрометеороидов и частиц космического мусора, заявл. 05.11.2015: опубл. 09.02.2017 / Н.Д. Семкин, А.М. Телегин. - 4 с.
7. Патент 2423726 Российская федерация, МПК G01T5/00 Детектор вектора скорости микрометеороидов, заявл. 11.01.2010: опубл. 10.07.2011, Н.Д. Семкин, А.М. Телегин, К.И. Вергунец, М.П. Калаев, М.В. Изюмов. - 4 с.

8. Патент № 1803350С, Российская федерация МПК G01Т/00 Детектор микрометеороидов, заявл. 30.11.1990: опубл. 23.03.1993, И.А. Королев, Ю.А. Сурков, В.В. Высочкин. – 3 с.
9. Dominguez, G., Passive detector technology for the capture of micrometeoroids and orbital debris, - Текст: электронный // сайт компании ESA. <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc4/paper/101> (дата обращения: 05.06.2017).
10. Дейрменджан, Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами / Д. Дейрменджан – Москва. М.: Мир, 1971. 165 с.
11. Thorpe, J. I. Detection and measurement of micrometeoroids with LISA Pathfinder / J.I. Thorpe, C. Parvini, J. M. Trigo-Rodríguez // astronomy and astrophysics. -2016. – P. 1–6.
12. Kuzcera, H. Acoustic penetration and impact detector for micrometeoroid and space debris application / Kuzcera H., Iglseider H., Weishaupt U., Igenbergs E. // trajectory determinations and collection of micrometeoroids on the space station, – 1985. – P. 64–67.
13. Weishaupt, U. Cosmic dust detection with large surface piezoceramics / U. Weishaupt // trajectory determinations and collection of micrometeoroids on the space station. – 1985, – P. 88–90.
14. Wortman, J. J . Capacitor type micrometeoroid detectors / J.J. Wortman D. P. Griffis, S. R. Bryan, W. Kinard, P. C. Kassel Jr. // trajectory determinations and collection of micrometeoroids on the space station, – 1985. – P. 94–97.
15. Патент №3805522А USA, МПК F01N3/222 Deployable pressurized cell structure for a micrometeoroid detector, заявл. 04.11.1971: опубл. 23.04.1974, W. Sheppard. – 26 с.
16. YANO Hajime Micrometeoroid Detection in the Inner Planetary Region by the IKAROS-ALADDIN / Hajime YANO, Takayuki HIRAI, Chisato

OKAMOTO, Masayuki FUJII, Makoto TANAKA // Cambridge University Press, - 2015, – 1 p.

17. Ren, Yugang Event-based imaging of levitated microparticles / Yugang Ren, Enrique Benedetto, Harry Borrill, Yelizaveta Savchuk, Molly Message, Katie O’Flynn, Muddassar Rashid and James Millen // applied physics letters, – 2022, A107 – 16 p.

18. Гейнц, Ю.Э. Временная динамика «фотонной струи от диэлектрической микрочастицы при облучении лазерным импульсом / Ю.Э. Гейнц, А.А. Землянов, Е.К. Панина // «Оптика атмосферы и океана», №12, – 2012, – С. 1028-1033.

19. Sasikumar, H. Tracking-free determination of microparticle motion from image variance - Текст: электронный // <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1904/1904.04594.pdf> (дата обращения 15.01.2019).

20. Moorhead, A. A meteoroid handbook for aerospace engineers and Managers / A. Moorhead, B. Cooke and others // Nasa. – 2019. – 1 p.

21. Изюмов, М.В. Устройства регистрации частиц космического мусора и микрометеороидов: автореферат / М.В. Изюмов – Самара, 2011, - 16 с.

22. Захарченко, В.М., Измерение скорости потока лазерным однолучевым время-пролетным методом / В.М. Захарченко // ученые записки ЦАГИ. том VI. №2. – 1975. – С. 147–151.

23. Ye, Z., Measurements of particle size distribution based on mie scattering theory and Markov chain inversion algorithm / Z. Ye // Journal of software. vol.7. – no.10. -2012. – P. 2309–2316.

24. Wang, W. High-speed micro-particle motion monitoring based on continuous single-frame multi-exposure technology / W. Wang, W. Xue and others // MDPI. – 2022. – 26 p.

25. Патент 2505462 Российская федерация, МПК В64G 1/68 Н.Н. Бортовой измерительный модуль для улавливания, сбора, регистрации и измерения

параметров метеороидных техногенных частиц, межзвездной и межпланетной пыли, а также регистрации ионизирующего излучения, воздействующих на космический аппарат и планетоход-ровер, заявл.22.06.2012: опубл. 27.01.2014, Иванов, А.Н. Иванов.

26. Патент 11.079.478 B2 USA, МПК G01S7/4865 Optoelectronic sensor and method for measuring a distance, patent US, заявл.10.07.2018: опубл. 17.01.2019, D. Perenzoni, D. Stoppa and others.

27. W02021011469A1 USA, МПК G01S17/08 Microsecond time of flight (MTOF) sensor, заявл.13.07.2020: опубл. 21.01.2021, J. Bench.

28. Патент US20200309955A1 USA, МПК G01S17/89 Time-of-flight sensing using an addressable array of emitters, заявл.18.12.2017: опубл. 01.10.2020, A. Laflaquière, M. Drader.

29. Scharnowski, S., Kähler, C.J. Particle image velocimetry – classical operating rules from today’s perspective – Текст: электронный // <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816619318287> (дата обращения 10.12.2020).

30. Патент US20220171038A1 МПК G01S7/4865 Multichannel time-of-flight measurement device with time-to-digital converters in a programmable integrated circuit, заявл. 29.11.2021: опубл. 02.06.2022, R. Wohlenannt, R. Koller and others.

31. 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.

32. 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

33. 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.
34. 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
35. 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.
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. 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.

40. 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.

41. Щелоков, Е.А. Фотоэлектронный 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.

42. 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.

43. 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.

44. 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.

45. Патент №2 699 575 С1 Российская федерация, МПК H04W48/20 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.

46. Беззапросные квантово-оптические системы контроля и передачи шкал времени ГЛОНАСС – Текст: электронный // http://vestnik-glonass.ru/news/tech/bezzaprosnye_of_quantum_optical_systems_of_control_and_transfer_of_time_scales_glonass_ (дата обращения 08.10.2016).
47. Космические снимки, Сайт Геоаналитика. Агро. – Текст: электронный // http://agro.geoanalitika.com/ru/products/kosmicheskie_snimki/ (дата обращения 12.07.2016).
48. LS5 – Лазерный триангуляционный датчик положения, сайт научно-производственного предприятия «Призма» – Текст: электронный // <http://prizmasensors.ru/ls5-triangulyacionnyj-lazernyj-datchik/> (дата обращения 10.08.2016).
49. Промышленные бесконтактные лазерные выключатели, Сайт CyberLeninka. Текст: электронный // <https://cyberleninka.ru/article/n/promyshlennye-beskontaktnye-lazernye-vyklyuchateli> (дата обращения 12.08.2016).
50. Исследование лазерного акустооптического датчика для измерения смещения границы детали, Сайт Cyberleninka. Текст: электронный // <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-lazernogo-akustoopticheskogo-datchika-dlya-izmereniya-smescheniya-granitsy-detali> (дата обращения 12.08.2016).
51. Либенсон, М.Н. Взаимодействие лазерного излучения с веществом / М.Н. Либенсон, Е.Б. Яковлев, Г.Д. Шандыбина / конспект лекций под редакцией В.П. Вейко – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2008. – 141 с.
52. Тимченко, Е.В. Оптика лазеров / Е.В. Тимченко / электронное учебное пособие. – Самарский государственный аэрокосмический университет, 2013. – 134 с.
53. Виглеб, Г. Датчики. Устройство и применение / Г. Виглеб / – М.: Мир, 1989 – 196 с.

54. Гришанов, В.Н. Современные лазерные измерительные системы в производственном цикле космической техники / В.Н. Гришанов, А.А. Ойнонен // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – Т.32, №1. – С. 24-35.
55. Русинов, М.М. Техническая оптика. / М.М. Русинов / Москва. – М.: Машиностроение 1979. – 488 с.
56. Карасик, В.Е. Лазерные системы видения/ В.Е. Карасик, В.М. Орлов. / Москва. – М.: МГТУ им. Баумана, 2001. – 352 с.
57. Лазерные датчики: что это такое, принцип работы, виды, для чего используется, Сайт Techtrends Текст: электронный // http://www.techtrends.ru/techdept/techarticles/lazernye_datchiki.php (дата обращения 20.06.2017).
58. Определение положения лазерным датчиком, Сайт Texenergo Текст: электронный // <https://www.texenergo.com/blogs/opredelenie-polozheniya-lazernym-datchikom> (дата обращения 20.06.2017).
59. Бесконтактные датчики положения механизмов, Сайт Electricalschool. Текст: электронный // <http://electricalschool.info/main/drugoe/190-beskontaktnye-datchiki-polozhenija.html> (дата обращения 20.06.2017).
60. Вейко, В.П. Введение в лазерные технологии / В.В. Вейко, А.А. Петров, А.А. Самохвалов / конспект лекций по курсу «лазерные технологии» под редакцией В.П. Вейко – СПб:СПб ГУ ИТМО, 2018. – 161 с.
61. Рефлекторные датчики Сайт Meandr. Текст: электронный // <https://meandr.ru/datchik-opticheskij-reflektornye> (дата обращения 25.06.2017).
62. Фотоэлектрические датчики SICK, Сайт Sensorica Текст: электронный // <http://www.sensorica.ru/s1-3.shtml> (дата обращения 26.06.2017).
63. Металлооптика, Сайт Dic.academic. Текст: электронный // https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/1676/МЕТАЛЛООПТИКА (дата обращения 30.06.2017).

64. Электротехнические материалы, Сайт Books.google/. Текст: электронный // https://books.google.ru/books?id=mqI2DwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (дата обращения 30.09.2017).
65. Алюминиевые покрытия, Сайт Electrosteklo Текст: электронный // http://www.elektrosteklo.ru/A1_rus.htm (дата обращения 30.10.2017).
66. Защита от пылевой плазмы, Сайт Самарского аэрокосмического университета. Текст: электронный // http://aist.ssau.ru/docs/rc_05_2013.pdf (дата обращения: 20.10.2014).
67. TracePro product information, Сайт <https://www.lambdares.com>. Текст: электронный // <https://www.lambdares.com/support/tracepro-product-info> (дата обращения 25.08.2019).
68. Коэффициент излучения, Сайт Optima Tools Текст: электронный // <https://analyztepla.ru/articles/2015-12-10/ko-ffitcient-izlucheniya> (дата обращения 20.06.2017).
69. Коэффициенты отражения видимого света для различных покрытий, цветов, материалов, Сайт Технические таблицы. Текст: электронный // <http://www.tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/LightAndColor/AbsortonRedjPrel/VisibleLightReflectionNoifert/> (дата обращения 20.06.2017).
70. Щелоков, Е.А. Применение технологий беспроводной передачи данных на изделиях ракетно-космической техники / Е.А. Щелоков, А.Н. Овсянников // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – №56. 2016. – С.144-148.
71. PTC, Datasheet, Creo Parametric, сайт PTC Текст: электронный // https://www.ptc.com/-/media/Files/PDFs/CAD/Creo_4/Datasheet-Creo_Parametric-en.pdf (дата обращения 20.01.2020).
72. Glasse Benjamin, Refractive indices of metal working fluid emulsion components/Benjamin Glasse, Alexander Zerwas, Roberto Guardani and Udo Fritsching// Meas. Sci. Technol. 25. – 2014. – 4 p.

73. Трофимов, А.А. Анализ и систематизация основных типов фотоэлектронных преобразователей, используемых при построении информационно-измерительных систем положения объектов / Трофимов А.А., Полина М.А., Гладков А.В. и др. // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 4, – С. 24–31.
74. Karasik, V.E. ed. Lazernye pribory i metody izmereniya dal'nosti / Karasik V.E. // Laser devices and methods for measuring range. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2012. 92 p.
75. Лебедько, Е.Г. Системы оптической локации, часть 3. Учебное пособие для вузов. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 110 с.
76. Якушенков, Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов / Ю.Г. Якушенков / М.: Советское радио, 1980. 380 с.
77. Конюхов, Н.Е. Оптоэлектронные измерительные преобразователи / Н.Е. Конюхов / Л.: Энергия, 1977. 160 с.
78. Порфирьев, Л.Ф. Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах / Л.Ф. Порфирьев / Л.: Машиностроение, 1989. 387 с.
79. Группировка Starlink, Текст: электронный // <https://naked-science.ru/article/tech/starlink-perchvat> (дата обращения 28.05.2022)
80. Оптические системы для уменьшения расходимости лазерного пучка, Теория оптических систем, Текст: электронный // https://scask.ru/e_book_tos.php?id=108 (дата обращения 15.04.2021).
81. РФЯЦ-ВНИИТФ, Росатом, Лазерные технологии, Текст: электронный // <http://vniitf.ru/data/marketing/laser/buklet%20volokonnii%20i%20tverdotelnie%20lazeri.pdf> (дата обращения 20.04.2021).
82. Лазер в космос, Текст: электронный // <https://www.techinsider.ru/science/1569031-100-gigabit-v-sekundu-lazernyy-sputnik-pobil-rekord-skorosti-peredachi-dannyh-iz-kosmosa-na-zemlyu/> (дата обращения 28.05.2022)

83. Аш, Ж. Датчики измерительных систем: В двух книгах. Кн. 1 / Ж. Аш и др. / Пер. с франц. М.: Мир, 1992. 480 с.
84. Gong, Z. Radiation reascion as an energy enhancement mechanism for laser-irradiated electrons in a strong plasma magnetic field / Z. Gong, E. Mackenroth, X.Q. Yan, A.V. Arefiev // Sci Rep 9, 1781 (2019), P. 1–11.
85. Вайнштейн, Л.А. Выделение сигналов на фоне случайных помех / Л.А. Вайнштейн, В.Д. Зубаков // М.: Сов. радио, 1960. 448 с.
86. Лазерные модули MVmicro line, Текст: электронный // <https://azimp.ru/catalogue/Laser-Diode-Modules1/319/> (дата обращения 15.04.2022)
87. Чудеса в плоских зеркалах, Текст: электронный // https://www.ng.ru/science/2004-05-19/15_mirror.html (дата обращения 20.03.2022)
88. Научная Россия, Текст: электронный // <https://scientificrussia.ru/articles/uchenye-eksperimentalno-dokazali-chto-ploskoe-zerkalo-mozhet-fokusirovat-svet> (дата обращения 21.03.2022)
89. Плоское зеркало заставили фокусировать свет, Текст: электронный // <https://indicator.ru/physics/ploskoe-zerkalo-fokusirovat-svet-25-05-2020.htm> (дата обращения 20.03.2022)
90. Зеркало для нанофокусировки рентгеновских лучей, Текст: электронный // https://www.rsci.ru/science_news/151455.php (дата обращения 20.03.2022)
91. Experimental observation of flat focusing mirror based on photonic jet effect, Текст: электронный // <https://www.nature.com/articles/s41598-020-65292-7> (дата обращения 20.03.2022)
92. Хирургические лазеры (обзор), Текст: электронный // https://lor-rostov.ru/files/357/obzor_lazero.pdf (дата обращения 15.04.2022)

93. Быстродействующий фотодиод PD24-010-HS, Текст: электронный // http://www.ibsg.ru/PDF_Data/PD24-005-HS_RU.pdf (дата обращения 15.04.2020).
94. Беспалов, В.Г. Фемтосекундная оптика и фемтотехнологии / В.Г. Беспалов, С.А. Козлов, В.Н. Крылов, С.Э. Путилин / Министерство образования и науки российской федерации, Санкт-петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, учебное пособие, Санкт-Петербург, 2010, 234 с.
95. RP Photonics Encyclopedia, Frequency-resolved optical gating, Текст: электронный // <https://www.rp-photonics.com/frequency-resolved-optical-gating.html> (дата обращения 20.05.2021).
96. Fuji Takao. Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction of synchrotron radiation / Takao Fuji // physics. optics, P. 1-7.
97. Справочник, надежность электрорадиоизделий, 2006, сайт Chipinfo.pro. Текст: электронный // [https://chipinfo.pro/books/Reliability_\(2006\).pdf](https://chipinfo.pro/books/Reliability_(2006).pdf) (дата обращения 15.10.2015).
98. Леонович, Г.И. Согласование энергетических и пространственных оптоэлектронных цифровых преобразователей перемещения, Текст: электронный // <http://www.microsystems.ru/files/publ/473.htm> (дата обращения 20.08.2022).
99. Патент №2322680С2 Российская федерация, МПК G01P3/64 способ измерения скорости линейного перемещения объекта, заявл.14.12.2005: опубл.27.06.2007, Михайлов А.А. и др., – 20 с.
100. Патент №2488861 Российская Федерация, МПК G02B 27/09, H01S 3/10, Способ изменения диаметра перетяжки выходного лазерного пучка на фиксированном расстоянии от лазера: заявл. 29.06.2012: опубл. 27.07.2013 / Пахомов И.И., Григорьянц А.Г. и др.. – 10 с.
101. Моделирование индикатрис рассеяния лазерного излучения малыми сферическими поглощающими частицам / Сапронов М.В., Скорнякова Н.М.

// Материал конференции: "Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению "Графикон", №29, 2019, С. 99–103.

102. Беспрозванных, А.В. Радиационная стойкость кабелей внутренней прокладки общепромышленного применения / А.В. Беспрозванных // Электроника и электромеханика, №3, 2006, С. 82–86.

103. Вяткин, М.Ю. температурная зависимость длины волны излучения волоконного лазера / М.Ю. Вяткин // Квантовая электроника, №35, 2005, С. 323-327.

104. Анализ проблемы обеспечения герметичности изделий, Текст: электронный // https://studme.org/204094/bzhd/analiz_problemy_obespecheniya_germetichnosti_izdeliy (дата обращения 20.02.2021).

105. Воздействие глубокого вакуума на элементы конструкции КА. Особенности выбора конструкционных материалов с учетом их работы в условиях глубокого вакуума, Текст: электронный // https://studref.com/700801/tehnika/vozdeystvie_glubokogo_vakuuma_elementy_konstruksii_osobennosti_vybora_konstruksionnyh_materialov_uche (дата обращения 15.03.2021).

106. Пластичность металлов при низких температурах, Текст: электронный // <https://stal-kom.ru/plastichnost-metallov-pri-nizkikh-temperaturakh> / (дата обращения 20.03.2021).

107. Радиационные дефекты в твердом теле под воздействием потоков ускоренных заряженных частиц (часть 1), Текст: электронный // https://portal.tpu.ru/SHARED/b/BGA/bio/masters/Tab2/Rad_def_part1.pdf (дата обращения 15.04.2021).

108. Радиационная стойкость электронных приборов, Текст: электронный // https://studme.org/83201/tovarovedenie/radiatsionnaya_stoykost_elektronnyh_priborov (дата обращения 15.04.2021).

109. Леонович, Г. И. Оптоэлектронные цифровые датчики перемещений для жестких условий эксплуатации / Г.И. Леонович /. Самара, 1998. 264 с.

110. Нойкин, Ю.М. Физические основы оптической связи электронное учебное пособие / Ю.М. Нойкин, П.В. Махно / Министерство образования и науки российской федерации федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет», учебное пособие, Ростов на Дону: Южный федеральный ун-т. – 2011,-143С
111. Борен, К., Поглощение и рассеяние света малыми частицами / К. Борен, Д. Хафмен / Пер. с англ.- М.: Мир, 1986. – 664 с.
112. Ван де Хюлст, Г., Рассеяние света малыми частицами / Г. Ван де Хюлст / Издательство иностранной литературы 1961 г.
113. Бернштейн, С.Н. Теория вероятностей. / Бернштейн С.Н. / М.: Гостехиздат, 1946. – 320 с.
114. Коэффициенты отражения видимого света для различных покрытий, цветов, материалов, Сайт Технические таблицы. Текст: электронный // <http://www.tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/LightAndColor/AbsortonRedjPrel/VisibleLightReflectionNoifert/> (дата обращения 20.06.2017).
115. Металлооптика, Сайт Dic.academic. Текст: электронный // https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/1676/МЕТАЛЛООПТИКА (дата обращения 30.06.2017).
116. Российский процессор Эльбрус-8С, Текст: электронный // [https://itint.ru/market/goods/rossiyskiy_protessor_elbrus_8s/#:~:text=Микропроцессор%20Эльбрус-8С%20\(1891ВМ028\)%20—%20высокопроизводительный,28%20нм%2С%20позволяющим%20снизить%20энергопотребление](https://itint.ru/market/goods/rossiyskiy_protessor_elbrus_8s/#:~:text=Микропроцессор%20Эльбрус-8С%20(1891ВМ028)%20—%20высокопроизводительный,28%20нм%2С%20позволяющим%20снизить%20энергопотребление) (дата обращения 20.04.2021)
117. Пневматический пистолет Stalker S92pl2 (Beretta), Текст: электронный // <https://yandex.ru/video/preview/1036931932930395024> (дата обращения 20.04.2021).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ)

Математическая модель параметров движения микрометеороидов через ИИС на базе четырех световых завес

$$\frac{x}{w} = \frac{\left(y - \left((V * \zeta_1 * \cos(\alpha)) - 2(w \pm \Delta w) \right) * \operatorname{tg}(\varphi \pm \Delta\varphi) - V * \zeta_1 * \cos(\alpha) * \operatorname{tg}(\alpha) \right)}{(w \pm \Delta w) * \operatorname{tg}(\alpha)}$$

$$= \frac{\left(z - \left((V * \zeta_2 * \cos(\alpha)) - 2(w \pm \Delta w) \right) * \operatorname{tg}(\varphi \pm \Delta\varphi) - V * \zeta_2 * \cos(\alpha) * \operatorname{tg}(\alpha) \right)}{(w \pm \Delta w) * \operatorname{tg}(\alpha)} + \frac{b \pm \Delta b}{w \pm \Delta w}$$

(A1)

$$\zeta_1 = \frac{T3.1 + T3.2 - (T1.1 + T1.2) + \frac{n(H \pm \Delta H)(\sin(\varphi \pm \Delta\varphi) - 1)}{c \cdot \sin(\gamma \pm \Delta\gamma) \cdot \sin(\varphi \pm \Delta\varphi)}}{2}$$

$$\zeta_2 = \frac{T3.3 + T3.4 - (T1.3 + T1.4) + \frac{n(H \pm \Delta H)(\sin(\varphi \pm \Delta\varphi) - 1)}{c \cdot \sin(\gamma \pm \Delta\gamma) \cdot \sin(\varphi \pm \Delta\varphi)}}{2}$$

$$\frac{x}{w} = \frac{\left(y - \left((V * \zeta_3 * \cos(\alpha)) - 2(w \pm \Delta w) \right) * \operatorname{tg}(\varphi \pm \Delta\varphi) - V * \zeta_3 * \cos(\alpha) * \operatorname{tg}(\alpha) \right)}{(w \pm \Delta w) * \operatorname{tg}(\alpha)}$$

$$= \frac{\left(z - \left((V * \zeta_4 * \cos(\alpha)) - 2(w \pm \Delta w) \right) * \operatorname{tg}(\varphi \pm \Delta\varphi) - V * \zeta_4 * \cos(\alpha) * \operatorname{tg}(\alpha) \right)}{(w \pm \Delta w) * \operatorname{tg}(\alpha)} + \frac{b \pm \Delta b}{w \pm \Delta w}$$

(A2)

$$\zeta_3 = \frac{T3.1 + T3.2 - (T1.1 + T1.2) + \frac{(H \pm \Delta H)(\sin(\varphi \pm \Delta\varphi) - 1)}{c \cdot \sin(\varphi \pm \Delta\varphi)}}{2}$$

$$\zeta_4 = \frac{T3.3 + T3.4 - (T1.3 + T1.4) + \frac{(H \pm \Delta H)(\sin(\varphi \pm \Delta\varphi) - 1)}{c \cdot \sin(\varphi \pm \Delta\varphi)}}{2}$$

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{\frac{T2.1 + T2.2 - (T1.1 + T1.2)}{T4.1 + T4.2 - (T3.1 + T3.2)} - \sin(\varphi \pm \Delta\varphi)}{-\cos(\varphi \pm \Delta\varphi)} \right)$$

$$V = \frac{2L_1}{T2.1 + T2.2 - (T1.1 + T1.2)} \frac{1}{\cos(\alpha)}$$

T1.1, T1.2, T2.1, T2.2, T3.1, T3.2, T4.1, T4.2 – время факта пролета через «основную» первую и третью плоскости в прямом и обратном направлениях, с учетом погрешности ± 50 пс по каждой световой завесе;

T1.3, T1.4, T3.3, T3.4 – время факта пролета через первую и третью плоскости, расположенных перпендикулярно основным, в прямом и обратном направлениях, с учетом погрешности ± 50 пс по каждой световой завесе.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ)

Акты внедрения

Утверждаю

Первый заместитель генерального директора –
генеральный конструктор АО «РКЦ «Прогресс» –
начальник ЦСКБ



А.Д. Сторож

« 27 » 03. 2023 г.

Акт

внедрения результатов кандидатской диссертации Целокова Е.А.

Мы, представители АО «РКЦ «Прогресс», главный конструктор – начальник отделения 1500 Рясной Н.В., заместитель главного конструктора – заместитель начальника отделения 1500 Чикризов Ю.Д., начальник отдела 1507 Кунтушев Д.В., составили настоящий акт о том, что разработки Целокова Е.А., изложенные в его кандидатской диссертации, а именно:

1. Методика измерения параметров движения микрочастиц,
2. Алгоритм преобразования временных отметок в вектор скорости,
3. Научно обоснованные рекомендации применения для исследования метеоритных потоков микрочастиц,
4. Научно обоснованные рекомендации для предотвращения попадания микрочастиц в устройства космических аппаратов внедрены в производство при конструировании бортовой аппаратуры космических аппаратов.

Внедрение указанных результатов позволило улучшить надёжность и оптимизировать конструкцию бортовой аппаратуры космических аппаратов. Измерительная система прошла апробацию на стенде и допускается последующее внедрение на изделие.

Главный конструктор –
начальник отделения 1500

Н.В. Рясной

Зам. главного конструктора –
Зам. начальника отделения 1500

Ю.Д. Чикризов

Начальник отдела 1507

Д.В. Кунтушев



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
Самарского университета

/Гаврилов А.В.

« 03 » 05 2023г.

АКТ

о использовании результатов
диссертационного исследования в учебном процессе


Результаты диссертационного исследования Щелокова Е.А. по теме **«ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА БЕСКОНТАКТНОГО ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ДВУЛУЧЕВОГО ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕКТОРА СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ МИКРОМЕТЕОРОИДОВ»**, выполненного в Самарском государственном техническом университете (СамГТУ), использованы в учебном процессе Самарского университета на кафедре радиотехники на основании решения кафедры, протокол № 15 от «28» апреля 2023 г.

1. Структурная схема информационно-измерительной системы и методика формирования зоны регистрации микрометеороидов на основе групп разноракурсных плоских световых завес из спектрально разнесенных парных встречно-параллельных лазерных лучей, многократно отраженных парными параллельными зеркальными плоскостями, отличающаяся от известных методик и информационно-измерительных систем возможностью измерять координаты прерывания микрометеороидом лазерных лучей;


2. Алгоритм самоконтроля работоспособности информационно-измерительной системы, отличающийся введением тестового прерывания лазерного луча.

Указанные результаты включены в курс «Устройства преобразования информации в радиотехнических системах», направления подготовки «Радиоэлектронные системы и комплексы» 11.05.01.

Заведующий кафедрой
д.т.н., профессор

 / А.И. Данилин
« 03 » 05 2023г.

Соискатель ученой степени

 / Е.А. Щелоков
« 3 » 05 2023г.

Начальник методического отдела
учебно-методического управления
к.т.н., доцент

 / Р.А. Вдовин
« » 2023г.

Начальник отдела сопровождения
научных исследований
к.т.н., доцент

 / Л.В. Родионов
« 03 » 05 2023г.