

На правах рукописи



Лапухин Евгений Геннадьевич

**Оптические системы передающего и принимающего каналов  
спутникового лазерного дальномера для локации  
в двухвольновом режиме**

Специальность 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Красноярск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»

**Научный руководитель:**

Владимиров Валерий Михайлович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, заместитель председателя ученого совета Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»

**Официальные оппоненты:**

Мартынович Евгений Федорович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Иркутский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук

Максимов Игорь Александрович, доктор технических наук, начальник отдела «Электромагнитной совместимости, электростатического разряда и факторов космического пространства», Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН), г. Томск

Защита состоится «08» декабря 2023 года в 16:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.228.02 в ИФ СО РАН по адресу: 660036 г. Красноярск, Академгородок, д.50, стр.38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФ СО РАН и на сайте по адресу <http://kirensky.ru/tu/councils/dis> .

Автореферат разослан «11» октября 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук



А. Н. Втюрин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы диссертации.**

Одной из областей применения импульсных лазерных дальномеров является измерение расстояний до космических аппаратов для решения задач координатно-временного обеспечения космических навигационных систем. Для этого измеряется время «хода» лазерного сигнала с учетом рефракции (атмосферной поправки). Погрешность поправки не превосходит 3 см [1-3], и уменьшить ее до доли сантиметра можно дисперсионным методом [4-6], основываясь на разности оптического хода двух длин волн на измеряемой трассе. Для использования данного метода необходимо, чтобы в дальномерах расширители лазерных пучков одновременно коллимировали лучи без дополнительной перефокусировки. Излучение лазера на иттриево-алюминиевом гранате ( $Y_3Al_5O_{12}:Nd3$ ) на первой (1064 нм) и второй (532 нм) гармониках могут быть использованы для дисперсионного метода, а совмещение передающего и принимающего трактов решает задачу учета задержки в самом дальномере.

Результаты патентного поиска показали отсутствие готовых решений систем, способных одновременно коллимировать лазерные пучки для длин волн 1064 и 532 нм и делает **актуальной** научно-практическую задачу по расчету и разработке таких оптических систем.

В случае установки лазерных излучателей на космическом аппарате появляется необходимость направления лазерного пучка на приемное наземное оборудование (псевдопассивная лазерная локация). Точное наведение узконаправленного лазерного излучения на приемное оборудование является сложной задачей. Одно из возможных решений – использование оригинального семейства орбит с прохождением спутников по одной трассе.

Локация спутников на низких орбитах сопряжена с определенными рисками: относительно небольшое сечение лазерного пучка в точке спутника и приема, большие видимые угловые скорости, упреждение по движению спутника, аберрация света. В связи с этим требуется экспериментальное подтверждение успешной лазерной локации низкоорбитальных спутников.

Для успешного сопровождения спутника во время экспериментальной локации необходимо разработать программное обеспечение по расчету целеуказаний (токоцентрических координат МКА «Юбилейный-2»).

**Целью диссертационной работы** является: разработка подхода оптимизации параметров при расчете оптических систем, и на основе данного подхода – разработка оптических систем передающего и принимающего каналов лазерного дальномера для локации космических аппаратов в двухволновом (многоволновом) режиме; построение оптимальных орбит для реализации псевдопассивной локации спутников с возможностью мониторинга Северного Морского Пути и разработка оптической системы широкого спектрального диапазона для передающего тракта бортового лазерного излучателя и дистанционного зондирования Земли; разработка программы вычисления эфемерид низкоорбитальных спутников по

орбитальным элементам и экспериментальная проверка возможности локации спутников на низких орбитах с использованием МКА «Юбилейный-2».

**Научно-технические задачи**, решаемые в диссертационной работе:

- 1) определение возможных подходов оптимизации параметров оптических систем;
- 2) выбор и обоснование основных характеристик и параметров оптических систем расширителей;
- 3) выбор и обоснование оптических схем передающего канала лазерного дальномера;
- 4) геометрический расчет хода лучей в оптических системах расширителей;
- 5) анализ передаточных характеристик исследуемых оптических систем;
- 6) расчет положения спутника в топоцентрической системе координат для лазерной локации и оптических наблюдений;
- 7) определение параметров орбит группировки спутников для конвейерного прохождения спутников и мониторинга Северного Морского Пути;
- 8) расчет бортовой оптической системы для дистанционного зондирования Земли;
- 9) расчет орбитальных элементов КА по оптическим наблюдениям.

**Методы исследования.** В диссертационной работе используются методы геометрической оптики, методы расчета оптических систем, методы автоматизированной коррекции, методы расчета положения космического аппарата, метод Гаусса для определения орбиты МКА по трем угловым измерениям.

**Научная новизна.** Новыми являются следующие результаты работы:

- 1) предложен вариативный подход для оптимизации параметров при расчете оптических систем;
- 2) используя вариативный подход рассчитаны и исследованы оптические системы расширителей апертуры лазерного пучка по оптическим схемам Кеплера и Галилея для одновременной коллимации лазерных пучков с длинами волн 532 и 1064 нм без дополнительной перефокусировки. Показано, что разработанные расширители по оптическим схемам Кеплера и Галилея являются дифракционно-ограниченными системами;
- 3) впервые предложена зеркально-линзовая оптическая схема для одновременной коллимации лазерного излучения для видимого оптического и ближнего инфракрасного диапазона длин волн без дополнительной перефокусировки. Показано, что данная система расширителя является дифракционно-ограниченной системой. Проведен анализ оптических характеристик данного расширителя;
- 4) показано, что предложенный расширитель лазерного пучка в обратном ходе лучей возможно использовать как приемную оптическую систему для регистрации отраженного от спутника лазерного импульса;
- 5) предложены два варианта расчета оптических систем для визуального сопровождения спутника при лазерной локации с использованием расширителя лазерного пучка в обратном ходе лучей. Проведен анализ

оптических характеристик данного объектива. Показано, что данные варианты являются аберрационно-ограниченными системами;

6) разработана программа по расчету положения спутника, с использованием которой впервые были получены результаты локации малого космического аппарата «Юбилейный-2» и показана возможность локации низкоорбитальных спутников;

7) разработана программа по расчету орбитальных элементов по оптическим ПЗС-наблюдениям;

8) определены параметры орбит для группировки спутников с конвейерным прохождением по одной трассе для реализации псевдопассивного метода локации и рассчитана оптическая система с большим полем зрения для мониторинга Земли в качестве передающего тракта для лазерного излучателя.

Новизна полученных результатов по первым двум пунктам подтверждается 3 патентами РФ на полезную модель.

**На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:**

1) вариативный подход при оптимизации параметров при расчете оптических систем контролирует процесс оптимизации в системах автоматизированного проектирования;

2) ахроматическая оптическая система с двумя положительными линзовыми блоками (*по схеме Кеплера*) и ахроматическая оптическая система с отрицательным и положительным линзовыми блоками (*по схеме Галилея*) одновременно коллимируют лазерное излучение для длин волн 532 и 1064 нм в пределах поля  $\pm 0,2^\circ$  и являются дифракционно ограниченными;

3) оптическая зеркально-линзовая система одновременно коллимирует лазерное излучение для широкого диапазона длин волн от оптического начиная с 435 нм и до ближнего инфракрасного диапазона до 2098 нм в пределах поля  $\pm 0,2^\circ$ ;

4) объективы оптической системы контроля наведения и сопровождения цели в оптическом диапазоне являются аберрационно-ограниченными с использованием зеркально-линзовой системы коллимации и полем  $0,3^\circ$ ;

5) минимизация аберраций системы для локального по апертуре лазерного пучка на краю апертуры возможна с помощью децентрированного осесимметричного оптического корректора;

6) орбиты, обеспечивающие конвейерное прохождение КА над акваторией Северного Морского Пути, создают условия для точного направления лазерного пучка на наземную станцию приема и обеспечивают непрерывный контроль акватории СМП;

7) оптическая система с полем зрения  $4^\circ$  и спектральным диапазоном  $300\div 3000$  нм является дифракционно-ограниченной для поддиапазонов и аберрационно-ограниченной для всего рабочего спектрального диапазона на всем поле зрения;

8) экспериментальные результаты лазерной локации МКА «Юбилейный-2» показали возможность локации спутников на низких орбитах.

## **Практическая значимость результатов диссертационной работы.**

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при проектировании и разработке оптических систем и лазерных спутниковых дальномеров, использующих двухлучевую (многолучевую) лазерную локацию, а также при проектировании и разработке лазерных радаров, для расчета целеуказаний для оптических наблюдений и лазерной локации.

Результаты диссертационной работы были использованы при первой лазерной локации МКА «Юбилейный-2» для наведения дальномера на спутник и его дальнейшего сопровождения во время локации.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается корректностью используемого математического аппарата, программного обеспечения, проведением тестовых расчетов (в том числе и различными программными продуктами), а также сопоставлением с результатами работ других авторов и программ, совпадением результатов расчета координат спутника с результатами лазерной локации спутника «Юбилейный-2».

**Использование результатов диссертации.** Предложенные в диссертационной работе новые технические решения оптических систем для многолучевых расширителей лазерных пучков позволяют повысить точностные характеристики спутниковых лазерных дальномеров и могут быть использованы при проектировании лазерных локационных станций и радаров. Результаты расчета положения МКА использовались при первых пробных локациях спутника «Юбилейный-2».

Предложенное в диссертационной работе семейство орбит могут быть использованы для спутниковых группировок с целью мониторинга акватории СМП, организации связи и дополнения к навигационной системе ГЛОНАСС. Разработанная оптическая система с большим полем зрения может быть использована как бортовой расширитель лазерного пучка так и для мониторинга поверхности Земли.

**Апробация работы.** Основные результаты работы представлены на конференциях «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (Красноярск, 2013), ВНКСФ-20 (Ижевск, 2014), «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (Красноярск, 2014), «Решетневские чтения» (Красноярск, 2015, 2018), «Физика космоса» (Екатеринбург, 2015), «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (Красноярск, 2015), ВНКСФ-21 (Омск, 2015), «Решетневские чтения» (Красноярск, 2016), ВНКСФ-23 (Екатеринбург, 2017), «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (Красноярск, 2017), «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (Санкт-Петербург, 2017).

**Публикации и личный вклад автора.** По материалам диссертации опубликовано 26 работ, в том числе: 6 статей в изданиях по списку ВАК; 3 патента на полезную модель РФ; 3 программы зарегистрированы в государственном реестре программ для ЭВМ; 14 работ в сборниках докладов международных и всероссийских конференциях. Все представленные в диссертации результаты исследований получены лично автором или при его непосредственном участии.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитированной литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 173 страницы, включая 52 рисунка, 50 таблиц и списка цитированной литературы из 143-х наименований и 4-х приложений.

## Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и задачи исследования, определены основные научные результаты, их новизна, теоретическая и практическая значимость. Изложены выносимые на защиту основные положения выполненной работы.

**В первой главе** рассмотрено влияние рефракции на результаты измерения дальности и способ определения атмосферной поправки по данным аэрологического зондирования, учитывающий совокупность априорных сведений о пространственном расположении атмосферных слоев с одинаковым показателем преломления на момент лазерной локации спутника. Суммарная средняя квадратическая погрешность расчета поправок данного метода для зенитных расстояний  $z = 80^\circ$  составляет  $\sigma_r = 47\text{мм}$  [2]. На точность этого метода оказывает существенное влияние объем метеорологических данных, зависящий от числа метеостанций и частоты съема метеопараметров.

Рассмотрена модель определения атмосферной поправки по метеопараметрам вблизи дальномера на момент измерений. У данной модели расчетная формула атмосферной поправки включает в себя поправку на стандартную атмосферу, полное барометрическое давление и парциальное давление водяного пара на уровне станции наблюдения.

По оценкам полная погрешность атмосферной поправки в диапазоне зенитных расстояний до  $z = 80^\circ$  составляет от 1 до 3 см [1-3].

Рассмотрен расчет атмосферной поправки дисперсионным методом, в основе которого лежит определение среднего группового показателя преломления среды с использованием разности оптических путей  $S_1$  и  $S_2$  для двух различных длин волн на измеряемой трассе (рисунок 1).

Факторами, ограничивающими точность дисперсионного метода, являются отклонения состава воздуха (влажности), давления и температуры от принятой модели атмосферы, которые для зенитных расстояний от  $0^\circ$  до  $70^\circ$

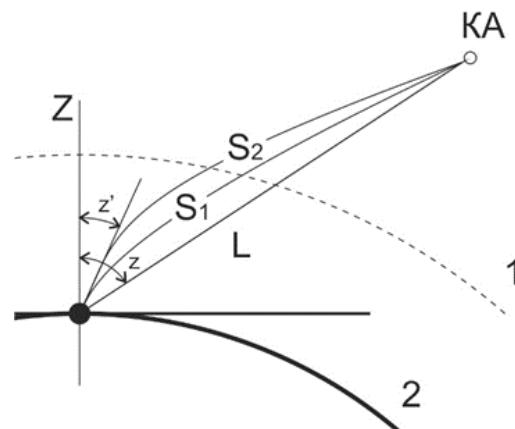


Рисунок 1 – Схема прохождения лазерных лучей сквозь толщу атмосферы при использовании двулучевой локации спутников: КА – космический аппарат; Z – направление на зенит; 1 – внешняя граница атмосферы; 2 – поверхность Земли; L,  $S_1$  и  $S_2$  – длина истинной дальности до объекта и измеряемой для лазерного луча с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ;  $z$  и  $z'$  – истинное и видимое зенитные расстояния.

могут давать погрешность до 1 мм, и мгновенные ошибки, связанные с турбулентностью до 1 см. С учетом некоррелированного характера погрешностей измерений, вносимых турбулентностью, их суммарная величина будет на порядок меньше. В результате общая погрешность дисперсионного метода не превосходит 2 мм [7].

Из рассмотренных методов в определении атмосферной поправки в определении дальностей наибольшую точность дает дисперсионный метод.

Рассмотрены расширители лазерных пучков для монохроматического излучения и показано, что они не способны коллимировать лазерные пучки для двух длин волн без дополнительной перефокусировки.

Рассмотрены известные расширители лазерных пучков для двух и более длин волн, указаны причины невозможности их применения для одновременной коллимации лазерного излучения на длинах волн 1064 и 532 нм.

Рассмотрены преимущества дальномеров, у которых оптические приемный и передающий каналы выполнены по комбинированной схеме, т.е. оптическая схема расширителя лазерного пучка и светоприемная частично или полностью совмещены.

Проведенный обзор и анализ показывает необходимость разработки и расчета оптических систем расширителей лазерного пучка для двух длин волн (532 и 1064 нм), коллимирующих излучение одновременно без дополнительной перефокусировки по совмещенной схеме приемного и передающего каналов дальномера.

Проанализирован выбор метода расчета положения космического аппарата по его орбитальным элементам и определение координат спутника в топоцентрическую систему координат, а также расчет орбитальных элементов по ПЗС-наблюдениям.

**В главе 2** представлены результаты исследований, разработки и расчета оптических систем расширителей лазерного пучка, выполненные по обратной оптической схеме Галилея и Кеплера для длин волн 532 и 1064 нм. Рассчитанные оптические системы расширителей увеличивают апертуру лазерного пучка для указанных длин волн одновременно без дополнительной перефокусировки.

Представлен **расширитель по обратной схеме Галилея**, который является афокальной оптической системой [A8, A15, A17, A19].

Лазерный пучок в системе после прохождения через отрицательную линзу начинает расширяться, и пройдя через положительный блок из трех линз становится параллельным, но увеличенным в диаметре 12,5 раз. Благодаря этому, уменьшается расходимость луча, что обеспечивает большую дальность локации спутников.

Точечные диаграммы расхождения лазерных пучков с длинами волн 532 и 1064 нм после прохождения расширителя показывают, что расхождение составляет менее 0,5 угл. сек (рисунок 2). Минимальный угол расходимости луча диаметром 120 мм за счет дифракции  $\rho = 2.44 \frac{\lambda}{D}$  имеет расхождение 2,23" для 532 нм и ~4,46" для длины волны 1064 нм. Помимо этого, приведены

точечные диаграммы суммарного луча. Число Штреля близко к единице свидетельствует о том, что данная оптическая система является дифракционно-ограниченной. Представлены графики распределения световой энергии в луче и приведены общие характеристики расширителя.

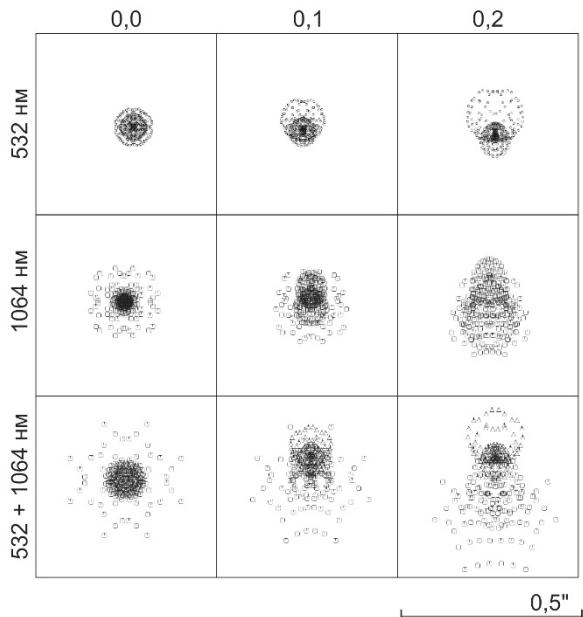


Рисунок 2 – Углы рассеяния лазерного луча на выходе из расширителя по схеме Галилея для длин волн 532 и 1064 нм по центру поля, для угла  $0,1^\circ$  и на краю поля (сторона квадрата соответствует  $0,5''$ , нижний ряд – суммарный луч)

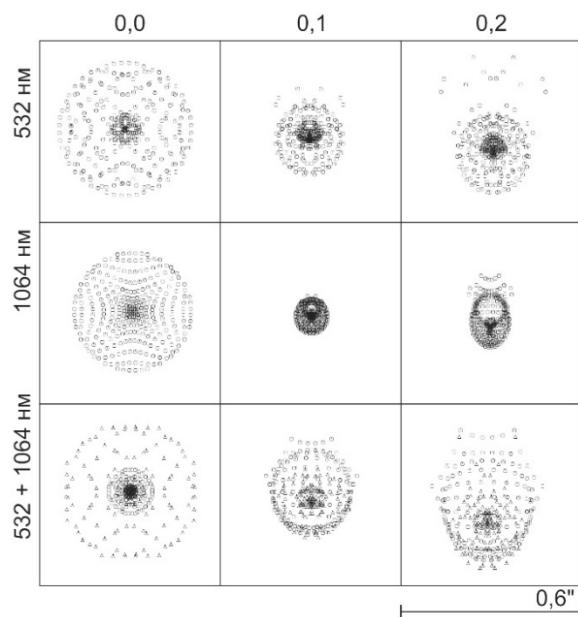


Рисунок 3 – Углы рассеяния лазерного луча на выходе из расширителя по схеме Кеплера для длин волн 532 и 1064 нм по центру поля, для угла  $0,1^\circ$  и на краю поля (сторона квадрата соответствует  $0,6''$ , нижний ряд – суммарный луч )

В представленной оптической системе **расширителя по обратной схеме Кеплера** [A9, A15, A17, A19] первый по ходу луча блок, состоящий из трех линз, представляет, по сути, положительный окуляр афокальной телескопической системы, в связи с этим лазерный луч после прохождения этого блока сходится в точке фокуса, и далее расходится. Второй блок, состоящий из трех линз, представляет собой положительный объектив, задний фокус которого совмещен с передним фокусом окуляра. Благодаря этому, расширяющийся луч лазера после прохождения объектива становится параллельным.

Рассчитанный расширитель, как и расширитель по схеме Галилея, приведенный в этой главе является дифракционно-ограниченной оптической системой и точечные диаграммы расхождения лазерных пучков с длинами волн 532 и 1064 нм для разных углов поля зрения после увеличения 15,0 крат это подтверждают (рисунок 3).

По своим габаритным размерам рассчитанные расширители соответствуют габаритным размерам расширителя лазерного пучка дальномера ЛД-2. При замене штатного расширителя на один из рассчитанных выше возможно применение дисперсионного метода в определении атмосферной поправки при измерении дальности. Возможность замены рубинового лазера на YAG:Nd-лазер подтверждена работами

Могильницкого Б. С. и др. [8]. Данная замена позволяет уменьшить длительность импульса и увеличить точностные характеристики ЛД-2 [A19]. В качестве светоприемной оптической системы на ЛД-2 целесообразно использовать по одному штатному рефлектору на каждую длину волны.

Представлена оптическая схема и расчет **зеркально-линзового расширителя** лазерного пучка для оптического и ближнего инфракрасного диапазона от 435 до 2098 нм [A4, A7, A20, A21].

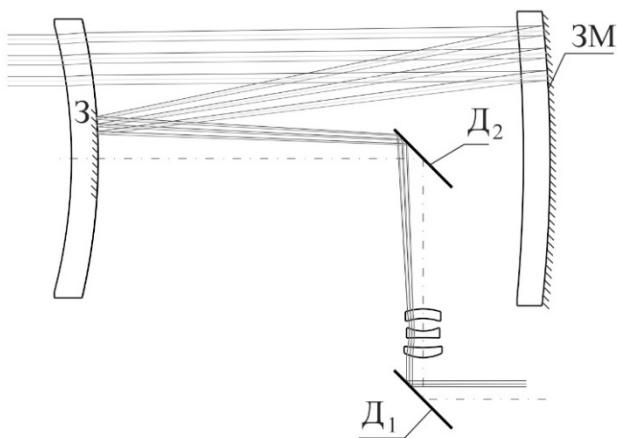


Рисунок 4 – Оптическая схема расширителя лазерного пучка ( $D_1$  и  $D_2$  – плоские зеркала, расположенные под углом  $45^\circ$  к оптической оси, 3 – центральная часть корректирующей линзы с отражающим покрытием, 3М – зеркало Манжена)

всю апертуру входного зрачка, в отличие от рассчитанных выше расширителей по схемам Галилея и Кеплера. На выходе из расширителя луч имеет диаметр  $\sim 50$  мм, а значит данная система в обратном ходе лучей может быть использована как система, принимающая отраженный эхо-сигнала от спутника. Использование введенных в систему двух плоских зеркал позволяет использовать неподвижный относительно Земли фокус Куде, что позволяет использовать стационарно источник лазерного излучения и другую сопутствующую аппаратуру. Установка оборудования на станине лазерного дальномера снижает нагрузку на опорно-поворотное устройство.

Расходимость внеосевого пучка диаметром 7 мм для длин волн рабочего диапазона меньше угла дифракции (рисунок 5) и число Штреля близкое к единице для всех волн и углов свидетельствует о том, что данная система является дифракционно-ограниченной. Энергетический анализ показывает, что 80% энергии лазерного луча сосредоточено в растворе угла  $\sim 1''$ .

Оптическая схема данного расширителя представляет из себя менисковую систему с окулярной частью из трех линз (рисунок 4).

Расчет оптической системы расширителя проводился для апертуры входного зрачка диаметром 42 мм. Проведен анализ основных характеристик расширителя для осевого полноапертурного ( $\varnothing 42$  мм) и на краю апертуры ( $\varnothing 7$  мм) лазерного пучка. Входной зрачок системы составляет 42 мм, увеличение 7 крат.

Луч лазера диаметром 7 мм в данном расширителе использует не

отличие от рассчитанных выше

расширителей

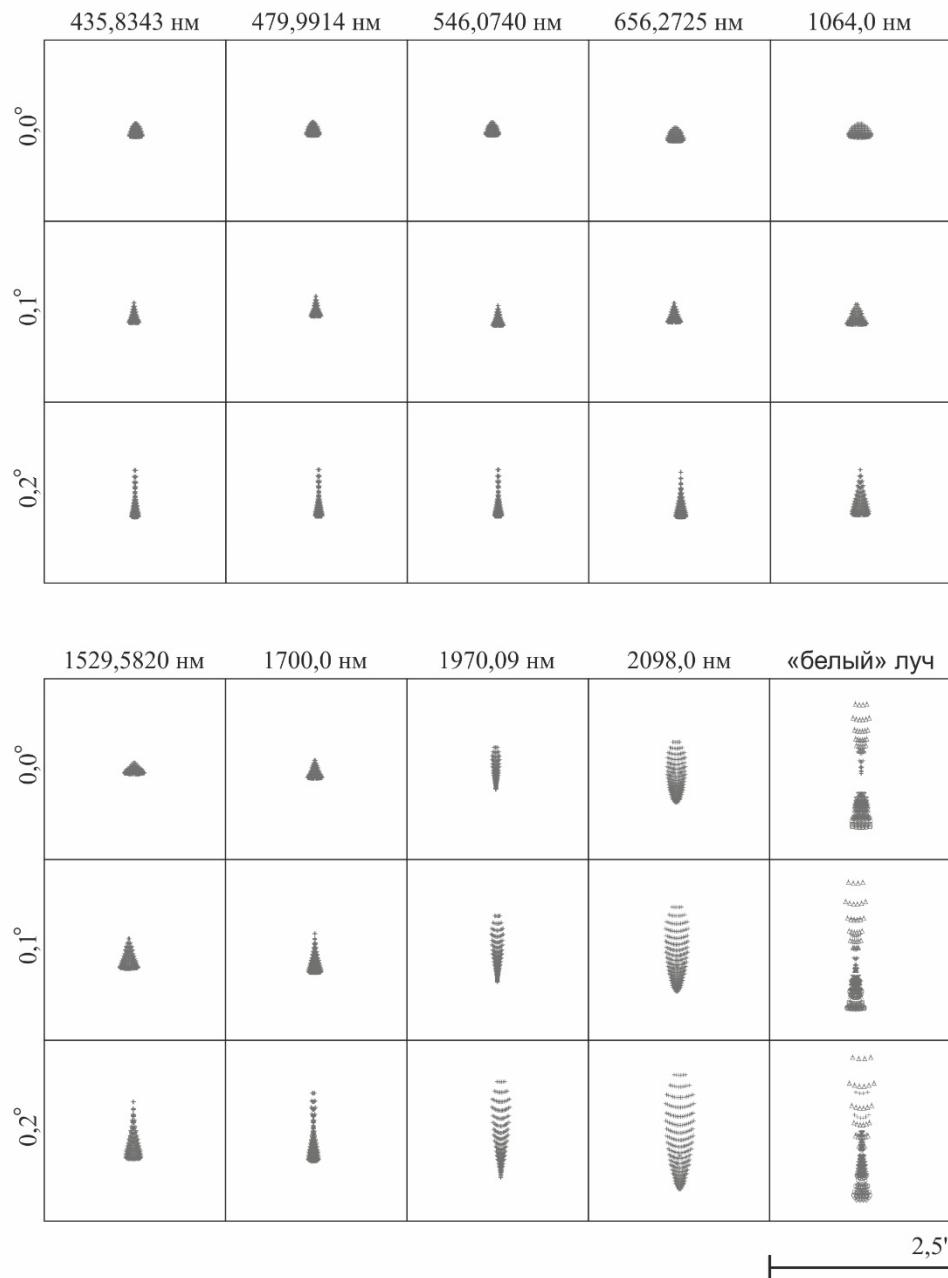


Рисунок 5 – Углы расходимости внеосевого лазерного луча на выходе из расширителя для монохроматических волн диапазона  $435 \div 2098$  нм для центра поля, угла  $0,1^\circ$  и на краю поля (сторона квадрата соответствует  $2,5''$ ) и приведена расходимость «белого» луча.

Оптическая система зеркально-линзового расширителя является дифракционно-ограниченной и коллимирует световое излучение для диапазона длин волн от 435 нм до 2098 нм одновременно без дополнительной перефокусировки делает возможным ее использование для двулучевой локации космических аппаратов с применением дисперсионного метода определения атмосферной поправки.

Недостатком пучков на краю аппертуры является «вытянутость», «несимметричность» распределения световой энергии в пучке. Данный недостаток снижается за счет введения дополнительных линзовых элементов с поверхностями тороидальной формы. В работе показано, что уменьшение данного недостатка достигается путем введения двухлинзового компонента со

сферическими поверхностями, но смещенного относительно луча лазера. Данный расширитель может быть использован как в лазерных спутниковых дальномерах, так и в наземных лазерных радарах.

Далее представлены оптические системы визуального контроля наведения и сопровождения цели для оптического диапазона, которые являются частью комбинированной оптической системы лазерного дальномера (рисунок 6) [A2, A5, A16, A20, A21].

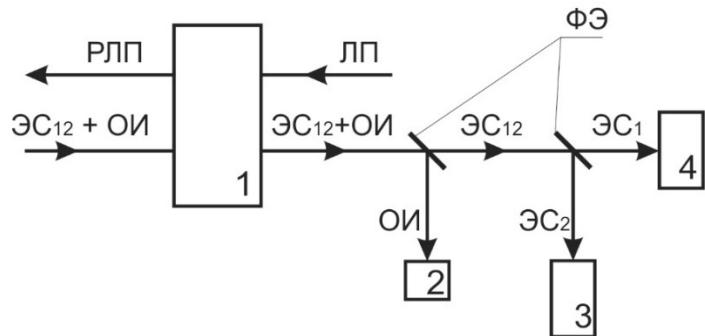


Рисунок 6 – Структурная схема комбинированной оптической системы спутникового лазерного дальномера (ЛП – лазерный пучок, РЛП – расширенный ЛП, ЭС<sub>12</sub> – эхо-сигнал излучения 1 и 2, ОИ – оптическое излучение, ФЭ – фильтрующие элементы, 1 – расширитель лазерного пучка, 2 – объектив камеры сопровождения, 3 и 4 – детектор эхо-сигнала)

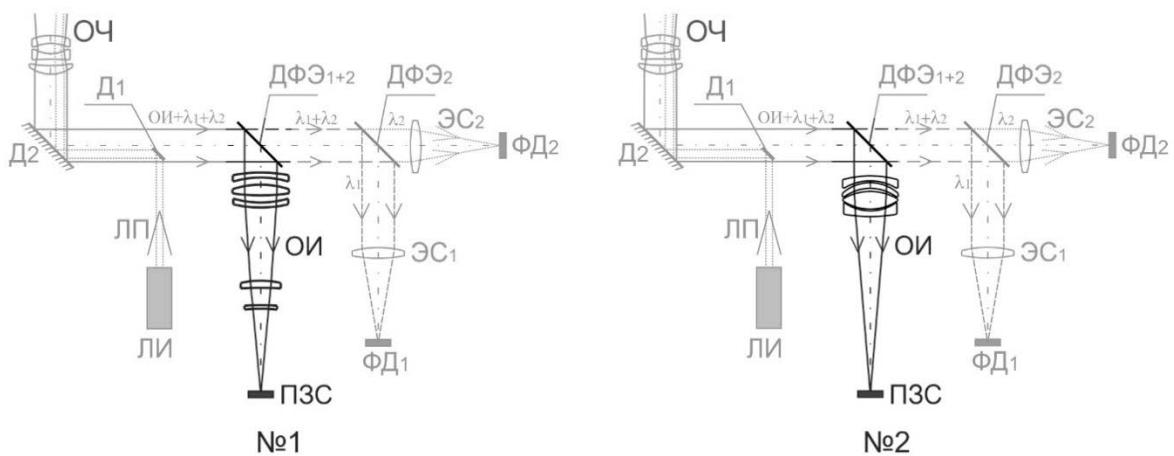


Рисунок 7 – Оптические системы наведения и сопровождения в лазерном спутниковом дальномере по совмещенной схеме для двухвольновой локации с системой визуального контроля и наведения (ОЧ – окулярная часть зеркально-линзового расширителя; ЛИ – лазерный излучатель; ЛП – лазерный пучок; ЭС – эхо-сигнал; ОИ – оптическое излучение;  $D_1$ ,  $D_2$  – диагональные плоские зеркала;  $D\Phi\mathcal{E}_{1+2}$  – диагональный фильтрующий элемент для эхо-сигналов с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ;  $\Phi\mathcal{D}_1$ ,  $\Phi\mathcal{D}_2$  – фотодетекторы; ПЗС – прибор с зарядовой связью)

Представлены два варианта оптических систем камеры контроля сопровождения в оптическом диапазоне. Расширитель лазерного пучка в полном объеме на схемах не показан, обозначена лишь его окулярная часть (рисунок 7).

Расчет объективов проводился совместно с зеркально-линзовым расширителем. Основные характеристики объективов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики объективов камеры сопровождения

Характеристика	Вариант	
	№ 1	№ 2
Диаметр входного зрачка, мм	320,2	320,2
Эквивалентное фокусное расстояние, мм	1770,16	1763,57
Фокальное отношение	5,53	5,51
Масштаб в фокальной плоскости, мкм / "	8,5	8,5
Основной спектральный диапазон, нм	480 - 644	480 - 644
Фокальная поверхность	плоскость	плоскость
Угловой диаметр поля зрения, градусы	0,3	0,3
Линейный диаметр поля зрения, мм	9,2	9,2
Задний отрезок, мм	120,1	224,8
Среднеквадратический диаметр изображения точечного источника (центр поля / край поля), мкм	7,5 / 13,9	4,5 / 7,7
Диаметр пятна рассеяния, в пределах которого находится 80% световой энергии изображения точечного источника (центр поля / край поля), мкм	7,0 / 19,2	6,3 / 8,5
Типы оптических поверхностей	сфера	сфера
Количество линз (без линз расширителя)	5	4
Марки используемых стекол	ТФ10, ЛК7, К8	ОФ1, ОК4, пл. кварц

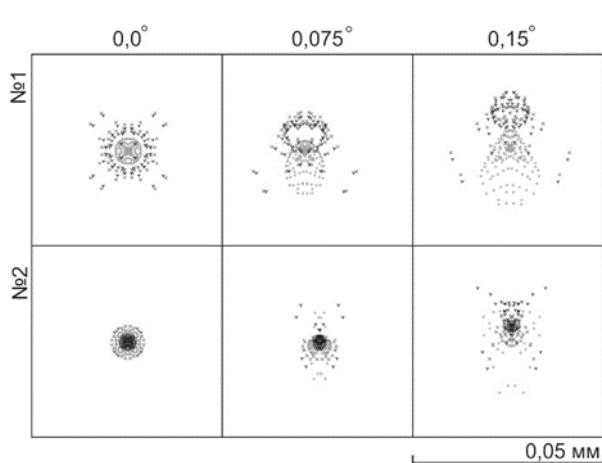


Рисунок 8 – Пятна рассеяния точечных источников в фокальной плоскости для двух вариантов объектива

Изображение точечного источника в фокальной плоскости в виде пятна имеет среднеквадратичный диаметр для первого варианта не более 14 мкм по всему полю (рисунок 8). Число Штреля изменяется от 0,411 (в центре поля) до 0,001 (на краю), поэтому данная оптическая система является аберрационно ограниченной. Энергетический анализ показал, что 80% энергии сосредоточено в пятне диаметром 14 мкм.

Для второго варианта камеры, в котором используются стекла с особым ходом дисперсии, среднеквадратичный диаметр изображения точечного источника в фокальной плоскости не превышает 7 мкм по всему полю. Число Штреля равное 0,89, 0,87 и 0,58 для углов 0°, 0,1° и 0,2° доказывает, что данная оптическая система является аберрационно ограниченной. В данном объективе 90% световой энергии точечного источника сосредоточено в пятне диаметром 10 мкм (рисунок 8). Размер пятен соизмерим с размером пикселя современных

фотоприемников, что обеспечивает максимальное согласование фотоприемника с оптической системой.

В третьей главе кратко обоснован выбор алгоритма расчета положения малого космического аппарата «Юбилейный-2» в инерциальной системе координат и приведен алгоритм перехода из инерциальной системы координат в топоцентрическую.

На момент лазерной локации спутника его положение предлагается рассчитывать по усредненным кеплеровым элементам, которые представлены в двусторочном формате.

Для вычисления координат спутника в инерциальной системе координат была выбрана упрощенная модель расчета SGP4 [9], которая учитывает возмущения, вызванные несферичностью Земли, сопротивлением верхних слоев атмосферы. Недостатком расчета положения спутника используя двусторочные элементы орбит является быстрое «устаревание» наборов орбитальных элементов.

Инерциальная система координат (X, Y, Z) соотносится с геоцентрической системой посредством модели вращения Земли:

$$\mathbf{R}_{uh} = [PN] R_z(-\theta_{y_{n3}}) R_z(-s') R_y(x_p) R_x(y_p) \mathbf{r}_{eu} = [M] \mathbf{r}_{eu},$$

где  $R_y(x_p)$   $R_x(y_p)$  – матрицы поворота вокруг оси  $x$  и  $y$  на углы  $x_p$ ,  $y_p$ ;  $R_z(-s')$  – матрица поворота вокруг оси  $z$  на угол  $(-s')$ , который учитывает годовое колебание полюса и Чандлеровское изменение положение полюса планеты (является функцией времени);  $R_z(-\theta_{y_{n3}})$  – матрица поворота вокруг оси  $z$  на угол поворота Земли  $(-\theta_{y_{n3}})$ , зависящий от времени  $UT1$ ;  $[PN]$  – матрица учитываяющая прецессию и нутацию;  $[M]$  – матрица перехода от земной системы координат к небесной;  $\mathbf{r}_{uh}$ ,  $\mathbf{r}_{eu}$  – векторы в небесной системе координат и в Земной соответственно.

Соответственно, для перехода к топоцентрической системе координат следует повернуть геоцентрическую систему координат около оси  $z$  на угол долготы места наблюдения и затем осуществить поворот около оси  $u$  на величину  $(90^\circ - \varphi)$ .

$$\mathbf{r}_{mu} = R_z(\lambda) R_y(90^\circ - \varphi) \mathbf{r}_{eu}$$

Далее вычисляются азимут и угол места спутника в топоцентрической системе координат.

По рассмотренному алгоритму были рассчитаны координаты МКА «Юбилейный-2» в топоцентрической системе координат и, используя их, проведены оптические наблюдения в обсерватории СибГАУ (рисунок 9). Во время оптических наблюдений были получены ПЗС-снимки трека МКА «Юбилейный-2». Измеренные координаты не соответствуют рассчитанным не более чем на  $7'$  [A11, A13, A18, A23].

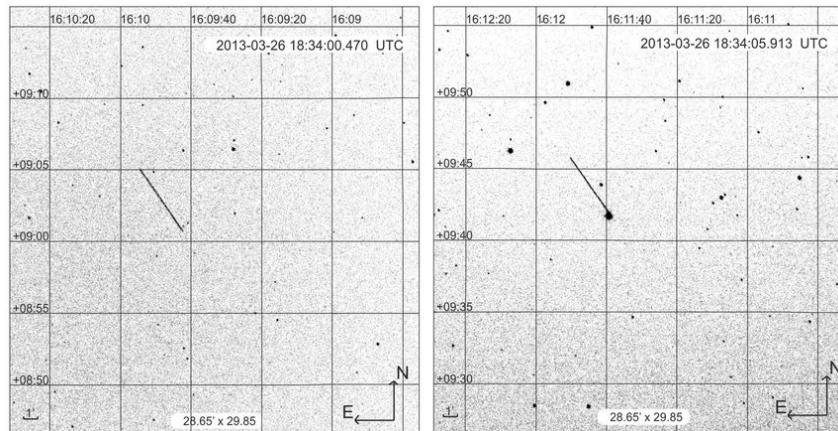


Рисунок 9 – Оптические ПЗС-наблюдения МКА «Юбилейный-2» (след спутника за время экспозиции 0,5 сек на фоне звезд)

По рассчитанным целеуказаниям впервые проведены сеансы лазерной локации МКА «Юбилейный-2» с использованием спутниковых лазерных дальномеров Simeiz-1873 (КрАО) и «Сажень-ТМ» (филиал ВНИИФТРИ, г. Иркутск) [A22, A23].

По результатам лазерной локации было выяснено, что наведение на МКА «Юбилейный-2» требовало незначительной коррекции. А измеренная наклонная дальность ( $O$ ) не соответствует рассчитанной ( $C$ ) в пределах 370 метров (таблица 2). Значительное отклонение  $(O - C)_i$  обусловлено несовершенством аналитической баллистической модели прогноза SGP4. Тем не менее, доступность орбитальных элементов и возможность быстрого расчета положения спутника делает эту модель удобной для расчета целеуказаний и местоположения космического аппарата по усредненным орбитальным элементам в формате TLE.

Таблица 2 – Результаты локации МКА «Юбилейный-2»

№	Дата	Время, Мск	Кол-во измерений	$(O - C)_i$ , м	СКО, м
1	2017.03.13	10:45:14	5440	-162,037÷178,288	0,0373
2	2017.03.13	20:48:33	358	-338,752÷254,038	0,0352
3	2017.03.15	21:07:24	1328	-322,617÷200,396	0,0347
4	2017.03.23	10:26:23	7409	-361,641÷-99,364	0,0351
5	2017.03.25	17:44:14	11871	-340,881÷29,757	0,0352
6	2017.03.27	19:10:22	2939	-95,758÷28,917	0,0395

Рассмотрено программное обеспечение по **расчету орбитальных параметров** по наземным ПЗС-наблюдениям МКА «Юбилейный-2» [A12, A14].

По ПЗС-наблюдениям спутника определены его топоцентрические экваториальные координаты ( $\alpha_i, \delta_i$ ) для трех моментов времени  $t_i$ . По трем измерениям используя метод Гаусса [10, 11] определяется радиус-вектор  $r$  спутника и вектор скорости  $\dot{r}$  на средний момент времени. Далее по  $r$  и  $\dot{r}$  вычисляются элементы орбиты.

Представлены результаты ПЗС-наблюдений спутника, по которым были определены элементы орбит. По вычисленным элементам орбит были рассчитаны координаты МКА «Юбилейный-2».

В **четвертой главе** проведен 1) анализ предложенных линзовых оптических систем, способных коллимировать лазерные пучки с длиной волны 532 и 1064 нм волн; 2) анализ зеркально-линзовой коллимирующей оптической системы для оптического и ближнего инфракрасного диапазона длин волн 435-2098 нм; 3) анализ оптической совмещенной схемы приемного и передающего канала; 4) анализ качества изображения систем визуального контроля и наведения; 5) анализ результатов расчета целеуказаний для лазерной локации.

В **пятой главе** приведен подбор и исследование орбит для конвейерного прохождения космических аппаратов для псевдопассивной лазерной локации с возможностью дистанционного зондирования акватории СМП и расчет оптической системы с большим полем зрения и широким спектральным диапазоном [A3, A6, A24, A25, A26].

Орбитальная группировка из 12 спутников, расположенных на геосинхронных эллиптических ретроградных орбитах (таблица 3), позволяет проходить спутникам конвейерно по одной трассе (рисунок 10) над акваторией СМП. При этом над СМП всегда находится от 2 до 3 спутников.

Таблица 3 – Параметры орбит КА для системы мониторинга СМП

Спутник	$i = 0..11$
Год и день эпохи	2022 243,93598794
Наклонение, °	100,0
Средняя аномалия, °	$285,0 - 30 * i$
Долгота восх. узла, °	$240,0 + 30 * i$
Аргумент перигея, °	090,0
Эксцентриситет	0,2883744
Число витков в сут	1,00283883
Период обращения	~23ч 56м 04с

Для анализа возможностей спутниковой группировки и определения предполагаемого местоположения наземного оборудования для пассивной локации спутников разработано программное обеспечение, которое определяет место на поверхности земли с заданными условиями видимости космического аппарата [A10].

Использование спутников на данных орбитах как дополнение к глобальной навигационной системе ГЛОНАСС существенно увеличивает время доступности к системе навигации в горной или холмистой местности, и в условиях городской застройки до 100% [A6].

При расчете бортовой оптической системы и оптических каналов лазерного дальномера выработан и окончательно сформулирован вариативный подход оптимизации параметров оптической системы для контроля процесса оптимизации [A1].

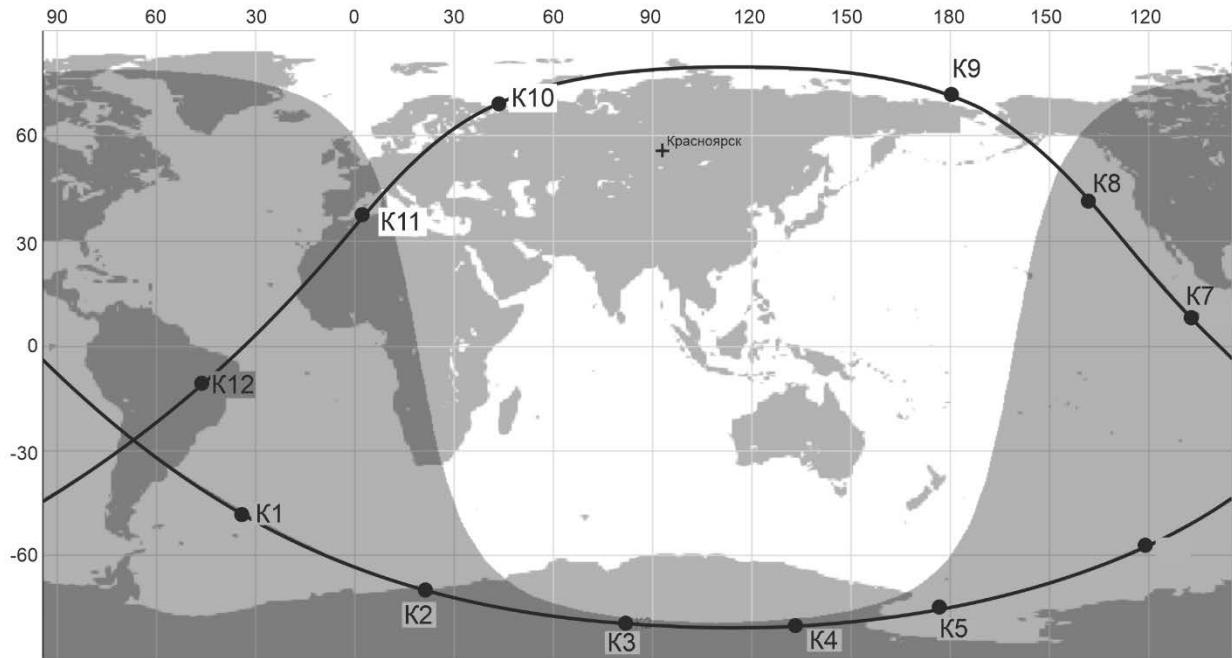


Рисунок 10 – Трасса спутников с конвейерным прохождением

Вариативный подход при оптимизации параметров при расчете оптических систем заключается в том, что на разных этапах оптимизации оптической системы оптимизируются как отдельные параметры, так и совокупные группы. В качестве варьируемых параметров использовались радиусы кривизны зеркал, эксцентриситеты зеркал, радиусы кривизны линз, толщины линз, расстояния между поверхностями, и вынос фокальной поверхности за вершину последней оптической поверхности (рисунок 11).



Рисунок 11 – Структурная схема вариативного подхода для оптимизации параметров оптической системы

После каждой итерации минимизации aberrаций проводился анализ качества изображений и при необходимости менялись либо конструктивные характеристики элементов системы, либо варьируемые параметры и их набор. Оптимизация системы и минимизация aberrаций проводилась для длин волн, покрывающих весь спектральный диапазон: 250, 300, 350, 380, 480, 550, 700, 800, 950, 1064, 1500, 2000, 3000 нм.

Для разработки оптической системы с необходимыми параметрами проведена модификация оптической системы Ричи-Кретьена путем добавления пятилинзового корректора из плавленого кварца марки КИ (рисунок 12).

Оптимизированная оптическая система с конструктивными элементами (таблица 4) позволяет получить практически дифракционно-ограниченную систему на всем спектральном диапазоне (таблица 5) и требуемыми характеристиками системы (таблица 6).

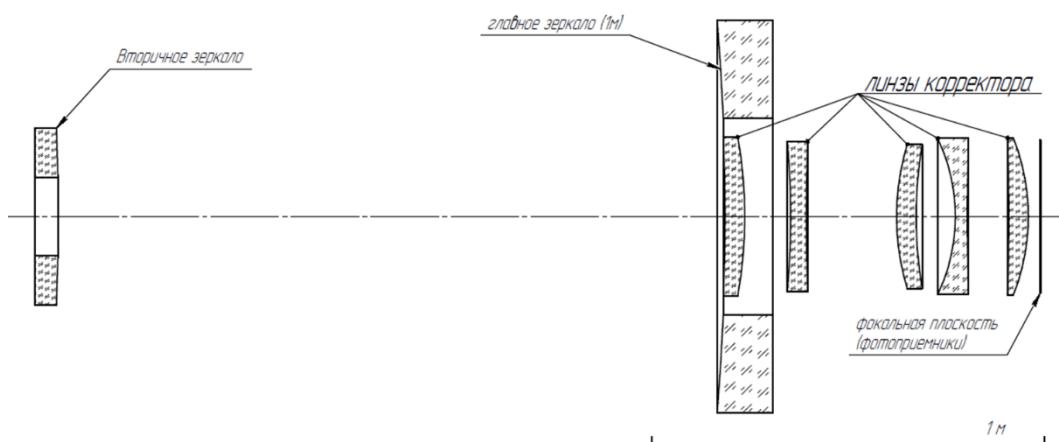


Рисунок 12 – Оптическая схема модификации системы Ричи-Кретьена

Таблица 4 – Конструктивные характеристики оптических компонент системы

№	Тип поверхности	K, коническая постоянная	Радиус, мм	Толщина, мм	Стекло	Апертура
диафрагма	Гиперболоид	K= - 1,56	-6164,75	-1747,05		1000,00
2	Гиперболоид	K= - 27,9	-6164,75	1747,05		460,00
3	Сфера		-5187,05	49,71	КИ	398,8
4	Сфера		-1027,18	171,67		398,8
5	Сфера		-889,71	39,77	КИ	367,4
6	Сфера		6164,75	94,52		367,9
7	Сфера		713,40	49,71	КИ	372,4
8	Сфера		2187,50	49,65		367,8
9	Сфера		-497,39	19,889	КИ	366,9
10	Гиперболоид	K= - 20	6164,75	85,25		376,1
11	Сфера		-6164,75	49,71	КИ	396,8
12	Сфера		-513,09	29,74		399,2
	Сфера		1,00E+18	-0,20		391,1

Таблица 5 – Размер усредненного пятна рассеяния в фокальной плоскости, мкм

Спектральный диапазон, нм	Расстояние от оси, °				Кружок Эри, мкм
	0°	0,7°	1,5°	2°	
*250 - 400	13,3	15,6	28,8	39,8	3,4 – 5,5
300 - 400	6,6	7,1	11,8	16,8	4,1 – 5,5
450 - 850	2,6	3,3	10,0	13,7	6,2 – 11,6
1000 – 3000	13,0	19,2	34,2	42,1	12,3 – 45,1
300 - 3000	10,1	15,0	25,1	31,0	4,1 – 45,1

Таблица 6 – Характеристики оптической системы

Характеристика	Значение
Диаметр главного зеркала, м	1
Фокусное расстояние, м	5,6
Диаметр вторичного зеркала, м	0,46
Экранирование оправой вторичного зеркалом (по диаметру)	~0,5
Виньетирование для поля 0°/ 0,7°/ 1,5°/ 2°	0/ 0,04/ 0,15/ 0,22
Поле зрения, (угловое, °) / (линейное, мм)	4 / 391
Спектральный диапазон, нм	(250)300-3000
Вынос фокальной плоскости за вершину последней поверхности системы, м	~0,3
Материал зеркал	Ситалл СО-115М
Материал линз	Кварцевое стекло: КИ

## Основные результаты работы

1. Предложен вариативный подход при оптимизации параметров при расчете оптических систем, который контролирует процесс оптимизации в системах автоматизированного проектирования.

2. Исследована разработанная оптическая система расширителя лазерных пучков по схеме Галилея, коллимирующая лазерное излучение без дополнительной перефокусировки для длин волн 532 и 1064 нм. Рассчитаны оптические системы и конструктивные характеристики оптических элементов расширителей. На основе анализа углов расходимости лазерных пучков с длинами волн 532 и 1064 нм и распределения световой энергии в растворе луча показана способность этих оптических систем коллимировать лазерные пучки без дополнительной перефокусировки системы.

3. Выполнен расчет оптической системы расширителя лазерных пучков по схеме Кеплера, коллимирующий лазерное излучение без дополнительной перефокусировки для длин волн 532 и 1064 нм. Рассчитаны оптические схемы и конструктивные характеристики оптических элементов расширителей. Для расширителей по схеме Кеплера и Галилея на основе анализа углов расходимости лазерных пучков с длинами волн 532 и 1064 нм и распределения световой энергии в растворе луча показана способность коллимировать лазерные пучки без дополнительной перефокусировки системы.

4. Обоснованы основные характеристики и оптическая схема зеркально-линзового расширителя. Исследован и предложен вариант системы, коллимирующий лазерное излучение для видимого и ближнего инфракрасного диапазона длин волн (435-2098 нм). Рассмотрены варианты использования расширителя в полноапертурном режиме и в режиме внеосевого лазерного пучка.

5. Показана возможность использования зеркально-линзового расширителя в качестве приемного канала дальномера. Предложены оптические схемы, с использованием расширителя, системы визуального контроля наведения и сопровождения цели двух вариантов: с использованием линзовых компонентов из обычного оптического стекла и с использованием стекол с особым ходом дисперсии. Оптимизация и расчет системы проводился для длин волн 480-644 нм и поля зрения  $0,3^\circ$ . Проведен анализ точечных диаграмм, распределения энергии в кружке рассеяния и частотно-контрастной характеристики системы. На основе анализа точечных диаграмм, распределения энергии в кружках рассеяния и частотно-контрастной характеристики системы сделаны выводы о том, что использование системы со стеклами с особым ходом дисперсии предпочтительней при использовании кадрового фотодетектора с малым размером чувствительного элемента.

6. Разработана программа по расчету положения КА с выводом основных параметров для лазерной локации. Проведены оптические наблюдения МКА «Юбилейный-2» на телескопе обсерватории СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Проведено шесть сеансов успешной лазерной локации МКА «Юбилейный 2» на лазерном дальномере Восточно-Сибирского филиала ФГУП «ВНИИФТРИ» (Иркутск) и три сеанса локации на лазерном дальномере Simeiz-1873 (ФГБУН «КрАО»).

7. Разработана программа по расчету орбитальных элементов КА по оптическим наблюдениям. Проведен расчет параметров орбиты МКА «Юбилейный-2» по оптическим ПЗС-наблюдениям на телескопе обсерватории СибГУ им. М. Ф. Решетнева.

8. Определены параметры орбит спутниковой группировки для конвейерного прохождения по одной трассе над акваторией СМП для «пассивной» лазерной локации. Определены возможности мониторинга СМП и видимости космических аппаратов для выбранных мест на поверхности.

9. Выполнен расчет оптической системы с широким спектральным диапазоном и большим полем зрения для мониторинга земной поверхности с возможностью использования в качестве бортового коллиматора. Определены конструктивные элементы поверхностей и толщин элементов системы.

## Основные публикации по теме работы

### **а) статьи в изданиях рекомендованных перечнем ВАК РФ**

А1. Владимиров, В. М. Оптическая система для дистанционного зондирования в УФ-, видимом и ближнем ИК-диапазонах / В. М. Владимиров, В. А. Юксеев, Е. Г. Лапухин // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 2. – С. 195–203. DOI: 10.18287/2412-6179-СО-611.

А2. Лапухин, Е. Г. Объектив камеры сопровождения для спутникового лазерного дальномера оптического диапазона / Е. Г. Лапухин, В. М. Владимиров, Л. В. Границкий // Вестник СибГАУ. – 2016. – Т. 17, № 1. – С. 147–153.

А3. Владимиров, В. М. Возможности дистанционного зондирования северного морского пути с использованием геосинхронных орбит / В. М. Владимиров, Л. В. Границкий, Е. Г. Лапухин // Успехи современной радиоэлектроники. – 2015. – №10. – С.123-126.

А4. Владимиров, В. М. Зеркально-линзовый расширитель лазерного пучка / В. М. Владимиров, Е. Г. Лапухин, Л. В. Границкий // Вестник СибГАУ. –2016. – Т. 17, № 4. – С. 936–944.

А5. Владимиров, В. М. Оптическая составляющая спутникового лазерного дальномера для многоцветной дальномерии / В. М. Владимиров, Л. В. Границкий, Е. Г. Лапухин // Вестник СибГАУ. – 2017. – Т. 18, № 1. – С. 195–204.

А6. Владимиров, В. М. Влияние дополнительных группировок спутников на доступность навигационной системы ГЛОНАСС / В. М. Владимиров, Е. Г. Лапухин, В. А. Борисов // Вестник воздушно-космической обороны. – 2023. – № 1 (37). – С. 32–46.

### **б) патенты на полезную модель**

А7. Зеркально-линзовый расширитель лазерного пучка: пат. № 157295 Российская Федерация МПК G02B 23/02 / Е. Г. Лапухин, В. М. Владимиров, Л. В. Границкий; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева» – № 2015119688; заявл. 25.05.2015; опубл. 27.11.2015, Бюл. № 33. 9 с.

А8. Ахроматический двухволновой расширитель лазерного пучка: пат. 158459 Российская Федерация МПК G02B23/00 / Е. Г. Лапухин, В. М. Владимиров, Л. В. Границкий; заявитель и патентообладатель ООО «НПФ «Электрон» – № 2015112066/28; заявл. 21.07.2015; опубл. 10.01.2016, Бюл. № 1. 8 с.

А9. Двухволновой расширитель лазерного пучка: пат. № 161082 Российская Федерация МПК G02B 23/02. / Е. Г. Лапухин, В. М. Владимиров, Л. В. Границкий; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева» – № 2015145748; заявл. 23.10.2015; опубл. 10.04.2016, Бюл. № 10. 8 с.

## в) свидетельства на программы для ЭВМ

А10. Определение полосы радиовидимости спутника за определенный интервал времени: прогр. для ЭВМ, свидетельство №2022612837 Российской федерация / **Е. Г. Лапухин**, Р. В. Лапко; заявитель и правообладатель ФГБОУВО СибГУ им. М. Ф. Решетнева - №2022612837; заявл. 09.02.2022; опубл. 01.03.2022.

А11. Расчет экваториальных и горизонтальных топоцентрических координат космического аппарата: прогр. для ЭВМ, свидетельство №2014611970 Российской федерация / **Е. Г. Лапухин**, В. М. Владимиров, Л. В. Границкий; заявитель и патентообладатель «Сибирский государственный аэрокосмический университет». № 2014611970; заявл. 11.03.2014; опубл. 20.05.2014.

А12. Расчет элементов орбиты КА методом Гаусса по трем положениям (в топоцентрической экваториальной системе координат) и формирование TLE: прогр. для ЭВМ, свидетельство №2014611962 Российской федерация / **Е. Г. Лапухин**, В. М. Владимиров, Л. В. Границкий; заявитель и патентообладатель «Сибирский государственный аэрокосмический университет». № 2014611962; заявл. 11.03.2014; опубл. 20.05.2014.

## г) прочие публикации

А13. **Лапухин, Е. Г.** МКА «Юбилейный-2». Расчет положения, ПЗС- наблюдения, анализ / Е. Г. Лапухин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : тез. IX Всерос. науч.-практ. конф. творческой молодежи : в 2 т. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2013. – Т. 1. – С. 133–135.

А14. **Лапухин, Е. Г.** Программа для расчета орбитальных элементов искусственного спутника Земли по трем наземным оптическим наблюдениям / Е. Г. Лапухин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : тез. X Всерос. науч.-практ. конф. творческой молодежи : в 2 т. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2014. – Т. 1. – С. 135–136.

А15. **Лапухин, Е. Г.** Коллимация лазерного пучка в спутниковых лазерных дальномерах / Е. Г. Лапухин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : тез. XI Всерос. науч.-практ. конф. творческой молодежи. – Красноярск : СибГАУ, 2015. – Т. 1. – С. 172–173.

А16. **Лапухин, Е. Г.** Объектив камеры сопровождения для спутникового лазерного дальномера оптического диапазона /, В. М. Владимиров, Л. В. Границкий // Решетневские чтения : материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2015. – Ч. 1. – С. 529–531.

А17. **Лапухин, Е. Г.** Коллиматор для двуволнового лазерного спутникового дальномера / Е. Г. Лапухин // Физика космоса : тр. 44-й Междунар. студенческой науч. конф. – Екатеринбург, 2015. – С. 160.

А18. **Лапухин, Е. Г.** Расчет координат космического аппарата в экваториальной и горизонтальной топоцентрической системе координат / Е. Г. Лапухин // ВНКСФ-20 : сб. тез. – Екатеринбург, 2014. – С. 360–362.

А19. **Лапухин, Е. Г.** Спутниковый лазерный дальномер ЛД-2. Смена

поколений / Е. Г. Лапухин // ВНКСФ-21 : сб. тез. – Екатеринбург, 2015. – С. 339–340.

А20. Владимиров, В. М. Оптическая составляющая спутникового лазерного дальномера для многоцветной дальнометрии / В. М. Владимиров, Л. В. Границкий, Е. Г. Лапухин // Решетневские чтения : материалы XX Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2016. – Ч. 1. – С. 593–595.

А21. **Лапухин, Е. Г.** Оптическая система лазерного спутникового дальномера / Е. Г. Лапухин // ВНКСФ-23 : сб. тез. – Екатеринбург, 2017. – С. 288–289.

А22. Опыт наблюдения малого КА «М. Решетnev» на лазерной станции в Иркутске / В. М. Владимиров, Г. И. Модестова, **Е. Г. Лапухин** [и др.] // Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО-2017) : тез. докладов. – СПб., 2017 – С. 82–83.

А23. Владимиров, В. М. МКА «Юбилейный-2»: расчет целеуказаний, оптические наблюдения и лазерная локация / В. М. Владимиров, **Е. Г. Лапухин**, Г. И. Модестова, и др. // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : тез. III Междунар. науч.-практ. конф. творческой молодежи : в 2 т. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2017. – Т. 1. – С. 281–283.

А24. Владимиров, В. М. Синхронное наблюдение Арктики и Антарктики в оптическом и радиодиапазонах / В. М. Владимиров, В. А. Юксеев, **Е. Г. Лапухин** // «Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии» - (ВРК-2018): тезисы докладов. / 17-21 сентября 2018, – Санкт-Петербург, С. 19.

А25. Владимиров, В. М. Эволюция геосинхронной ретроградной орбиты для мониторинга Северного морского пути и Антарктики / В. М. Владимиров, В. А. Юксеев, **Е. Г. Лапухин** // Решетневские чтения : материалы XXII Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2018. – Ч. 1. – С. 518–519.

А26. Владимиров, В. М. Оптическая система для мониторинга Северного морского пути и Антарктики в УФ, видимом и ИК-диапазонах / В. М. Владимиров, **Е. Г. Лапухин**, В. А. Юксеев // Решетневские чтения : материалы XXII Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2018. – Ч. 1. – С. 520–521.

## Библиографические ссылки

1. Максимцев, С. А. Атмосферная поправка в результаты оптических измерений расстояний до внеатмосферных объектов / С. А. Максимцев // Всесоюзное научно-практическое совещание по проблемам совершенствования аппаратурных средств и таблиц для определения рефракции электромагнитных волн в земной атмосфере : тез. докладов. – Иркутск : СФ ВНИИФТРИ, 1984. – С. 79–81.
2. Нелюбина, В. П. Точность определения рефракционных поправок в оптической дальномерии / В. П. Нелюбина, Н. Ф. Нелюбин // Рефракция оптических волн в атмосфере. – Томск : Томский филиал СО АН СССР, 1982. – 186 с.
3. Нелюбин, Н. Ф. Учет влияния атмосферы при измерениях зенитных расстояний и наклонных дальностей : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Нелюбин Николай Федорович. – Львов, 1984. – 21 с.
4. Прилепин, М. Т. О новом способе вычисления рефракции с использованием дисперсии света / М. Т. Прилепин. – М. : Труды ЦНИИГАИК. – 1957. – Вып. 114. – С. 127.
5. Abshire, J. B. Atmospheric Refractivity Corrections in Satellite Laser Ranging / J. B. Abshire, C. S. Gardner // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1985. – Vol. GE-23, No. 4. – P. 414–425.
6. Wijaya, D. Accurate atmospheric correction of two-frequency SLR observations / D. Wijaya, F. Brunner // Proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging. – 2008. – P. 130–136.
7. John J. Degnan. Millimeter Accuracy Satellite Laser Ranging: A Review. Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Technology. Geodynamics Series. V. 25. American Geophysical Union Washington, D. C., 1993, p. 133-162.
8. Мещеряков Н. А., Тиссен В. М. Компактный лазерный излучатель мощных импульсов наносекундной длительности для локации. Сибирская Государственная Геодезическая Академия. Вестник СГГА. – Вып. 6, Новосибирск, 2001. – С. 157-162.
9. F Hoots, F. R. Spacetrack Report No. 3: Models for Propagation of NORAD Element Sets / F. R. Hoots, R. L. Roehrich. – December 1980. Compiled and distributed by TS Kelso, 31 December 1988 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: archive.afit.af.mil (дата обращения: 24.03.2017).
10. Vallado, D. A. Fundamentals of Astrodynamics and Applications / D. A. Vallado. – Microcosm Press, 2013. – 1106 p
11. Эскобал, П. Методы определения орбит / П. Эскобал. – М. : Мир, 1970. – 472 с.