

На правах рукописи



**ДМИТРИЕВ АНДРЕЙ ОЛЕГОВИЧ**

**МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО СЕГМЕНТА  
ЛУННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

Специальность 2.5.13. Проектирование, конструкция, производство,  
испытания и эксплуатация летательных аппаратов

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Химки - 2024

Работа выполнена в Акционерном обществе «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина» (АО «НПО Лавочкина»)

**Научный руководитель:** **Сысоев Валентин Константинович,**  
доктор технических наук

**Официальные оппоненты:** **Щеглов Георгий Александрович,**  
доктор технических наук, профессор, профессор  
кафедры «Аэрокосмические системы»,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Московский государственный технический  
университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана), г. Москва

**Тугаенко Вячеслав Юрьевич,**  
доктор технических наук, главный специалист  
отдела проектирования и интеграции  
научных аппаратурных комплексов,  
Публичное акционерное общество  
«Ракетно-космическая корпорация «Энергия»  
имени С.П. Королёва» (ПАО «РКК «Энергия»),  
г. Королев

**Ведущая организация:** **Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Московский государственный  
университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ  
имени М.В. Ломоносова), г. Москва**

Защита состоится 21 ноября 2024 года в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.09 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, дом 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Московского авиационного института (национального исследовательского университета) и на сайте: [https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT\\_ID=182045](https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=182045)

Отзывы, заверенные печатью, просим выслать по адресу:  
Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, 125993

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.327.09,  
к.т.н.



Стрелец Дмитрий Юрьевич

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы исследования**

Будущее освоение Луны предполагает сложные исследования, проведение которых возможно только при высокоточной навигации объектов, находящихся на Луне: посадочных станций, луноходов, пилотируемых аппаратов.

Земные глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) с успехом функционируют многие годы, обеспечивая пользователей возможностью определения своего положения на поверхности с точностью до 5 м. Имеющиеся технические решения проектирования таких спутниковых систем допустимо применить и для позиционирования объектов на Луне, что является затруднительным по ряду причин:

1. Существующие ГНСС (Galileo, GPS, ГЛОНАСС, Бэйдоу) опираются на сеть многочисленной спутниковой группировки, чтобы у любого наземного клиента системы была возможность в любой момент времени принимать сигналы как минимум от четырёх спутников. По сигналу, принимаемому со спутника, приемник на Земле вычисляет задержку сигнала до каждого спутника и, по известному положению спутников в пространстве относительно друг друга, определяет свои координаты. ГНСС рассчитаны на большое количество потребителей, и их работа оправдана экономической рациональностью: стоимость одного приёмника, существенно ниже стоимости приборов для определения тех же координат другими способами (астрономическими, геодезическими и т.д.) при аналогичной точности. При построении лунной навигации число потребителей в ближайшие годы и десятилетия будет измеряться единицами, что делает стоимость определения координатных измерений одного потребителя несколькими спутниками экономически невыгодной.

2. ГНСС в околоземном пространстве не могут функционировать без поддержки наземных станций по измерению координат КА и геодезического обеспечения. Орбитальные характеристики каждого спутника навигационной группировки должны быть уточнены с помощью эфемеридного обеспечения. Для

поддержки космических навигационных группировок на Земле развернуты несколько сотни наземных станций. Строить аналогичный сегмент на Луне в обозримом будущем не видится возможным как с технической, так и с экономической точек зрения.

3. Требуемый срок службы для современной космической техники составляет не менее 10-15 лет. Следовательно, спутниковая группировка глобальной системы позиционирования должно обновляться, а также резервироваться на случай сбоев. В итоге количество аппаратов группировки будет значительно превышать количество потребителей на лунной поверхности.

Анализ спутниковых систем навигации, основанных на радиотехнических измерениях, показывает, что для построения такой системы на Луне необходимо до 18 спутников и обязательное наличие налунного комплекса. **Актуальность** диссертационного исследования состоит в необходимости создания космического сегмента навигационного обеспечения для Луны с минимальным количеством КА и элементов налунного сегмента, способного функционировать с самого первого этапа и обладающего потенциалом для дальнейшего увеличения точности измерения и охвата лунной поверхности на последующих этапах развертывания.

### **Степень разработанности темы**

Построение автономной радионавигационной системы для Луны, аналогичной земной, представляли в своих работах специалисты из АО «ЦНИИмаш» и АО «ИСС». Вопрос построения группировки таких спутников рассматривали специалисты АО «НПО Лавочкина».

Радионавигационную систему, опирающуюся на ретрансляцию сигнала земных GPS, разрабатывали как отечественные (ПАО «РКК «Энергия»), так и зарубежные группы исследователей (Caltech).

Использование сети пенетраторов с радиотехническими устройствами на Луне, которая поддерживается наземной системой радиоинтерферометрии (VLBI) рассматривалось в работе исследовательской группы из Space Initiatives Inc.

Таким образом, мировые научно-технические организации при разработке проектов систем для навигации на Луне используют в основном

радионавигационные методы. Проработка оптических методов навигации, лишенных ряда минусов, присущих радионавигации, является недостаточной.

**Объектом исследования** является космический сегмент для обеспечения навигации на Луне.

**Предметом исследования** является использование оптических методов и средств при построении лунной навигационной системы.

**Целью исследования** является разработка методики проектирования космического сегмента лунной оптической навигационной системы, облика и параметров космических аппаратов, входящих в систему.

**Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:**

1. Разработка показателей и критерия оценки эффективности космических систем для решения задачи позиционирования налунных объектов на основе анализа имеющегося мирового научно-технического опыта в данной области.

2. Разработка проекта варианта построения космического сегмента трехспутниковой системы навигации для Луны на основе оптических средств.

3. Определение рациональных параметров аппаратуры и проектного облика космических аппаратов в точке Лагранжа и на полярной орбите для проектирования орбитального сегмента в составе лунной навигационной системы.

4. Определение состава космических аппаратов с учетом возможностей имеющихся и разрабатываемых отечественных космических аппаратов для реализации лунной навигационной системы.

5. Выбор конструкторских решений и источников излучения для налунного сегмента (светового маяка) исходя из особенностей лунной поверхности.

**Научная новизна работы** состоит в том, что:

1. Разработана методика проектирования космической системы, решающей задачу позиционирования объектов на поверхности Луны с помощью впервые

предложенного метода определения положения объектов на Луне оптическими средствами.

2. Разработан проектный облик космического сегмента лунной оптической навигационной системы, состоящего из двух аппаратов в точках Лагранжа и полярного аппарата связанных с налунными реперными светоизлучающими маяками.

3. Определены рациональные параметры оптического тракта навигационной системы, позволяющие осуществлять навигацию на Луне с наименьшими энергетическими затратами при соблюдении требований по точности и оперативности измерений.

**Теоретическая значимость** работы состоит в разработке методики проектирования космического сегмента, в проведении исследований и определении рациональных параметров КА для реализации лунной оптической навигационной системы при наличии ограничений.

**Практическая значимость** результатов состоит в том, что снижается количество КА в системе и уменьшаются затраты и время на проектирование КА и реализацию системы при соблюдении требований по точности и оперативности для лунных потребителей.

Практическая значимость диссертации подтверждается следующим:

- методика построения космического сегмента для осуществления навигации на Луне и определение рациональных параметров оптической приемно-передающей системы внедрены в отчеты составной части научно-исследовательской работы «Обоснование требований к навигации при решении задач на орбите Луны и ее поверхности. Разработка предложений по структуре ОГ и принципам управления ЛНСС» в НИР «Комплексные исследования и научно-техническое обоснование использования перспективных технологий в системе ГЛОНАСС» (НИР «Вызов»), что подтверждается **актом о внедрении научных результатов АО «ЦНИИмаш»;**

- методика построения космического сегмента с применением оптических средств для осуществления навигации на Луне использовалась в предложениях АО

«НПО Лавочкина» для проекта лунной программы, а результаты диссертационного исследования использовались при выполнении составной части научно-исследовательской работы «Исследование проблемных вопросов создания лунного грузового посадочного корабля» (СЧ НИР «Пастораль-2 – НПО-Л – Луна»), что подтверждается **актом о внедрении научных результатов** АО «НПО Лавочкина».

### **Методология и методы исследования**

В работе применены методы системного проектирования космических систем и аппаратов, методы проектирования систем ДЗЗ и расчетные методы определения характеристик оптической аппаратуры.

Модифицирован методический подход, рассмотренный в работах В.В. Хартова, В.В. Ефанова, К.А. Занина, А.А. Лебедева, О.П. Нестеренко, Т.П. Мишуры, А.В. Багрова, С.А. Каплева.

### **Положения, выносимые на защиту**

На защиту выносятся:

1. Проектный облик космического сегмента, позволяющий минимизировать количество космических аппаратов необходимых для навигационного обеспечения Луны при соблюдении требуемых показателей точности и оперативности.

2. Требования к составу космического сегмента оптической навигационной трехспутниковой системы и космических аппаратов в точках Лагранжа и полярного космического аппарата, базирующихся на проектах АО «НПО Лавочкина».

3. Методика расчета и определения характеристик поверхностного сегмента лунной оптической навигационной системы с использованием маяков на базе ультрафиолетовых светодиодов, позволяющая оценивать минимальную энергетику необходимую для осуществления контроля оптическими средствами при соблюдении требуемых показателей точности и оперативности.

**Достоверность и обоснованность исследования** обусловлена корректным применением методов рационального проектирования технических систем, методов экспертных оценок и методов проектного моделирования, а также

подтверждается адекватностью частных результатов и использованием известных разработок.

### **Апробация работы**

Основные результаты и положения диссертации доложены и обсуждены на международных и всероссийских научных конференциях:

1. Варианты оснащения поверхностных станций для навигации на Луне «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики 2021» (МАИ, 22.11.2021 г.).

2. XLV академические чтения по космонавтике посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства (Химки, 30 марта-2 апреля 2021 г.).

3. VI Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Орбита молодежи» 2020 (Москва, 28-30 сентября 2020 г.).

4. I международная научно-практическая конференция: «Космическая философия-Космическое право-Космическая деятельность: триединство космического прорыва человечества», цифровая платформа RKO.NBICS.NET (23-24 мая 2020 г.).

5. XLIV академические чтения по космонавтике посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства (Химки, 28-31 января 2020 г.).

6. V Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Орбита молодежи» и перспективы развития российской космонавтики» (Санкт-Петербург, 16-21 сентября 2019 г.).

7. XVI конференция молодых ученых, посвященная дню космонавтики «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (Москва, ИКИ РАН 15-17 апреля 2019 г.).

8. Конференция-форум Федерации космонавтики России «Космос: взгляд в будущее» (МЭИ, 14.12.2017 г.).

9. Всероссийский межотраслевой конкурс научно-технических работ «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики 2017» (МАИ, 21.11.2017 г.).



**Содержание диссертации изложено** в 8-ми публикациях, в том числе в 4-х публикациях в изданиях Перечня ВАК по специальности 2.5.13. и в 4-х публикациях по смежным специальностям. Получено 2 патента на изобретение и полезную модель. Имеются награды за выступления по указанной тематике на всероссийских научно-технических конференциях: лауреат Всероссийского межотраслевого конкурса научно-технических работ «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики 2017», победитель конкурса Федерации космонавтики России «Космос: взгляд в будущее» 2017, победитель VI Всероссийского молодежного конкурса научных работ «Орбита молодежи» 2020.

### **Личный вклад автора**

Исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Исследования включают постановку задачи, разработку расчётных и аналитических методов, а также обработку и анализ полученных результатов, представленных в выносимых на защиту положениях. Автор подготовил публикации, отражающие содержание диссертации, и лично выступал с докладами по выполненной работе.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 105 наименований, изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка, 8 таблиц и 1 приложение. Диссертация соответствует пунктам 1, 2, 3, 5 паспорта специальности 2.5.13. «Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов».

### **Основное содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, раскрыта степень разработанности темы, сформулированы объект и субъект исследования, а также цель диссертационной работы и задачи, которые необходимо решить для ее достижения, отмечаются научная новизна, теоретическая и практическая значимость проведенных исследований. Перечислены методы исследования и положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность исследования,

представлена апробация работы на конференциях и публикации, в которых изложены основные научные результаты, а также отмечен личный вклад автора и соответствие темы диссертации паспорту специальности.

**В Главе 1** выполнен обзор работ, посвященных построению лунных навигационных систем, и анализ предлагаемых вариантов осуществления навигационного обеспечения на Луне.

По итогам анализа выделены основные типы навигационных систем, предлагаемых к разработке российскими и иностранными исследователями (Таблица 1). Конечно, есть еще ряд концепций, например, навигация по пульсарам, но они еще сложнее в реализации и хуже по точности, чем рассматриваемые выше варианты.

Таблица 1 - Сравнительная таблица с доступными данными по точности навигационных систем

	Количество КА	Налунный сегмент	Автономность	Глобальность	Планируемая точность
1. Радионавигационная автономная система с налунным сегментом	9-18	+	+	+	5-20 м
2. Радионавигационная система с земным GPS	2	-	-	+	50 м
3. Радионавигационная система с земными радиоинтерферометрами	0	+	-	-	6 м
4. Автономная навигационная система без КА	0	+	+	-	35 м
5. Оптическая навигационная система	3	+	+	+	10 м

Это, в первую очередь, радионавигационные системы, которые условно можно поделить на 3 главных группы:

- системы, основанные на постоянном контакте с земными системами;
- автономные от земной навигации системы (т.е. не использующие в качестве опоры земные системы ГЛОНАСС, GPS и т.д.) с опорными налунными пунктами;
- автономные системы без опорных налунных пунктов.

Для оценки эффективности сформирована системы критериев и показателей эффективности, которые представляют собой совокупность важнейших параметров, учитывающие его физические параметры, стоимость, конструктивные и технологические особенности.

На основе обзора проектов лунных навигационных систем определены следующие частные показатели  $F_i$ :

- 1) Количество КА в космическом сегменте  $N$ ;
- 2) Количество и сложность элементов налунного сегмента  $M$ .
- 3) Точность навигации  $R$ ;
- 4) Глобальность (возможность наблюдения за всей поверхностью Луны)  $G$ ;
- 5) Автономность (отсутствие зависимости от околоземных/наземных систем)  $A$ .

Критерий эффективности лунной навигационной системы можно представить в виде функции зависящей от совокупности этих показателей. Задачу выбора лунной навигационной системы и оценки ее эффективности можно представить, как задачу минимизации критерия эффективности  $F$ . Зависимость между показателями количества КА и налунных элементов, точности навигации, автономности и глобальности невозможно установить из-за их различной физической сущности этих показателей.

Используя метод линейной свертки частных критериев получаем результирующий критерий эффективности  $F$ :

$$F = p_1 N' + p_2 M' + p_3 R' + p_4 G' + p_5 A' \quad (1)$$

Заключение по итогам анализа предлагаемых лунных навигационных систем:

1. У всех видов систем есть как свои плюсы, так и недостатки. В случае радионавигационных систем это или наличие обязательной привязки к Земле (следовательно, задержки при получении любых сигналов на таком расстоянии), или большое количество КА, или сложный налунный сегмент. Системы с гравитационными измерениями и использованием искусственного интеллекта не могут полностью выполнить задачи глобальной лунной навигации.

2. Важнейшим фактором является общее количество структурных единиц системы, связанных между собой и задействованных при решении навигационных задач. Такими единицами, прежде всего, являются космические аппараты, обеспечивающие работу этой системы, но также к ним можно отнести налунные и наземные пункты. Из таблицы 1 видно, что большинство систем оперирует большим количеством таких структурных единиц, и только лунная оптическая навигационная система обладает наименьшим количеством спутников, сохраняя при этом автономность и глобальность навигации.

3. Предложенная в моем исследовании лунная оптическая навигационная система решает многие проблемы и недостатки указанных выше современных проектов и предложений в области навигации на Луне и позволяет получать высокую точность определения объектов на поверхности Луны при малой орбитальной группировке из 3 КА.

**В Главе 2** детально рассмотрен предлагаемый проект - лунную оптическую навигационную систему (ЛОНС) и методика проектирования данной системы (Рисунок 1). Система, предложенная в работе, предполагает создание селенодезической системы координат на основе оптических лазерных диодов, такие же диоды предполагается размещать на исследуемых объектах (станциях, луноходах и т.д.). Наблюдения этих маяков с помощью оптических систем на низкоорбитальных спутниках и спутниках в точках Лагранжа (Рисунок 2) позволит построить поэтапную лунную навигационную систему с точностью до 10 метров.

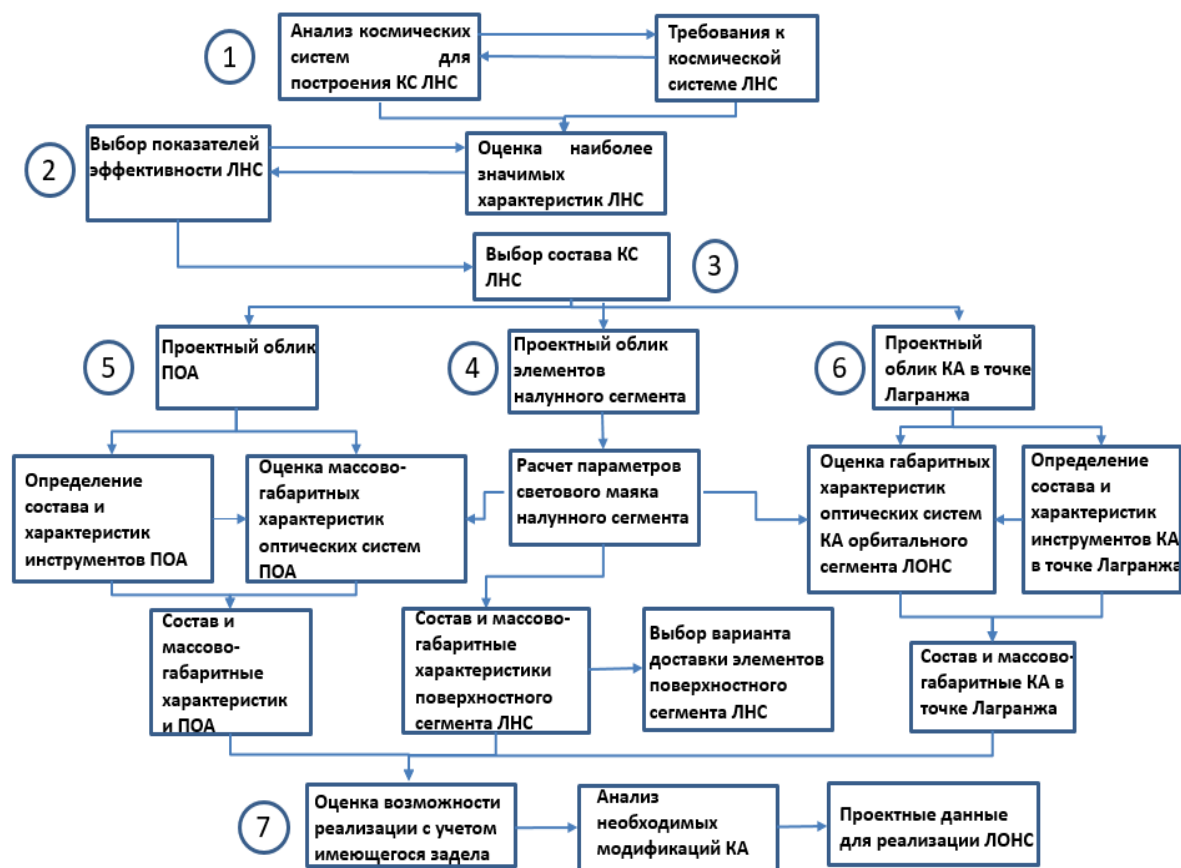


Рисунок 1 - Методика проектирования космического сегмента ЛОНС

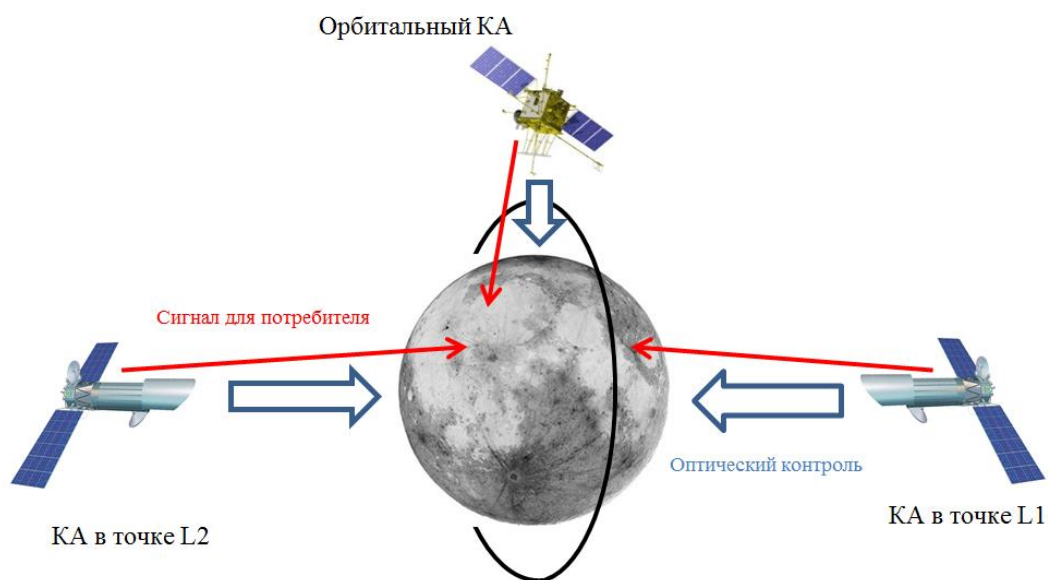


Рисунок 2 – Схема построения глобальной оптической лунной навигационной системы

Суть развиваемого подхода состоит в замене напланетных астропунктов с функцией измерения топоцентрических координат звезд на угломерные измерительные устройства в составе искусственных спутников Луны (ИСЛ) и размещении на поверхности Луны световых индикаторов измеряемых объектов. Поскольку размер световых излучателей на основе лазерных диодов составляет  $1 \div 2$  мм и в будущем будет только уменьшаться, а положение центра изображения излучателя можно определить с погрешностью меньше линейных размеров излучателя, то координатные измерения положений светоизлучающих маяков могут быть выведены на субмиллиметровый уровень точности.

Предложена схема поэтапного построения ЛОНС:

**Этап №1** – Создание первоначальной сети реперных маяков для построения единой селенографической системы координат;

**Этап №2** – Измерение координат первых маяков с помощью полярного орбитального аппарата;

**Этап 3** – Запуск КА в точку Лагранжа для осуществления постоянного глобального контроля за диском Луны.

**В Главе 3** выделены основные узлы оптического тракта ЛОНС и разработан алгоритм расчета их параметров. Оптический тракт состоит из взаимодействия излучателя (маяка) и приемной системы (оптических комплексов на КА). Важнейшей задачей является определение энергетических характеристик налунного сегмента. Для этого разработан алгоритм расчета энергетических характеристик оптического тракта (Рисунок 3).

Выбор длины волны светового маяка определяется отражательной способностью лунного грунта и спектральной чувствительностью оптических приборов наблюдения. Поэтому возможен выбор двух типов излучателей: на длинах волн  $\lambda=0.85$  мкм и  $\lambda=0.28$  мкм. Если мощность поверхностного излучения в лунный день для случая с ПОА не сильно отличается от необходимой для обнаружения сигнала на ПЗС-матрице мощности, то для КА в точке Лагранжа 3,7 кВт это колоссальная цифра. Такую мощность источника никак не удастся обеспечить в налунном маяке.

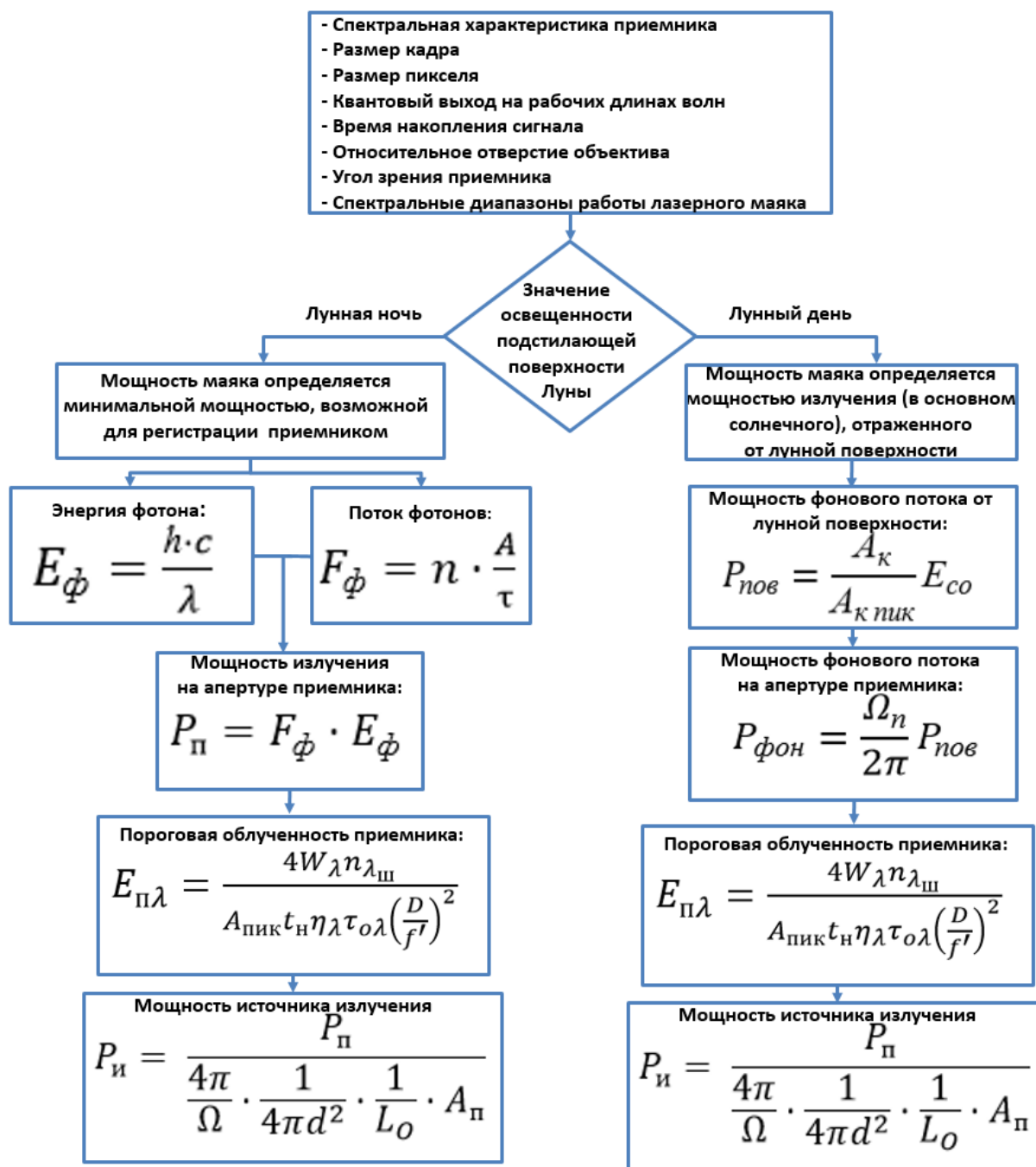


Рисунок 3 – Обобщенный алгоритм расчета энергетических характеристик системы связи

Таким образом, единственный вариант для обеспечения глобальной навигации на Луне из точки Лагранжа это использование ультрафиолетового источника, которому не придется превышать шум отраженного солнечного излучения. Для орбитального КА и лунного дня получаются следующие значения 196 мВт при соотношении сигнал/шум равному 10.

За ориентир при разработке методики проектирования выбирается самый близкий аналог – системы ДЗЗ. Показатели качества характеризуют пригодность КА с оптической системой к выполнению ею своего целевого назначения. Как правило туда входят геометрические и географические параметры наблюдаемых районов и объектов, периодичность этих наблюдений; спектральные характеристики, пространственное разрешение получаемых с помощью оптической аппаратуры изображений, а также их обзорность. Поскольку эти показатели зависят от случайных факторов, то в общем случае можно говорить о вероятности того, что эти показатели принимают те или иные значения.

В случае проектирования ЛОНС следует выделить показатели качества: разрешение, обзорность и периодичность. Разрешение выражает предельная разрешающая способность, которая определяется по формуле, связанно с критерием Рэлея. Предельная разрешающая способность по Рэлею  $\Delta l$  – это минимальное расстояние между двумя точками, при котором их изображение отличимо от изображения одной точки. Вычисляется оно умножением углового разрешения на расстояние до объекта  $H$ :

$$l = 1,22 \frac{\lambda H}{D} , \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны света, а  $D$  — диаметр апертуры линзы. Коэффициент 1,22 получен из расчета положения первого темного круглого кольца, окружающего центральный диск Эйри в дифракционной картине.

Обзорность также напрямую зависит от расстояния до объекта, но еще и от угла обзора  $\gamma$  оптической аппаратуры КА:

$$S = \pi H^2 \operatorname{tg}^2 \gamma , \quad (2)$$

$$\gamma = 2 \arcsin \left( \frac{R_{\text{Л}}}{R_{\text{Л}} + H} \right) , \quad (3)$$

где  $R_{\text{Л}}$  – радиус Луны.

Показатели эффективности отвечают за оптимизацию реализации системы. В рамках нашей методики нас будет в первую очередь волновать не стоимостная оценка или оценка надежности (это не является прямой целью моего исследования, а косвенно достигается использованием имеющегося



задела), а показатель оперативности поступления информации пользователю. Общая оперативность определяется выражением:

$$\tau = \tau_{ап} + \tau_{обр} + \tau_{пер} , \quad (4)$$

где  $\tau_{ап}$  – оперативность аппаратуры (время от начала наблюдения до готовности информации к обработке),

$\tau_{обр}$  - время обработки информации,

$\tau_{пер}$  - время передачи информации пользователю

Главной составляющей является оперативность аппаратуры:

$$\tau_{ап} = \frac{H(Rл + H)^{3/2}}{2Rлtg\gamma f^2 r^2 \sqrt{\mu}} \quad (5)$$

При выборе оптической аппаратуры важно понять на какие размерные характеристики оптики, расположенной на КА, можно рассчитывать при проектировании ЛОНС.

На общие массо-габаритные характеристики оптической аппаратуры в первую очередь будет влиять зеркальная схема. В качестве основных проектных параметров, наиболее полно характеризующих качество оптической системы, необходимо выбрать угловое поле зрения и разрешающую способность. Ограничениями являются масса и габариты ОС.

Для реализации оптической системы на КА в точке Лагранжа оценочные проектные значения массы и длины оптической системы (Рисунок 4) можно рассчитать по следующим формулам:

$$M_T = 2\rho_{ос}(1 + \varepsilon_0)^2 \left(1,22 \frac{\lambda H}{l}\right)^2 \quad (6)$$

$$L_T = Nk_{\alpha} \left(1,22 \frac{\lambda H}{l}\right) , \quad (7)$$

где  $\rho_{ос}$  – удельная масса одного квадратного метра зеркала,

$\varepsilon_0$  – линейное центральное экранирование,

$N$  – относительное фокусное расстояние,

$k_\alpha$  – коэффициент уменьшения длины.

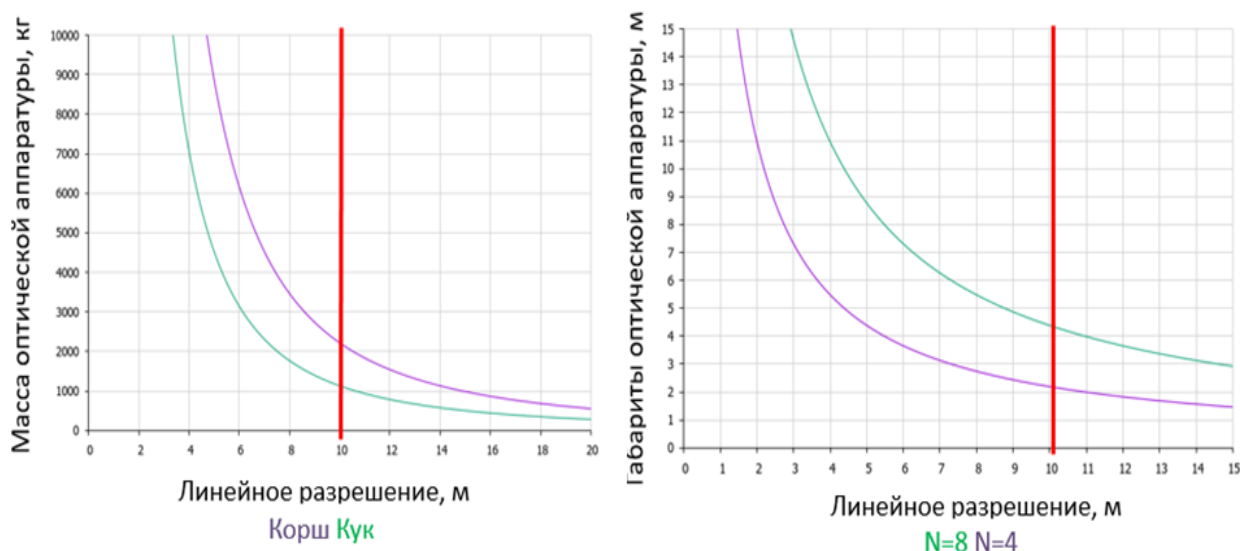


Рисунок 4 - Проектная оценка зависимости массы и габаритов оптической аппаратуры КА от линейного разрешения на поверхности Луны для точки Л1

Используя полученные значения массогабаритных характеристик можно оценить значения показателей качества и эффективности для КА ЛОНС.

**В Главе 4** проведена оценка реализации лунной оптической навигационной системы с использованием разрабатываемых КА.

Состав поверхностного сегмента лунной навигационной системы состоит из двух типов светоизлучающих маяков:

- «опорных», которые служат неподвижными реперными точками для построения селенодезических систем координат, и представляют собой маленькие автономные станции, доставленные, например, пенетраторами (рисунок 5);
- «динамических», которые устанавливаются на исследовательские посадочные станции, включая луноходы, и которые являются индикаторами позиционируемых объектов.

Оценка реализации орбитального сегмента показала, что возможно использование уже имеющихся разработок НПО Лавочкина при доработке и модификации КА под задачи лунной навигации, а именно КА «Луна-26» для ПОА и «Спектр-УФ» для КА в точке Лагранжа. Из основных добавленных систем это

установка БСУ на оба КА, а также установка высотомера и систему доставки пенетраторов. Как уже было сказано выше использование даже имеющихся оптических систем позволит достичь данные показатели точности.



Рисунок 5 – Состав автономного оптического маяка-пенетратора:

### Заключение

Разработана методика проектирования космического сегмента лунной оптической навигационной системы.

**Основные новые научные результаты, полученные в диссертационной работе, состоят в следующем:**

1. Проведенный анализ параметров имеющихся проектов по построению лунных навигационных систем выявил ряд их существенных недостатков, таких как: недостаточное разрешение; большое количество КА в орбитальной группировке; высокая сложность станций налунного сегмента; отсутствие

глобального покрытия поверхности; отсутствие автономности от околоземных систем.

2. Разработан критерий оценки эффективности космической системы для обеспечения навигации для Луны, позволяющий оценить каждую систему и роль каждого параметра в суммарном критерии, а также определить какие параметры играют наиболее важную роль в проектировании космической системы для навигации на Луне.

3. С использованием предложенной методики разработан проект новой навигационной космической системы, автономной от наземных навигационных систем и основанной на применении КА с оптическими системами с использованием налунных световых реперов, что позволяет обеспечить точность навигации порядка 1 метра для наблюдения с полярного аппарата и порядка 10 метров для КА в точке Лагранжа. Разработанная навигационная система позволяет сократить количество КА до 3 (один КА на полярной орбите и два КА в точках Лагранжа), тогда как у существующих проектов количество КА варьируется от 6 до 18.

4. На основе разработанной методики предложен новый проектный облик и определены основные рациональные проектные параметры космических аппаратов на полярной орбите в и точках Лагранжа, такие как: разрешение, обзорность, периодичность, оперативность и массогабаритные характеристики КА.

5. Предложен состав КА и вариант реализации лунной оптической навигационной системы на космических аппаратах АО «НПО Лавочкина» с использованием имеющихся научно-технических средств и учетом необходимых модификаций служебных систем и увеличения угла поля зрения оптической системы на КА в точке Лагранжа до  $3^\circ$  для осуществления навигации за всей поверхностью Луны. Выявленная область проектных параметров позволяет сократить время проектирования космических систем для навигации. Данное предложения по составу КА показывает возможность реализации системы с уже имеющимся научно-техническим заделом

6. В рамках предложенной методики разработаны расчётные методы определения необходимых энергетических характеристик аппаратуры приемно-передающей системы космического сегмента, основанные на адаптации расчета характеристик источника света под особенности задач идентификации объекта излучения на лунной поверхности и позволяющие определять необходимую мощность налунных реперов, спектр излучения, а также параметры, влияющие на габариты приёмной оптики.

7. В результате проведенных исследований разработаны рациональные проектные решения по составу, конструкции и методам доставки принципиально нового элемента космических систем - поверхностного сегмента ЛОНС, который позволит получить телесный угол излучения  $120^\circ$  на каждом автономном светоизлучающем маяке, используя 13 лазерных диодов с углами расходимости светового пучка  $25^\circ$  на каждом диоде, для обеспечения постоянной доступности налунного светоизлучающего маяка для приемника КА.

**Перспективы дальнейшей разработки темы** состоят в следующем:

- разработка имитационной модели селеноцентрической системы координат для ЛОНС с использованием комплекса световых лазерных маяков;
- разработка летных приборов налунного сектора (оптических маяков);
- проведение цифровое моделирование всей системы в целом и ее взаимодействия с другими проектами лунной программы для определения возможных технических решений при реализации данной системы.

Методику проектирования космического сегмента для ЛОНС можно использовать:

- для реализации навигационной системы на любом безатмосферном небесном теле;
- для реализации навигационной системы на планетах с атмосферой (при возможности подбора источника излучения со спектром, проходящим через данную атмосферу)

**Основные научные результаты диссертации изложены в работах, опубликованных соискателем ученой степени:**

**в периодических изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ по специальности 2.5.13:**

1. Вернигора, Л.В. Радиооптический навигационный лунный маяк-пенетратор: возможные проектные решения [Электронный ресурс] / Л.В. Вернигора, А.О. Дмитриев, П.В. Казмерчук, Е.В. Леун, Ю.В. Панин, В.К. Сысоев // Инженерный журнал: наука и инновации – 2023. – № 9 (141) – Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/arse/dcpa/2303.html>.

2. Багров, А.В. Построение оптической лунной навигационной системы на базе космических аппаратов АО «НПО Лавочкина» / А.В. Багров, А.О. Дмитриев, В.А. Леонов, А.С. Митькин, И.В. Москатиньев, В.К. Сысоев, А.Е. Ширшаков // Космическая техника и технологии. – 2019. – N 4 (27). – С. 12-26.

3. Багров, А.В. Глобальная оптическая навигационная система для Луны [Электронный ресурс] / А.В. Багров, А.О. Дмитриев, В.А. Леонов, А.С. Митькин, И.В. Москатиньев, В.К. Сысоев, А.Е. Ширшаков // Труды МАИ – 2018. – № 99 – Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91814>.

4. Багров, А.В. Система глобального позиционирования для Луны на основе активных световых маяков / А.В. Багров, А.О. Дмитриев, В.А. Леонов, И.В. Москатиньев, В.К. Сысоев, А.Е. Ширшаков, А.Д. Юдин // Вестник «НПО имени С.А. Лавочкина». – 2017. – № 4 (38). – С. 5-10.

**в периодических изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ по смежным специальностям:**

1. Вернигора, Л.В. Концепция высокоточных траекторных измерений с помощью связанной системы бортового оптического дугомера-интерферометра и оптических лазерных маяков / Л.В. Вернигора, П.В. Казмерчук, В.К. Сысоев, А.О. Дмитриев // Труды МАИ – 2021. – № 121. – Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=162662>.

2. Дмитриев, А.О. Анализ вариантов навигационных систем для Луны [Электронный ресурс] / А.О. Дмитриев, И.В. Москатиньев, И.М. Нестерин, В.К. Сысоев // Труды МАИ. – 2021. – № 118. – Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=158243>.

3. Вернигора, Л. В. Методика измерения координат лунных посадочных станций с помощью оптических телевизионных средств космических аппаратов [Электронный ресурс] / Л.В. Вернигора, П.В. Казмерчук, В.К. Сысоев, А.О. Дмитриев // Труды МАИ – 2020. – № 114 – Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=118986>.

4. Багров, А.В. Двухволновая оптическая лунная навигационная система [Электронный ресурс] / А.В. Багров, А.О. Дмитриев, В.А. Леонов, И.В. Москатиньев, В.К. Сысоев // Труды МАИ – 2020. – № 112 – Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=116356>.

**свидетельства о государственной регистрации изобретения или полезной модели:**

1. Патент РФ на полезную модель № 225946, МПК В64G 3/00. Лазерный маяк для осуществления позиционирования объектов на поверхности и орбите Луны. Заявка: 2023135911 от 28.12.2023, опубликовано: 14.05.2024 / Дмитриев А.О., Сысоев В.К., Казмерчук П.В., Вернигора Л.В., Леун Е.В., Панин Ю.В. – 11 с.

2. Патент РФ на изобретение № 2692350, МПК В64G1/66. Способ высокоточного позиционирования аппарата на поверхности Луны и устройство для его осуществления. Заявка: 2018126677 от 19.07.2018, опубликовано: 24.06.2019 / А.В. Багров, В.А. Леонов, В.К. Сысоев В.К., А.О. Дмитриев. – 12 с.

**в сборниках трудов международных и всероссийских конференций:**

1. Дмитриев А.О. Варианты оснащения поверхностных станций для навигации на Луне // Сборник аннотаций конкурсных работ XIII Всероссийского межотраслевого конкурса научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики», Москва, 22-26 ноября 2021 г. – Москва: Изд-во Перо, 2021. – С. 117-118.

2. Дмитриев А.О., Москатиньев И.В., Сысоев В.К. Анализ вариантов навигационных систем для Луны // XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства: сборник

тезисов: в 4 т., Москва, 30 марта - 2 апреля 2021 г. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – Т. 3 – С. 436-438.

3. Дмитриев А.О. Проект построения группировки АКА с оптической аппаратурой для осуществления навигации при освоении Луны (концепция, состав аппаратов, этапы построения) // «Орбита молодежи» и перспектива развития российской космонавтики: материалы VI Всероссийской молодежной научно-практической конференции, Пермь, 28-30 сентября 2020 г. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2020. – С. 61-64.

4. Дмитриев А.О. Концепция оптической навигационной связной системы для Луны // V Всероссийский молодежный конкурс научно-технических работ «Орбита молодежи»: Материалы, Санкт-Петербург, 16-20 сентября 2019 г. – Спб: Изд-во Инфо-Да, 2019 – С.106-107.

5. Дмитриев А.О. Построение оптической лунной навигационной системы // XVI Конференция молодых ученых, посвященная Дню космонавтики «Фундаментальные и прикладные космические исследования» ИКИ РАН, Москва, Сборник тезисов докладов, Москва, 15–17 апреля 2019 г. – С. 40-41. – Режим доступа: [https://kmu2019.cosmos.ru/docs/2019/Tezisy\\_KMU\\_2019\\_2.pdf](https://kmu2019.cosmos.ru/docs/2019/Tezisy_KMU_2019_2.pdf)

6. Дмитриев А.О., Багров А.В., Сысоев В.К. Леонов А.В. Определение селеноцентрических координат находящегося на Луне посадочного аппарата // Труды XLV академических чтений по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, 23-26 января 2018 г. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – С. 331-332.

7. Дмитриев А.О. Глобальная оптическая навигационная система для Луны // 9-ый Всероссийский межотраслевой конкурс научно-технических работ «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики». Аннотации конкурсных работ, Москва, 20-24 ноября 2017 г. – Москва: Изд-во Перо, 2017. – С. 163-166.