

УДК 629.78:621.382.2

Анализ параметров излучателя оптического маяка для системы навигации космических аппаратов

Вернигора Л.В.^{1*}, Пичхадзе К.М.², Сысоев В.К.^{1}**

¹*НПО Лавочкина, ул. Ленинградская, 24, Химки, Московская область,
141402, Россия*

²*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

**e-mail: ylv@laspace.ru*

***e-mail: sysoev@laspace.ru*

Аннотация

Оптические наблюдения космических аппаратов (КА) является одним из основных методов наблюдения КА и измерения их характеристик.

Успешное развитие технологии полупроводниковых источников излучения, позволило получить высокоэффективные лазерные диоды с высоким уровнем мощности при малых массогабаритных параметрах, которые позволяют создавать системы оптических маяков на основе таких приборов для навигации космических аппаратов.

В первую очередь это оптические маяки, установленные на посадочных планетных станциях, таких как «Луна-Глоб» / «Луна-Ресурс-1» (а в будущем – на спускаемых на поверхность Марса). Установка таких маяков позволит локализовать местоположение посадочных станций с высокой точностью с помощью оптических телевизионных средств космических аппаратов и наземных станций наблюдения, а

при подключении к радиоизотопному источнику энергии использовать их как маяки для последующих лунных экспедиций.

Для решения задачи проектирования оптических маяков для космических экспедиций в статье описывается созданный алгоритм выбора полупроводникового источника света:

1. Излучение маяка должно уверенно регистрироваться приемной оптической системой: определение необходимой мощности излучателя (выбор мощности излучателя обуславливается чувствительностью приемной наземной оптической системы, расстоянием до КА, углом излучения источника света и конечно временем экспозиции); выбор полупроводникового источника света, позволяющего создавать малорасходящиеся пучки света, что необходимо для передачи этого излучения на большие расстояния; определение необходимого спектра излучения полупроводниковым источником света (допускается широкий выбор спектра излучения полупроводниковым источником света для системы космос-космос, в случае системы КА-Земля выбор спектра излучения обуславливается свойствами атмосферы); временная инерционность оптического маяка не должна превышать частотную характеристику приемной аппаратуры, что необходимо для кодировки сигнала.

2. Оптический маяк должен обеспечивать эксплуатацию в условиях космического полета: миниатюрные масса-габаритные параметры, долгий срок службы, радиационная стойкость, способность работать от низкого напряжения, вибростойкость, высокая эффективность.

Результаты анализа использовались для выбора излучателей, применяемых в оптических лазерных маяках, разработанных в проектах «Луна-Глоб» и «Луна-Ресурс-1».

Ключевые слова: космические аппараты, навигация, маяки, лазеры.

Введение

Появление новых высокоэффективных (КПД до 80%) полупроводниковых источников света с их большими сроками службы (более 100 000 часов), с высокими удельными мощностными характеристиками (Вт/кг), с полосой излучения в широком диапазоне длин волн (от 0,245 до 5 мкм) и с разнообразными схемами управления позволяет использовать такие полупроводниковые источники света для создания оптических маяков для навигационных систем автоматических космических аппаратов [1].

Применение оптических маяков для космических аппаратов

Оптические наблюдения космических аппаратов (КА) является одним из основных методов наблюдения КА и измерения их характеристик. Использование искусственных источников света позволит улучшить применение оптических средств наблюдения КА.

Еще в 60-е годы XX века, когда только отрабатывались методы космической геодезии и еще не были разработаны методы высокоточной лазерной локации КА, возникла потребность в бортовых импульсных источниках света. Они решали сразу

две задачи: за время короткой (менее миллисекунды) вспышки КА не успевал переместиться более чем на несколько метров по своей орбите, и это позволяло связать позиционные наблюдения вспышек с наземных пунктов наблюдений, оснащенных высокоточными астрономическими фотоустановками, с пространственным положением КА на орбите с высокой по тем временам точностью. Помимо этого, мощный источник света позволял проводить уверенную регистрацию вспышек на фотоматериалах, которые обладали очень сильным эффектом отклонения от «закона взаимозаменяемости» (то есть на длинных и на коротких экспозициях чувствительность фотоматериалов падала на два-три порядка по сравнению с обычными для любительской фотографии экспозициями).

Современные оптические средства наблюдений за объектами в околоземном космическом пространстве (ОКП) используют в качестве приемников оптического излучения приборы с зарядовой связью (ПЗС-матрицы), которые имеют чрезвычайно высокую чувствительность и линейное разрешение в несколько раз более высокое, чем имели лучшие «астрономические» фотоэмульсии.

Системой импульсной световой сигнализации с мощной лампой-вспышкой были оснащены космические аппараты типа «Сфера» и «Муссон», которая позволяла проводить космические геодезические измерения. В систему импульсной световой сигнализации входила хорошо теперь известная, а тогда еще редкая ксеноновая лампа. Импульсная лампа обеспечивала заметность КА на фоне звездного неба и позволяла определять положение космического аппарата относительно звезд с погрешностью 3-6 угловых секунд.

Современные полупроводниковые излучатели света обладают высоким КПД (до 80%) в отличие от ранее применяемых газоразрядных ксеноновых ламп, и оптический маяк может работать от небольших солнечных батарей. Например, для обеспечения работы маяка с мощностью излучения 1 Вт достаточно использовать солнечную батарею с площадью рабочих элементов 70 см^2 ($7 \times 10 \text{ см}$). Свет такого оптического маяка будет идентифицирован телескопами систем контроля космического пространства с расстояния 2000 км как звезда 12 зв. величины.

Проведем сравнительный анализ газоразрядных и полупроводниковых источников излучения для применения их в оптических космических маяках.

Газоразрядные источники света, приборы, в которых электрическая энергия преобразуется в оптическое излучение при прохождении электрического тока через газы или пары металлов. Газоразрядные источники света делятся на две группы: низкого и высокого давления. Спектральный состав возникающего при разряде излучения определяется составом газа, в котором происходит разряд. Яркость свечения зависит не только от состава газа, но и от его давления и от величины тока разряда. К газам, заполняющим газоразрядные источники света, относятся: пары ртути, пары натрия, ксенон, неон, аргон, криптон и др. Самой высокой световой отдачей среди всех известных газоразрядных ламп (до 100 лм/Вт) являются натриевые лампы высокого давления [2].

Недостатки газоразрядных источников света общеизвестны: большие размеры; необходимость пускорегулирующей аппаратуры; долгий выход на рабочий режим; высокая чувствительность к сбоям в питании и скачкам напряжения; невозможность работы на любом роде тока; невозможность изготовления ламп на самое разное

напряжение (от долей вольта до сотен вольт); наличие мерцания при работе на переменном токе промышленной частоты; прерывистый спектр излучения.

Альтернативой им являются полупроводниковые приборы [3].

Полупроводниковые приборы излучают свет при пропускании через него электрического тока. К ним относятся следующие миниатюрные источники оптического излучения:

- светодиоды, имеющие широкий спектр излучения (от 0,24 до 10 мкм) и высокую мощность излучения (до десятков Ватт), высокий КПД (до 60%), большие сроки службы, и широкую полосу излучения (30-50 нм);
- лазерные диоды на основе AlGaAs, которые обладают высокой мощностью (десятки Ватт) в узком спектральном диапазоне, что в системе со световодами делает их универсальным инструментом;
- DPSS лазеры (Diod Pumped Solid State lasers), прогресс в развитии которых в последние 5 лет позволил создать миниатюрные источники монохроматического излучения.

По сравнению с газоразрядными источниками света, полупроводниковые источники имеют следующие отличия:

- высокая световая отдача; современные светодиоды сравнялись по этому параметру с натриевыми газоразрядными лампами и металлогалогенными лампами, достигнув 200 Люмен на Ватт;
- высокая механическая прочность, вибростойкость;
- долгий срок службы - до 100000 часов или 11 лет непрерывной работы;

- малая инерционность - включаются за 100 нс на полную яркость;
- количество циклов включения-выключения не оказывают существенного влияния на срок службы (в отличие от газоразрядных ламп);
- различный угол излучения - от 1 до 180 градусов;
- работают при низком напряжении (1,5 – 15 В);
- нечувствительность к низким и очень низким температурам, однако, высокие температуры противопоказаны;
- в отличие от газоразрядных источников света более радиационные устройства.

В таблице 1 приведены сравнительные характеристики газоразрядных и полупроводниковых источников света.

Таблица 1

Сравнительные характеристики газоразрядных и полупроводниковых источников света

Источники света	Свето-отдача, Лм/Вт	Срок службы, тыс. часов	КПД, %	Инерционность	Удельные характеристики Вт/кг м³	Габариты оптической системы
Ртутные лампы	40	10	8	> 1 мин	50 ÷ 100 высокое напряжение	Большие
Натриевые лампы	100	10	25	> 1 мин	50 ÷ 100 высокое напряжение	Большие
Металло-галогенные лампы	70	5	10	> 1 мин	100 ÷ 1000 высокое напряжение	Большие

Источники света	Светоотдача, Лм/Вт	Срок службы, тыс. часов	КПД, %	Инерционность	Удельные характеристики Вт/кг м ³	Габариты оптической системы
Ксеноновые лампы	50	0,5	5	> 1 с	100 ÷ 1000 высокое напряжение	Большие
Светодиоды, лазерные диоды, DPSS лазеры	> 200	100	> 80	10 ⁻⁹ с	10 ³ ÷ 10 ⁴ низкое напряжение	Маленькие и управляемые

Анализ возможности использования полупроводниковых источников света для КА показывает следующие области их применения (рисунок 1).



Рисунок. 1 Области применения полупроводниковых источников света для КА

В настоящее время эти источники уже применяются в космосе, чем собственно и подтверждается их работоспособность в космическом пространстве:

- Система лазерных реперных устройств, установленных на торце служебного модуля «Звезда» МКС, предназначена для лазерно-оптической системы управления сближением и стыковкой с КА [4, 5].

- Аналогичные лазерные локационные системы также планируются к применению в системах беспроводной передачи энергии между КА для точного наведения лазерного канала на приемник излучения КА-потребителя и в системах межбортовой передачи информации на основе лазерной связи [6].

На сегодняшний день применение этих источников на этом ограничивается, тогда как возможности их намного шире. Поэтому мы рассмотрим и другие перспективные направления использования оптических лазерных маяков для КА.

В первую очередь это оптические лазерные маяки, установленные на посадочных планетных станциях, таких как «Луна-Глоб»/ «Луна-Ресурс-1» (а в будущем – на спускаемых на поверхность Марса). Установка таких маяков позволит локализовать местоположение посадочных станций с высокой точностью с помощью оптических телевизионных средств космических аппаратов и наземных станций наблюдения, а при подключении к радиоизотопному источнику энергии использовать их как маяки для последующих лунных экспедиций. Научное значение оптических маяков будет заключаться в фиксации на них системы планетоцентрических координат, жестко определенной на теле планеты.

Для выполнения второй задачи (автономных оптических лазерных маяков на борту околоземных КА) данные устройства должны быть выполнены в виде

отдельного модуля, содержащего собственную систему энергопитания, терморегулирования и управления, что позволит при установке их на борту околоземного космического аппарата позиционировать КА на орбите с использованием наземных оптических средств контроля как работающих, так и утративших работоспособность КА. Система оптического контроля при установке интерференционных фильтров на наземные телескопы позволит вести наблюдения маяков даже в дневное время (при высокой яркости фоновой подсветки), а при использовании кодировки световых импульсов оптического маяка: определять угловые координаты КА; определять состояние КА (идентифицировать аварийные варианты); контролировать фрагменты космических систем, с установленными на них маяками, как космический мусор.

Выбор источников излучения для оптических маяков

Для решения задачи проектирования оптических маяков был создан алгоритм выбора полупроводникового источника света (рисунок 2).

Алгоритм выбора такого источника света заключается в следующем:

- Излучение маяка должно уверенно регистрироваться приемной оптической системой:
- определение необходимой мощности излучателя (выбор мощности излучателя обуславливается чувствительностью приемной наземной оптической системы, расстоянием до КА, углом излучения источника света и конечно временем экспозиции);
- выбор полупроводникового источника света, позволяющего создавать

- малорасходящиеся пучки света, что необходимо для передачи этого излучения на большие расстояния;
- определение необходимого спектра излучения полупроводниковым источником света (допускается широкий выбор спектра излучения полупроводниковым источником света для системы космос-космос, в случае системы КА-Земля выбор спектра излучения обуславливается свойствами атмосферы);
 - временная инерционность оптического маяка не должна превышать частотную характеристику приемной аппаратуры, что необходимо для кодировки сигнала.
 - Оптический маяк должен обеспечивать эксплуатацию в условиях космического полета: миниатюрные масса-габаритные параметры, долгий срок службы, радиационная стойкость, способность работать от низкого напряжения, вибростойкость, высокая эффективность.

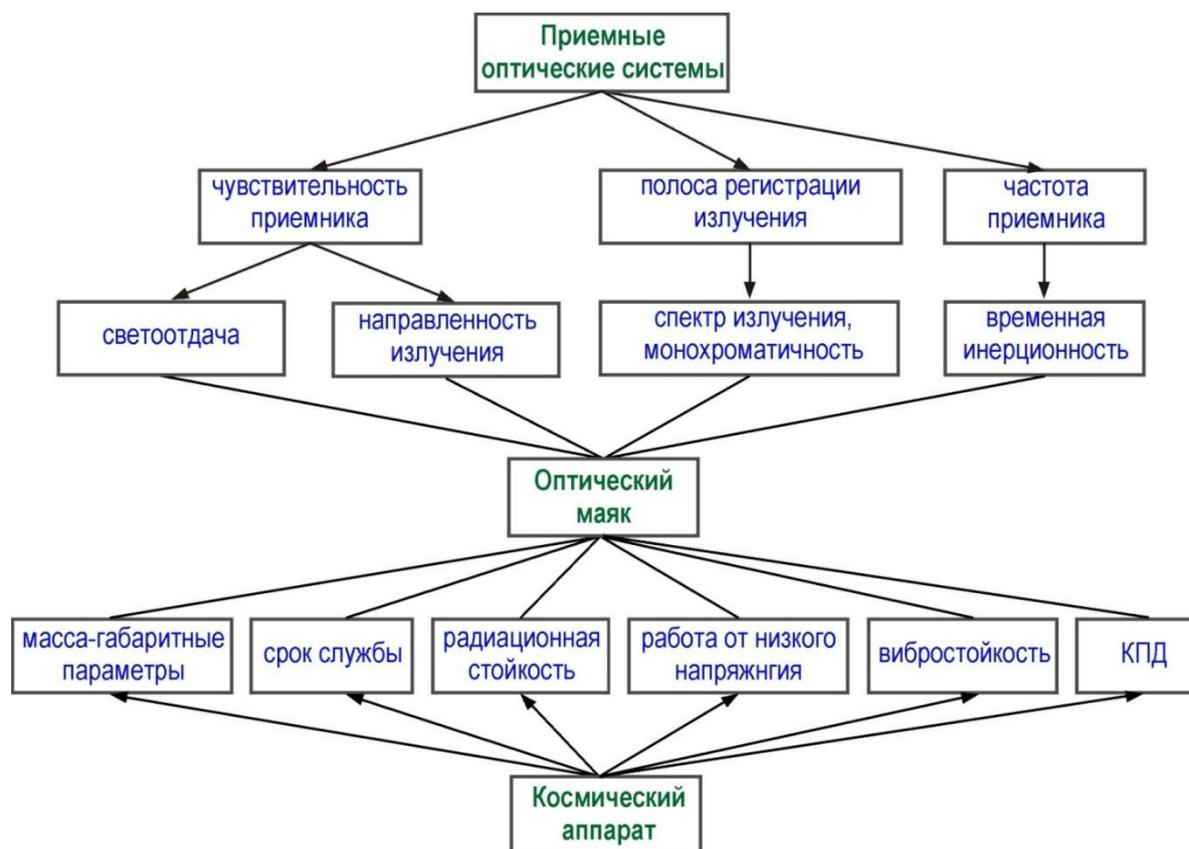


Рисунок 2. Алгоритм выбора проектных параметров оптического маяка для определения координат и состояния космического аппарата

На рисунке 3 представлены проектные требования к источнику излучения для оптического маяка на борту КА.

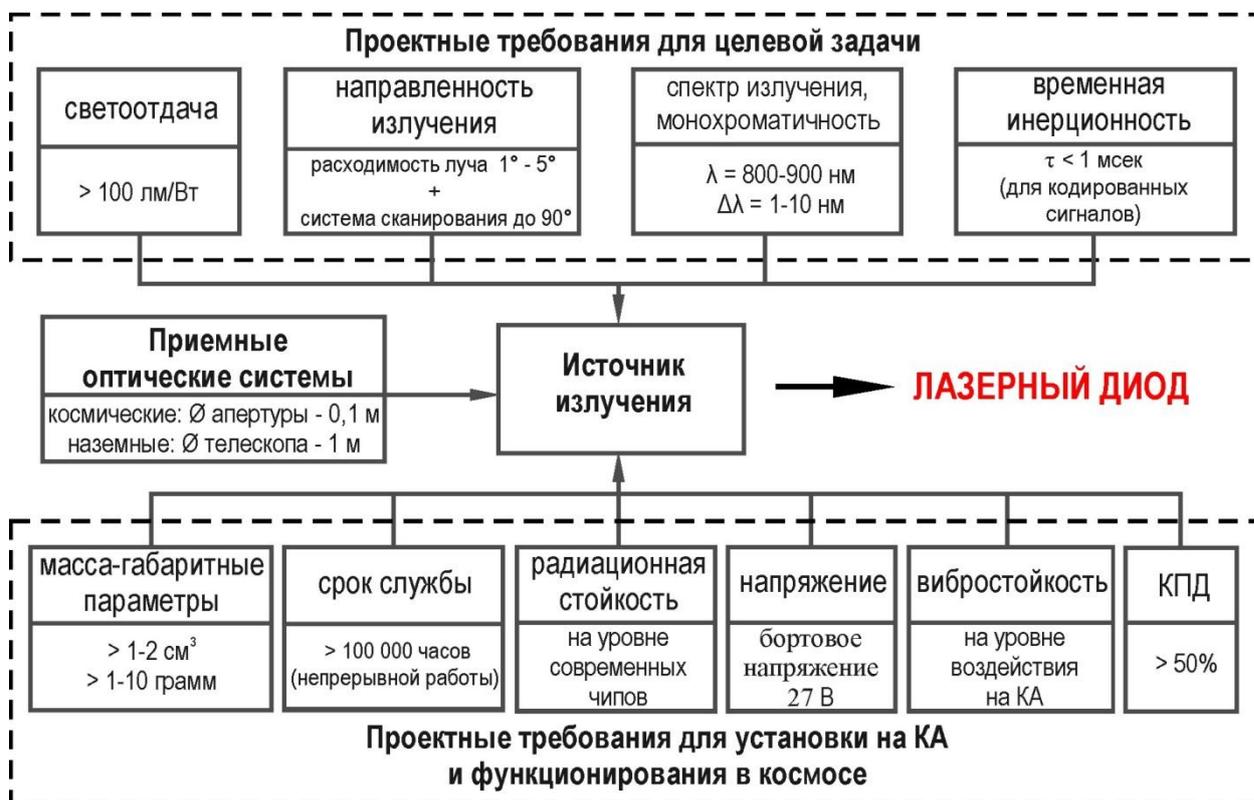


Рисунок 3. Проектные требования к источнику излучения для оптического маяка на борту КА

Прежде всего, определимся с выбором типа прибора с точки зрения эффективности, уровня мощности, оптико-геометрических характеристик, простоты конструкции. Таким требованиям отвечают два типа приборов – светодиоды и лазерные диоды.

Имеется два основных отличия лазерного диода от светодиода. Первое: - лазерный диод имеет встроенный оптический резонатор, второе: - лазерный диод работает при значительно больших значениях токов накачки, что позволяет при повышении некоторого порогового значения получить режим индуцированного излучения. Именно такое излучение характеризуется высокой когерентностью,

благодаря чему лазерные диоды имеют значительно меньшую ширину спектра излучения 1-2 нм против 30-50 нм у светодиодов.

С учетом представленных выше характеристик для оптических маяков в качестве источника излучения более предпочтительно выбрать лазерный диод.

Далее проведем выбор спектра излучения лазерного диода с учетом оптических свойств атмосферы [7].

Длина волны в большинстве реализованных лазерных диодов варьируется в пределах 720 – 950 нм. Это ближний инфракрасный спектр. Но почему именно он? Дело в том, что существующие технологии производства полупроводниковых лазеров, были сделаны из расчета компромисса между принципиально доступными длинами волн излучателей и приемлемыми диапазонами пропускания световодов. Поэтому выбор в длинах волн ограничен возможностями излучателей и приемников (фотодиодов). Кроме диапазона 720-950 нм, существуют компоненты для диапазонов около 1300 нм и 1500 нм.

Существует много данных о влиянии атмосферных и погодных явлений на ИК оптические системы этих диапазонов [8]. Однако, кроме достаточно простых, учитывающих ограниченный набор факторов, влияющих на атмосферный канал передачи, подходов к моделированию-канала в этих публикациях найдено немного.

Затухание оптического лазерного сигнала включает в себя аэрозольное затухание, т.е. на мельчайших, капельках влаги, находящейся в воздухе, и резонансное поглощение на молекулах различных газов, входящих в состав атмосферы (H₂O, CO₂, CH₄, N₂O, CO и др.). На резонансное поглощение особенно сильное влияние оказывают параметры спектра лазерного излучения, такие как

ширина, структура и количество мод излучения и т.д. Расчеты резонансного поглощения производятся с учетом огромной базы данных по спектральным характеристикам атмосферы.

Знание всех этих нюансов дает возможность не только выбрать правильный диапазон при определении типа лазерного диода, но также правильно спроектировать всю наземно-космическую систему, а также правильно предсказать поведение систем при различных погодных условиях.

Затухание лазерного сигнала при различных погодных явлениях также достаточно точно моделируется. Например, туманы и дожди легко формализуются расширенной моделью аэрозольного поглощения. На самом деле, такая преграда как дождь не представляет серьезной угрозы для лазерного излучения ближнего ИК диапазона. Даже уровни осадков до 75 мм/час (почти тропический ливень), практически плохо преодолеваемые радиорелейными системами в диапазонах 18-54 ГГц, не значительно влияет на прохождение ИК излучения.

При правильном выборе компонентов потенциальные возможности развития систем с применением лазерных диодов выглядят впечатляюще. Время наработки на отказ для лазерных диодов мощностью 1000 мВт и выше уже достигло уровней 100 000 часов.

Поэтому наиболее оптимальным источником излучения будет лазерный диод, излучающий в области 800-900 нм.

Оптические лазерные маяки для лунных посадочных станций

«Луна-Глоб» и «Луна-Ресурс-1»

Оптические маяки на основе лазерных диодов были разработаны в рамках ОКР «Луна-Глоб» и «Луна-Ресурс-1» в организации ЦКБ ИУС [9].

Система оптических лазерных маяков, устанавливаемая на борту КА «Луна-Глоб» и «Луна-Ресурс-1» позволит обнаружить посадочную станцию на поверхности Луны средствами телевизионной техники ОА и наземными оптическими телескопами, а также обеспечит высокоточную координатную привязку места проведения лунного эксперимента.

Конструктивно блок оптических лазерных маяков с системой управления устанавливается на термостабильной плите посадочного модуля, а их оптическое излучение выводится наружу с помощью специальных металлизированных световодов (рисунок 4), способных работать при криогенной температуре, обеспечивая тем самым простоту выбора направления излучения.

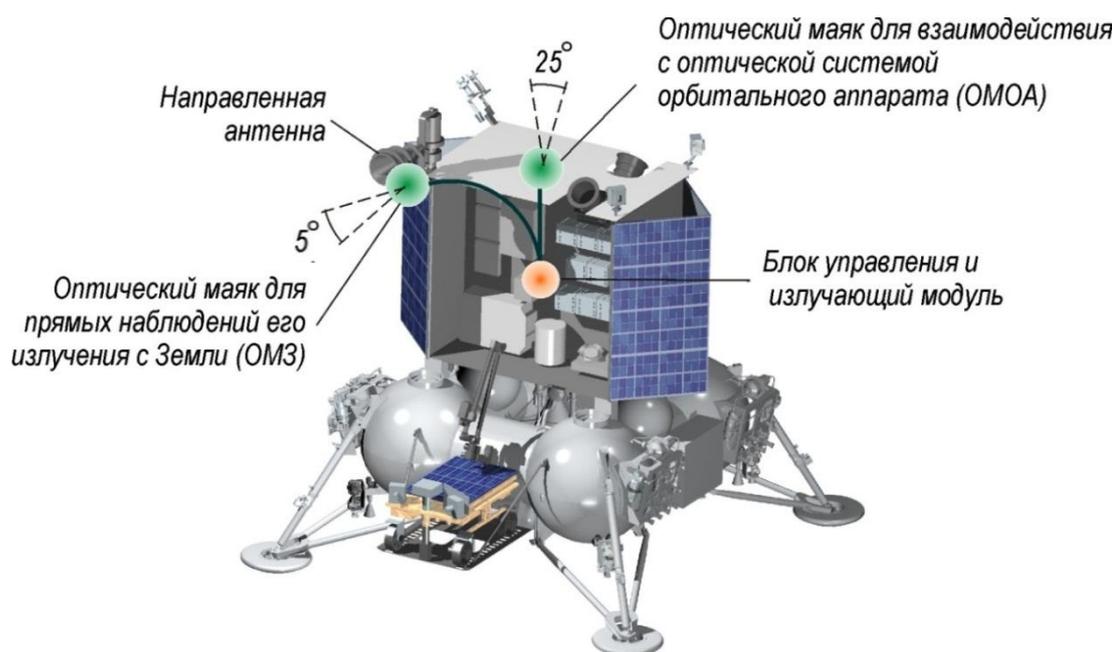


Рисунок 4. Схема размещения оптических лазерных маяков на ПС «Луна-Глоб»

Один световод выводится в верхнюю часть приборного отсека и излучает в направлении траектории орбитального аппарата на лунном небосводе. Когда в поле зрения ТВ-камеры ОА попадает посадочная станция, то излучение от оптического лазерного маяка должно быть направлено на ОА. В этом случае камера ОА зафиксирует существенное превышение светового потока над уровнем фона и таким образом определит местоположение оптического лазерного маяка.

Другой световод выводится параллельно относительно остронаправленной антенны (ОНА), что обеспечит направление излучения оптического лазерного маяка точно по направлению ОНА, т.е. в сторону Земли. На Земле излучение маяка будут принимать оптические телескопы системы оптического наблюдения (СОН). Наземный оптический телескоп, расположенный в одном районе с наземным пунктом радиосвязи, получит достаточно сильный световой поток, чтобы его регистрация была уверенной.

Заключение

В дальнейшем система оптических лазерных маяков может быть использована и для других как научных, так и служебных задач. Например, оптический лазерный маяк будет являться реперной точкой для установления системы селенодезических координат высокой точности. А также использован как маяк для последующих лунных экспедиций. Конечно, при этом необходимо подсоединить оптический лазерный маяк к радиоизотопному источнику станции.

Библиографический список

1. Багров А.В., Барабанов А.А., Вернигора Л.В., Вятлев П.А., Мартынов М.Б., Пичхадзе К.М., Сысоев В.К. Применение лазерных диодных маяков для определения координат космических и наземных объектов // Космические исследования. 2013. Т. 51. № 4. С. 1-9.
2. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991, - 720 с.
3. Дмитриев А.Л. Полупроводниковые источники света для систем передачи и обработки информации. – СПб: СПбГУИТМО, 2006. - 48 с.
4. Старовойтов Е.И., Савчук Д.В. Программа «МИТРА» для моделирования характеристик бортовых лазерных локационных систем космических аппаратов // Труды МАИ. 2014. №75. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=49709>
5. Старовойтов Е.И., Воробьев С.А. Контроль работоспособности лазерных излучателей в условиях космического полета с использованием телевизионных средств // Радиотехника. 2011. № 6. С.50–55.
6. Шаргородский В.Д., Чубыкин А.А., Сумерин В. В. Межспутниковая лазерная навигационно-связная система // Аэрокосмический курьер. 2007. № 1 (49). С. 88-89.
7. Зуев В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере - М.: Советское радио, 1970. - 496 с.
8. Клоков А.В. Беспроводные ИК-технологии, истинное качество «последней мили» // Технология и средства связи. 1999. № 5. С. 40-44.
9. Горячев А.В., Смотряев С.А., Вернигора Л.В., Сысоев В.К. Особенности конструкции световых маяков для лунных посадочных станций // Вестник НПО им.

С.А. Лавочкина. 2013. № 2. С. 31-34.