

Двухволновая оптическая лунная навигационная система

Багров А.В.^{1*}, Дмитриев А.О.^{2**}, Леонов В.А.^{1***}, Москатиный И.В.^{2****},
Сысоев В.К.^{2*****}

¹*Институт астрономии Российской академии наук, ИНАСАН,
ул. Пятницкая 48, Москва, 119017, Россия*

²*Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина, НПО Лавочкина,
ул. Ленинградская, 24, Химки, Московская область, 141400, Россия*

**e-mail: abagrov@inasan.ru*

***e-mail: dmitriev141400@gmail.com*

****e-mail: leonov@inasan.ru*

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

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

Статья поступила 05.05.2020

Аннотация

В статье предлагается создание глобальной лунной оптической навигационной системы на основе располагаемых на поверхности Луны световых маяков, работающих на двух длинах волн. Данная система на основе оптико-электронных приборов на космических аппаратах и световых маяков позволит получить высокоточную систему навигации, как на поверхности Луны, так и в окололунном пространстве.

Ключевые слова: Луна, навигация, телескоп, светодиодные маяки.

Лунная навигационная система

Проведение будущего освоения Луны, а также ее детального изучения должно опираться на высокоточную систему позиционирования находящихся на Луне объектов, особенно луноходов и посадочных аппаратов. Системы спутникового глобального позиционирования на Земле успешно функционируют уже много лет [1], позволяя пользователям в любой момент определять свое положение с погрешностью лучше 5 метров.

В работе [2] детально анализируется необходимое количество космических аппаратов для создания радиотехнической лунной навигационной системы и показано, что для этого требуется группировка из 18 лунных навигационных спутников и сложная система управления данным комплексом.

Поэтому крайне привлекательной представляется идея разработать лунную навигационную связную систему (ЛНСС) на новых принципах, которые позволяют обойтись минимальным числом навигационных спутников. Кроме того, нужна такая система, которую можно поэтапно наращивать от локальной системы (для отдельного района Луны) до глобальной (по всей поверхности Луны), и от периодической возможности позиционирования объекта до круглосуточной с высокой оперативностью измерений [3].

Для этого нами предлагается создание глобальной лунной оптической навигационной системы на основе располагаемых на поверхности Луны световых маяков [4-5].

Эта навигационная система должна опираться на установленные на поверхности Луны искусственные световые маяки, допускающие их наблюдение из космоса, и технику для их наблюдения космического базирования. При этом навигационные космические аппараты должны решать задачу самоопределения своего пространственного положения относительно звезд и тела Луны исключительно бортовыми средствами, без использования навигационной поддержки космического аппарата (КА) с поверхности Луны. Схема такой системы показана на рис. 1.

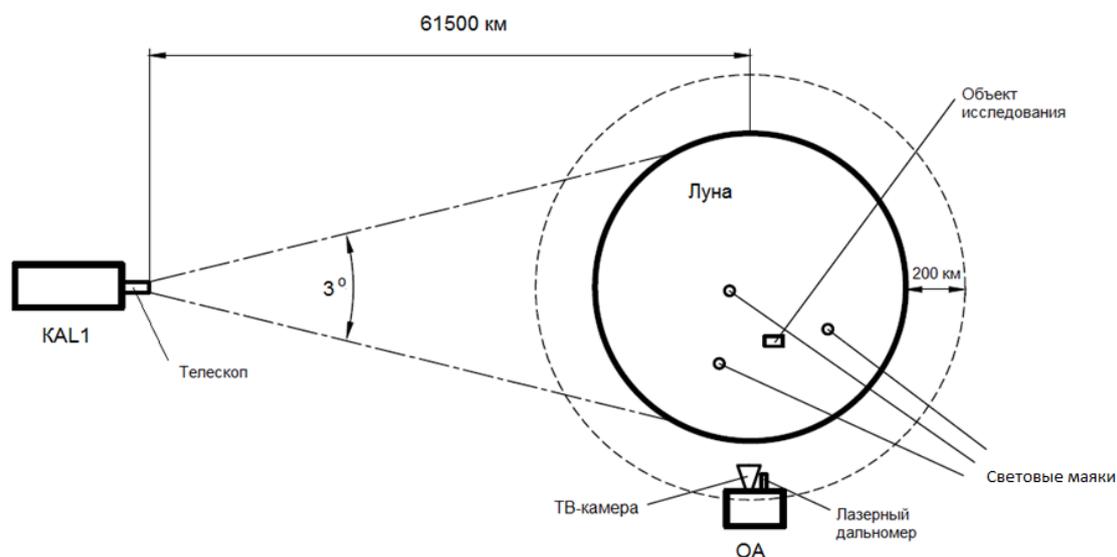


Рис. 1 Схема глобальной навигационной связной системы на Луне

Детально предложенная система описана подробно в работах [4-5].

Очевидным достоинством такой системы является возможность ее поэтапного построения с практическим использованием результатов каждого этапа:

Этап 1 – доставка на поверхность Луны посадочной станции со светодиодным маяком, что будет первым координатным селенодезическим знаком точечных размеров, который можно будет наблюдать из космического пространства. Создание такого реперного знака будет эквивалентно созданию точки отсчета, от которой можно будет измерять относительные селенодезические координаты объектов с самой высокой точностью, что сделает его аналогом Гринвичской обсерватории на Луне (таким репером будет российский посадочный аппарат Луна 25). Результатом этого этапа будет измерение селеноцентрических координат точки посадки станции в системе координат MeanEarth/PolarAxis (ME) system по наблюдениям лунного маяка наземными телескопами и с использованием теории движения Луны DE200/LE200;

Этап 2 – использование КА на полярной окололунной орбите с телевизионным комплексом для проведения астрометрических измерений позиционируемых объектов относительно положения светодиодного маяка, что позволит зафиксировать систему селенографических координат на теле Луны относительно звезд, а в результате совмещения ее с картой высот, полученной космическим аппаратом LRO (или планируемой российской миссией «Луна-26»), построить селенодезическую систему координат высокой точности, привязанную к MeanEarth/PolarAxis (ME) system;

Этап 3 – оснащение позиционируемых объектов на Луне светодиодными маяками, что позволит с помощью ТВ-комплекса и лазерного дальномера низкоорбитального лунного аппарата наблюдать этот объект относительно опорного

светодиодного маяка и определять его координаты с высокой точностью (~1-10 м). Максимальную точность позиционирования объектов, оснащенных индикаторами-маяками, можно будет достичь в области, заключенной между навигационными маяками на периметре зоны исследований, которые тоже могут быть установлены на поверхности Луны на этом этапе. Результатом выполнения этого этапа будет возможность периодического измерения координат позиционируемых объектов в любой точке лунной поверхности с точностью 1...10 м не реже, чем раз в четырнадцать суток;

Этап 4 – Размещение КА с измерительной угломерной аппаратурой в виде оптических телескопов в точках Лагранжа [5] позволит непрерывно наблюдать как исследовательские лунные аппараты, так и опорные светодиодные маяки, и проводить позиционирование оснащенных светодиодными маяками объектов на Луне с высокой оперативностью и с высокой точностью.

Автономные светодиодные маяки – основа навигационной лунной станции

Основной проблемой создания такой навигационной системы является оптимальный выбор оптико-физических характеристик конструкции светодиодные маяка.

Задача оптического маяка – фиксация навигационного репера на теле Луны и высокоточное измерение его селенодезических координат. Решение этой задачи заключается в использовании репера точечных размеров, что обеспечивает высокую точность измерения его положения.

Второй момент этой задачи связан с методами измерения положения репера и методами переноса его координат на измеряемый объект. В высшей геодезии геодезические реперы изготавливаются в виде механической конструкции на массивном основании, исключающем возможные смещения репера со временем. А сам репер представляет собой точку от пересечения двух линий (или осей астрометрического телескопа, используемого для навигации). При наземных наблюдениях проводятся астрономические наблюдения звезд в топоцентрической системе координат с центром в геодезическом репере.

На Луне, в принципе, тоже можно устанавливать навигационные реперы, подобные применяемым на Земле [6]. Но использовать их будет практически невозможно. Мы еще не располагаем ресурсами, которые позволят проводить астрономические наблюдения из мест установки реперов. На Луне нужны реперы, которые при точечных размерах можно наблюдать на большом расстоянии от них, и даже из космоса, и с Земли. Поэтому мы предложили в качестве селенодезических реперов использовать оптические маяки со светящимся телом миллиметрового размера. Их можно наблюдать на очень большом расстоянии, и измерять их положение относительно навигационных звезд с высочайшей астрономической точностью.

На большом расстоянии яркость светового маяка будет падать как квадрат расстояния от него. И наблюдаться он будет на фоне так или иначе освещенной местности, на которой установлен маяк. Поэтому в пределах рабочей дистанции от маяка он должен быть ясно различим на фоне посторонней засветки. На Луне

источником посторонней засветки является рассеянный поверхностью солнечный свет, и уровень фонового сигнала определится характеристиками рассеивающей поверхности. В первую очередь - спектром диффузного отражения солнечного излучения, которое будет определять соотношение сигнал/шум системы и мощность автономного светового маяка на основе светодиодных маяков.

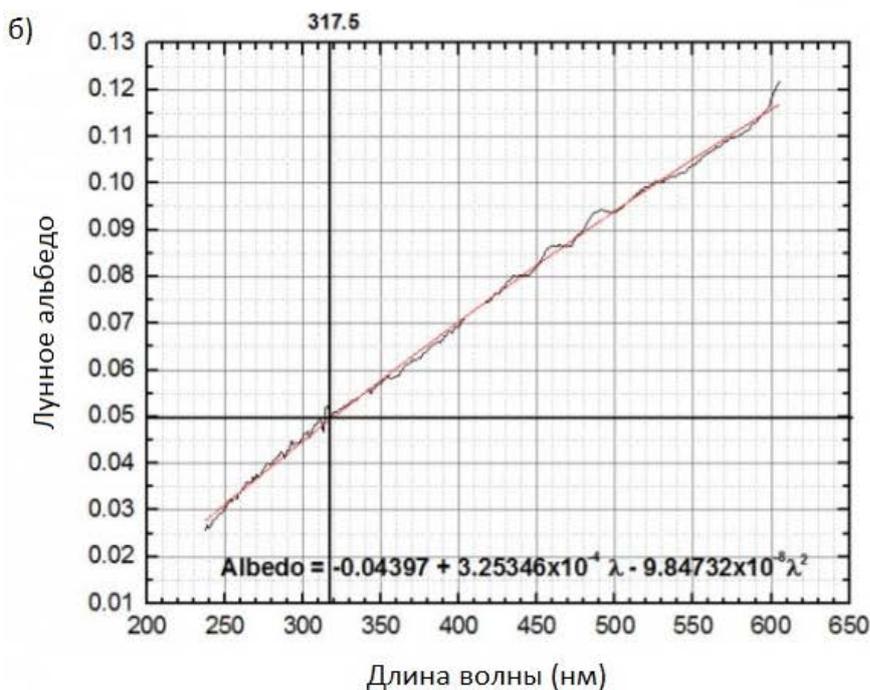
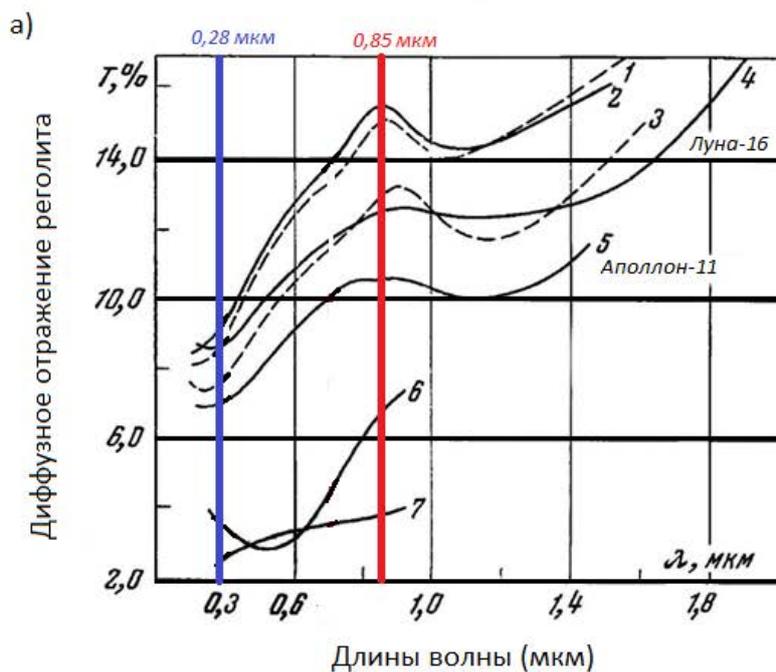


Рис.2. а) Спектры диффузного отражения реголита из различных районов Луны [5]; б) Предварительная оценка лунного альbedo как функция от длины волны, полученная со спутника GOME – черная линия и LRO – красная линия.

На Рис. 2а приведены экспериментальные данные по отражательным характеристикам нескольких образцов лунного вещества из работы [8]:

(1) – обр. 12028,229; (2)– обр. 12028,233; (3) – обр. 10005,35; (4) – обр. Л-16-А; (5) – обр. 10005,34-5; (6) – спектр зеркального отражения обр. Л=16-А; угол падения света 60° ; коэффициент отражения в произвольных единицах; (7) – приведенный спектр диффузного отражения обр. Л-16-А; коэффициент отражения при 0,5 мкм равен коэффициенту зеркального отражения.

Коэффициенты диффузного рассеяния соответствуют ламбертовскому закону изотропного рассеяния, а изменение коэффициента зеркального отражения с длиной волны определено только для угла падения света 60° . Последнее свидетельствует о том, что доля зеркального отражения для вещества Луны ничтожна по сравнению с диффузным рассеянием. Это важно иметь в виду, если оценивать поверхностную яркость участка лунной поверхности, на котором неровности могут создавать условия для «зеркальных бликов»: на Луне их нет.

Прежде всего, выбор длины волны 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 (их положение на рис. 2а показано красной и синей полосами соответственно). Ближний инфракрасный диапазон привлекателен тем,

что излучатели и оптикоэлектронные приборы наблюдения для этого диапазона имеют высокий КПД и высокую чувствительность, и широко распространены в космической технике. Ультрафиолетовый диапазон интересен, в первую очередь тем, что природных источников излучения в этом диапазоне очень мало, благодаря чему фоновый сигнал от лунных поверхностей, на которых размещены световых маяков получается минимальным.

Как видно из рис. 2 диффузное отражение реголита минимально в ультрафиолетовом диапазоне с длиной волны от 400 нм и меньше (практически равно 3-4 % в диапазоне УФ-С 200-280 нм). Таким образом, лунный навигационный репер должен быть снабжен светодиодным маяком, излучающим в этом диапазоне, а принимающие аппараты должны быть снабжены фотоприемным модулем, чувствительными в этом диапазоне.

Применяемые в этих диапазонах излучатели должны иметь приемлемые технические характеристики, к числу которых в первую очередь относятся: КПД; срок службы; уровень мощности; радиационная стойкость.

В первом варианте лунной оптической навигационной системы рассматривается полупроводниковый излучатель на длине волны ~ 0.85 мкм. Он был выбран для проведения навигационных экспериментов в миссии «Луна-25», так этот излучатель обладает высоким КПД, высоким уровнем мощности и находится в области спектральной чувствительности существующих оптических систем лунных орбитальных космических аппаратов и наземных оптических телескопов [9-10].

Однако, в связи с успешным развитием УФ-светодиодов и УФ-фотоприемных систем и, исходя из спектральных характеристик лунного реголита, возникает возможность использования световых УФ-маяков для решения навигационных задач на Луне и в окололунном пространстве.

Светоизлучающие структуры в УФ-диапазона в области ~ 0.280 мкм на основе AlGaIn соединений достигают высоких мощностей (100 мВт) [11] их можно рассматривать как основу лунных световых маяков в этом спектральном диапазоне.

Оптико-электронные приборы для приема УФ-сигналов

Специфика аппаратуры для наблюдений навигационных световых реперов состоит в том, что позиционирование объектов должно происходить за очень короткое время, особенно – движущихся. Поэтому такая важная характеристика фотоприёмных устройств, как темновой ток, усложняющая проведение наблюдений с длительным накоплением сигнала, для рассматриваемой задачи имеет второстепенное значение. Но очень большое значение для нее будет иметь линейный размер панорамного фотоприёмника и число элементов разрешения в нем, так как именно они определяют размер поля зрения, необходимого для обнаружения позиционируемого объекта и точность определения его положения в поле зрения.

Поэтому оптимальным является использование позиционно- чувствительных фотомодулей на основе КМОП матриц с обратной засветкой. Применение таких матриц позволит создать навигационную лунную оптическую систему с

применением одновременно двух типов светодиодных маяков работающих в различных спектральных диапазонах, что позволит увеличить точность и чувствительность данной системы.

Панорамные мегапиксельные приемники выполняются по технологии КМОП-матриц с обратной засветкой (BSI CMOS), что позволяет получить высокие значения квантовой эффективности – 95% (при 580 нм) в видимом спектре света, 83% (при 280 нм) в УФ-диапазоне и 70% в ИК диапазоне (850 нм) [12-13]. При реально высокой чувствительности, матрица позволяет получать высококонтрастные изображения при минимальном освещении, сохраняя мельчайшие детали [14-15].

Ультрафиолетовые световые маяки, установленные на Луне, должны быть видны в космосе на большом расстоянии. Максимальное расстояние до маяка от приемного (измерительного) бортового устройства на орбитальном КА будет определяться оптикой фотоприемного модуля. Если использовать объективы [16-17] с матрицей GSENSE6060BSI-AM, то они позволят наблюдать ультрафиолетовый маяк (подобный спроектированному для КА «Луна-25») с расстояния 350 и 500 км соответственно. Однако, оба эти объектива могут работать лишь с 6% площади матрицы. Если исходить из возможной светосилы объектива 1:3 и угловом размере исправленного поля зрения объектива 10° , то фокусное расстояние объектива, использующего весь размер матрицы, составит 360 мм. Теоретически с таким объективом лунный маяк можно было бы уверенно наблюдать с расстояния 3000 км от Луны.

В то же время для достижения точности определения углового положения маяка в поле зрения камеры на уровне 10 метров лунной поверхности, необходимо обеспечить угловое разрешение камеры не ниже 10"/пикс. Это значит, что удаление камеры от Луны не должно превышать 2000 км.

Конечно, для достижения оптимальных параметров потребуется разработка объективов для работы с ультрафиолетовой матрицей мегапиксельного класса.

Поэтому очень большой интерес может представлять использование астрономического УФ телескопа «Т-170» орбитального базирования, разработанного в «НПО Лавочкина» и предназначенного для научных исследований в ультрафиолетовой части спектра.

КА «Спектр-УФ» предназначен для исследования Вселенной в ультрафиолетовом участке электромагнитного спектра в диапазоне 110-310 нм [18]. Поэтому телескоп этого научного инструмента «Т-170» во многом удовлетворяет тем требованиям, которые могут быть выдвинуты для навигационного измерительного устройства, предназначенного для работы с ультрафиолетовым маяком. Телескоп имеет диаметр 1700 мм, светосилу главного зеркала 1:10, и он обеспечивает исправленное поле зрения 40 угловых минут [19]. При эквивалентном фокусном расстоянии 17000 мм оно позволяет использовать приемник размером 200 мм. Однако, те параметры телескопа, которые были достигнуты при конструировании инструмента для научных исследований, не вполне соответствуют параметрам измерительного инструмента.

Угловое разрешение телескопа «Т-170», в центре поля зрения близкое к дифракционному, составляет 0.06". При фокусном расстоянии 170000 мм масштаб изображения в фокальной плоскости получается равным 1.2"/мм. Для того, чтобы реализовать достаточное для навигационных измерений разрешение в 1", потребовался бы матричный приемник с размером пиксела 800 мкм, что почти в 100 раз больше, чем в матрицах, изготавливаемых для астрономических наблюдений.

Тем не менее, опыт разработки телескопа «Т-170» может быть использован для создания специального телескопа для навигационного аппарата, размещаемого в точке либрации. Возможно, что удастся с помощью дополнительной оптики сократить эквивалентное фокусное расстояние телескопа до оптимальных 20000 мм, и использовать короткофокусный вариант телескопа во второй, вспомогательной моде. Тогда главную моду телескопа можно было бы использовать для регулярных научных исследований, а вторую, – для решения навигационных задач.

Одним из основных элементов научного прибора для астрономических наблюдений, во многом определяющим его характеристики, является фотоприемное устройство (ФПУ).

В качестве панорамных светоприемников проекта «Спектр-УФ» будут использоваться наиболее совершенные из доступных на сегодняшний день модели мегапиксельных ПЗС матриц. Фотоприемное устройство блока спектрографов (ФПУ БС) должно обеспечивать регистрацию спектров в УФ-диапазоне, обеспечивать возможность длительного (до 10 часов) накопления сигнала от слабых источников. ФПУ БС должны сочетать в себе высокую чувствительность в УФ-области, низкий

шум считывания, низкий темновой ток, высокую геометрическую стабильность получаемых изображений. Этими свойствами как раз и обладают ПЗС матрицы.

Современные ПЗС с обратной засветкой и антиотражательным покрытием в ближнем УФ-диапазоне имеют существенно больший квантовый выход (до 60%) чем МКП, что компенсирует основной недостаток ПЗС – шум считывания. На коротковолновой границе (120 нм) рабочего диапазона БС чувствительность ПЗС заметно уступает МКП.

Основываясь на научных задачах и проведенном моделировании использования различных типов приемников излучения для БС предпочтение было отдано ПЗС. При использовании ПЗС спектрографы проекта «Спектр-УФ» впервые в мире будут иметь возможность массового получения УФ-спектров высокого разрешения с высоким соотношением С/Ш до 100 без заметной деградации ФПУ.

Поставщиком ФПУ БС для проекта «Спектр-УФ» была выбрана английская фирма «E2V Technologies», - ведущий мировой производитель ПЗС для наземных и космических астрономических применений. Основные характеристики ФПУ приведены в таблице 1.

таблица 1 – Основные характеристики ФПУ БС

характеристика	канал ВУФЭС	канал УФЭС	канал СДЦ
спектральный диапазон, нм	115–176	174–310	115–315
размер фоточувствительной области, мм	37.3×49.1		
формат детектора, пиксель	3112×4096		
размер пикселя, мкм	12		
время считывания полного кадра, с	60		
время экспозиции, с	1–3600		

Таким образом, использование фотоприемного модуля телескопа КА Спектр-УФ для наблюдения за УФ светодиодным маяком на поверхности Луны обеспечит необходимые чувствительность и точность.

В таблице 2 представлены оценочные значения мощностей для разных вариантов расположения различных светодиодов.

Таблица 2 – Оценочные значения мощностей светодиодов для различных приёмников для ИК-излучателя и УФ-излучателя

Тип приемника	УФ	ИК
Орбитальный аппарат (200 км)	0.01 Вт	0.5 Вт
Аппарат в точке Лагранжа (64 000 км)	0.05 Вт	2 Вт
Наземный пункт (380 000 км)	-	5 Вт

Из вышесказанного следует, что навигационная система для Луны должна состоять из двух автономных сегментов: из аппаратов космического базирования с измерительной аппаратурой, и из системы оптических маяков, которые либо индицируют реперные знаки, либо индицируют позиционируемые объекты.

Лунные автономные световые станции

Стационарно размещаемые [20] на Луне станции-маяки будут являться основой оптической лунной навигационной системы. Каждый такой маяк является системой, функционирующей автономно по заложенной в нее программе, но при этом допускающей управление по радиокомандам с КА. Функциональная схема предлагаемого «НПО Лавочкина» навигационного реперного блока представлена на Рис. 3.

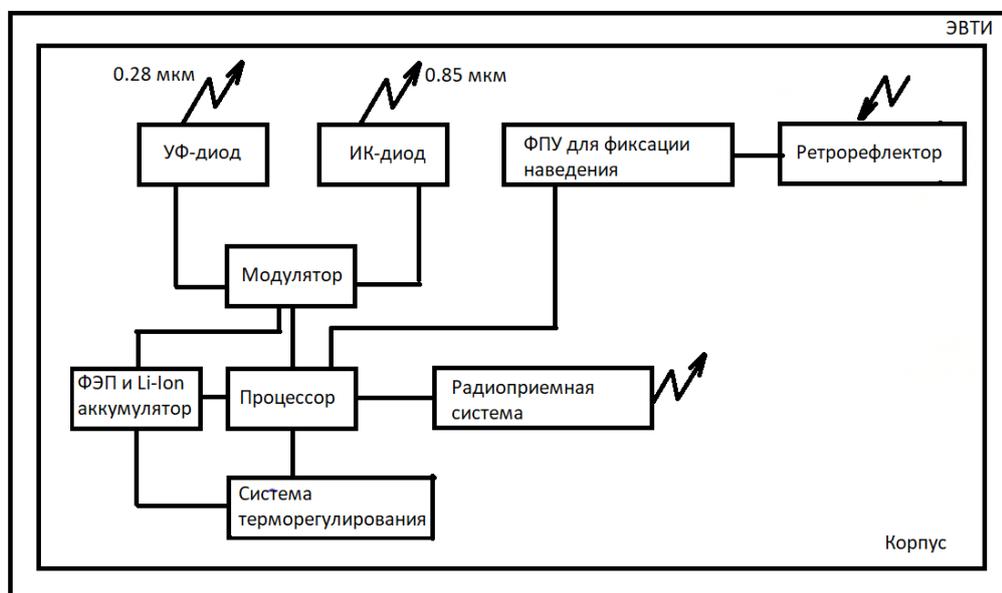


Рис. 3 – Функциональная схема световых лазерных маяков

В состав автономного светодиодного маяка должны входить следующие компоненты (рис.3):

- комплект УФ и ИК светодиодов с оптикой, количество которых будет определяться необходимым углом засветки пространственного сектора области приема светового сигнала;

- управление светодиодами, включая их кодировку;

- фотоприемное устройство для фиксации зондирующего лазерного излучения спутникового высотомера на ретрорефлектор;

Сервисные системы:

- общий процессор управления комплексом;

- радиоприемное устройство с антенной для приема команд управления с навигационного КА;

- система терморегулирования;

- система энергопитания, состоящая из солнечных батарей, аккумуляторов и блока автоматики

- корпус, необходимый для защиты всей конструкции от суточных перепадов температуры;

- термодатчики, включенные в систему терморегулирования

- ЭВТИ, обеспечивающий теплоизоляцию конструкции светового маяка.

Конечно, данная система рассматривается как автономная, однако, при установке ее на посадочных станциях различного назначения, можно задействовать часть служебных систем этих станций, например, системы энергопитания,

радиоприемник и т.д.

Среди возможных компоновок оптической системы маяков, предполагается рассмотреть, как одновременное, так и отдельное оснащение маяка светодиодами ИК-диапазона, УФ-спектра, а также ретрорефлекторной системой. Но это будет уже решаться на стадии практического осуществления данной концепции.

Это позволит увеличить возможный арсенал приемных устройств, уточнять положение объектов с помощью лазерных дальномеров, и повысить надежность системы. Вариант такой схемы компоновки показан на Рис. 4.

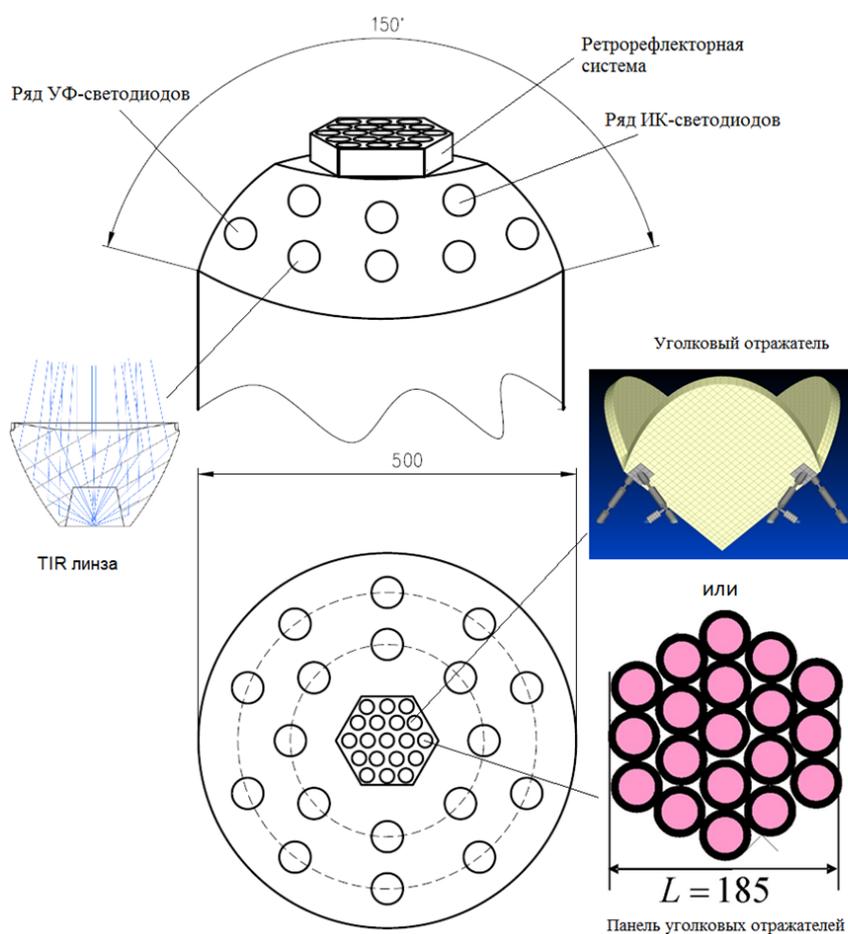


Рис.4. Вариант компоновки оптической системы светового маяка

Заключение

Главная цель для глобальной лунной оптической навигационной системы на основе двухволновой системы световых маяков располагаемых на поверхности Луны – это максимальная доступность для КА ЛНСС при любых обстоятельствах. Использование двух типов световых маяков – УФ-диапазона и ИК-диапазона позволит наблюдать реперные маяки космическими аппаратами как с орбиты Луны, так и при их размещении в точке Лагранжа. УФ-излучатели позволят снизить шумы и засветку солнечным излучением при наблюдении маяка космическими аппаратами, а ИК излучение сможет проходить через земную атмосферу и использоваться для регистрации наземными телескопами. Предложенная навигационная система на основе измерительных оптико-электронных приборов на космических аппаратах и световых маяков на позиционируемых объектах позволит иметь высокоточную систему навигации, которая обеспечит пространственное позиционирование объектов, как на поверхности Луны, так и в окололунном пространстве.

Библиографический список

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. - М.: Радиотехника, 2010. - 800 с.
2. Гордиенко Е.С., Ивашкин В.В., Симонов А.В. Анализ устойчивости орбит искусственных спутников Луны и выбор конфигурации лунной навигационной спутниковой системы // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 4. С. 40 - 54.

3. Ширенин А.М., Мазурова Е.М., Багров А.В. Построение высокоточной селенодезической системы координат на физической поверхности Луны с помощью светодиодных маяков, расположенных на ее поверхности // Космические исследования. 2016. Т. 54. № 6. С. 93 - 498.
4. Багров А.В., Дмитриев А.О., Леонов В.А., Митькин А.С., Москатынъев И.В., Сысоев В.К., Ширшаков А.Е. Глобальная оптическая навигационная система для Луны // Труды МАИ. 2018. № 99. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=66381>
5. Старинова О.Л., Файн М.К. Оптимизация перелета космического аппарата с электроракетной двигательной установкой к точке либрации L2 системы Земля-Луна // Труды МАИ. 2015. № 84. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=63043>
6. Слесаренок С.В., Шепеть И.П., Рубинов В.И., Титов Ю.П. Автокомпенсация погрешностей навигационных датчиков бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Труды МАИ. 2016. № 86. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=66381>
7. Багров А.В., Дмитриев А.О., Леонов В.А., Москатынъев И.В., Сысоев В.К., Ширшаков А.Е. Построение оптической навигационной системы на базе космических аппаратов АО «НПО Лавочкина» // Космическая техника и технологии. 2019. № 4 (27). С. 12 – 28.
8. Виноградов А.П. Лунный грунт из моря «Изобилия: сборник статей. – М.: Наука, 1974. - 624 с.

9. Вернигора Л.В., Пичхадзе К.М., Сысоев В.К. Анализ параметров излучателя оптического маяка для системы навигации космических аппаратов // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=84553>
10. Дмитриев А.Л. Полупроводниковые источники света для передачи и обработки информации. – СПб: СПбГУИТМО, 2006. – 48 с.
11. Захаров А.И., Миронов А.В., Прохоров М.Е., Бирюков А.В. и др. Космический эксперимент «ЛИРА-Б»: Цели и принципы реализации // Астрономический журнал. 2013. Т. 90. № 3. С. 223 - 241.
12. Алдохин П.А., Рафаилович А.С. Телевизионные системы для ультрафиолетовой области спектра // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2005. Т. 6. С. 42 – 47.
13. Авдоченко Б.И., Вилисов А.А., Пушкарев В.П., Тепляков К.В., Юрченко В.И. Источник мощных оптических импульсов на диодах инфракрасного диапазона длин волн // Полупроводниковая светотехника. 2010. № 3. С. 53 - 55.
14. Ультрафиолетовые светодиоды LG Innotek. URL: http://www.azimp.ru/catalogue/UV_LED
15. Матрица GSENSE6060BSI-AM НПК «Фотоника». URL: <https://www.npk-photonica.ru/product/1135/>
16. Зотов В.Д., Виноградова Е.П. Сенсоры ультрафиолетового излучения // Материалы Российской конференции «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения». – М.: ИПУ РАН, 2008. – С. 632 - 637.

17. Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А. Полупроводниковые фотоэлектропреобразователи для ультрафиолетовой области спектра // Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 37. № 9. С. 1025 - 1055.
18. Шугаров А.С., Саванов И.С., Кузин С.В. Приемники излучения в проекте «Спектр-УФ» // Вестник НПО Лавочкина. 2014. № 5. С. 86 – 91.
19. Boyarchuk A., Moiseev A., Shustov B. A 170-CM Space UV Telescope. The Spectrum-Uv Project // Proceedings of the Conference held in Sevilla, Spain, 11th to 14th November 1997, 809 p.
20. Родченко В.В., Садретдинова Э.Р., Заговорчев В.А., Луговцов И.В. Влияние особенностей функционирования двигателя на технические характеристики лунного пенетратора // Труды МАИ. 2012. № 59. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35254>

Two-wave optical lunar navigation system

Bagrov A.V.^{1*}, Dmitriev A.O.^{2}, Leonov V.A.^{1***},
Moskatinyev I.V.^{2****}, Sysoev V.K.^{2*****}**

*¹Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, INASAN,
48, Pyatnitskaya str., Moscow, 119017, Russia*

*²Scientific and Production Association named after S.A. Lavochkina,
Lavochkin Association, 24, Leningradskaya str., Moscow,
Region Khimki, 141400, Russia*

**e-mail: abagrov@inasan.ru*

***e-mail: dmitriev141400@gmail.com*

****e-mail: leonov@inasan.ru*

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

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

Abstract

The article proposes creation of a global lunar optical navigation system based on light beacons located on the lunar surface, operating at two wavelengths. This system, based on optoelectronic devices on spacecraft and light beacons, will allow obtaining a high-precision navigation system both on the Moon surface and in near-Moon space.

Previous articles analyzed in detail the required number of spacecraft to create a radio-technical lunar navigation system and showed that this would require a grouping of eighteen navigation lunar satellites, and a complex data management system for this structure.

The beacons application allows create a lunar navigation connected system (LNCS) on new principles, which allow doing with a minimum number of navigation satellites. In addition, such system is needed, which can be built-up stage-by-stage from the local system (created for a separate lunar area) to the global one (over the entire lunar surface), and from

periodic possibility of the object positioning to the twenty-four-hour one with high measuring operativeness.

The main purpose of the global optical navigation system based on a two-wave system of light beacons, being deployed on the lunar surface, is maximizing accessibility for the LNCS spacecraft in any circumstances. Application of two types of the light beacons, namely ultraviolet and infrared bands will allow observe the reference beacons by the spacecraft from both the Moon orbit and being placed at the Lagrange point. Ultraviolet emitters will allow reduce noises and exposure by the Sun radiation while the beacon surveillance by a spacecraft, while the infrared radiation will be able to pass through the Earth atmosphere for registration by the Earth-based telescopes. The proposed navigation system based on measuring optoelectronic devices located on the spacecraft and light beacons on the objects being positioned will allow high-precision navigation system, which will ensure spatial positioning of the objects on both lunar surface and near-Moon space.

Keywords: Moon, navigation, telescope, LED beacons.

References

1. Perov A.I., Kharisov V.N. GLONASS. *Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* (GLONASS. Principles of developing and functioning), Moscow, Radiotekhnika, 2010, 800 p.
2. Gordienko E.S., Ivashkin V.V., Simonov A.V. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2016, no. 4, pp. 40 - 54.

3. Shirenin A.M., Mazurova E.M., Bagrov A.V. *Kosmicheskie issledovaniya*, 2016, vol. 54, no. 6, pp. 93 - 498.
4. Bagrov A.V., Dmitriev A O., Leonov V.A., Mit'kin A.S., Moskatin'ev I.V., Sysoev V.K., Shirshakov A.E. *Trudy MAI*, 2018, no. 99, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=91814>
5. Starinova O.L., Fain M.K. *Trudy MAI*, 2015, no. 84, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=63043>
6. Slesarenok S.V., Shepet' I.P., Rubinov V.I., Titov Yu.P. *Trudy MAI*, 2016, no. 86, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=66381>
7. Bagrov A.V., Dmitriev A.O., Leonov V.A., Moskatin'ev I.V., Sysoev V.K., Shirshakov A.E. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2019, no. 4 (27), pp. 12 – 28.
8. Vinogradov A.P. *Lunnyi grunt iz morya "Izobiliya"* (Lunar soil from the "Abundance" Sea), Moscow, Nauka, 1974, 624 p.
9. Vernigora L.V., Pichkhadze K.M., Sysoev V.K. *Trudy MAI*, 2017, no. 95, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=84553>
10. Dmitriev A.L. *Poluprovodnikovye istochniki sveta dlya peredachi i obrabotki informatsii* (Semiconductor light sources for information transmitting and processing), Saint Petersburg, SPBGUITMO, 2006, 48 p.
11. Zakharov A.I., Mironov A.V., Prokhorov M.E., Biryukov A.V. et al. *Astronomicheskii zhurnal*, 2013, vol. 90, no. 3, pp. 223 - 241.
12. Aldokhin P.A., Rafailovich A.S. *Interehkspo Geo-Sibir'*, 2005, vol. 6, pp. 42 – 47.
13. Avdochenko B.I., Vilisov A.A., Pushkarev V.P., Teplyakov K.V., Yurchenko V.I. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika*, 2010, no. 3, pp. 53 - 55.

14. *Ul'trafiol'etovyye svetodiody LG Innotek*, available at: http://www.azimp.ru/catalogue/UV_LED
15. *Matritsa GSENSE6060BSI-AM NPK "Fotonika"*, available at: <https://www.npk-photonica.ru/product/1135/>
16. Zotov V.D., Vinogradova E.P. *Materialy Rossiiskoi konferentsii "Tekhnicheskie i programmnyye sredstva sistem upravleniya, kontrolya i izmereniya"*, Moscow, IPU RAN, 2008, pp. 632 - 637.
17. Blank T.V., Gol'dberg Yu.A. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2003, vol. 37, no. 9, pp. 1025 - 1055.
18. Shugarov A.S., Savanov I.S., Kuzin S.V. *Vestnik NPO Lavochkina*, 2014, no. 5, pp. 86 – 91.
19. Boyarchuk A., Moiseev A., Shustov B. A 170-CM Space UV Telescope. The Spectrum-Uv Project, *Proceedings of the Conference held in Sevilla, Spain, 11th to 14th November 1997*, 809 p.
20. Rodchenko V.V., Sadretdinova Eh.R., Zagovorchev V.A., Lugovtsov I.V. *Trudy MAI*, 2012, no. 59, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35254>