

Анализ вариантов навигационных систем для Луны

Дмитриев А.О.*, Москатиный И.В., Нестерин И.М.***, Сысоев В.К.******

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

**e-mail: dao@laspase.ru*

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

****e-mail: nesterin@laspase.ru*

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

Статья поступила 12.04.2021

Аннотация

Проведение детального исследования Луны и дальнейшего ее освоения должно опираться на высокоточную систему позиционирования объектов, находящихся на ее поверхности и в окололунном пространстве. В настоящее время многие космические агентства и исследовательские центры проводят разработки навигационных систем для Луны. Предполагаемые проекты находятся на разных стадиях от концепций до проведения экспериментальных работ. Поэтому актуально провести детальный анализ данных проектов, что является целью данной статьи.

Ключевые слова: Луна, навигация, посадочная станция, космические аппараты.

Введение

Для реализации лунной навигационной системы необходимо провести работы по уточнению селенодезических параметров, которые необходимы для обеспечения построения лунной навигационной системы. [1-2].

Основные задачи селенодезического обеспечения:

1) уточнение фундаментальных селенодезических параметров;

2) установление лунной системы координат, ориентации координатных осей и

начала отсчета:

- определение параметров вращения луны и общелунного эллипсоида;

- уточнение параметров модели гравитационного поля луны (ГПЛ).

3) уточнение данных, полученных по моделям ГПЛ (миссия GRAIL) после 2030

г.:

- несферичность лунного гравитационного потенциала;

- приливные деформации в теле луны;

- гравитационные воздействия земли и солнца.

4) уточнение основных фундаментальных параметров вращения луны (ПВЛ) и

системы Земля-Луна.

Конечно, уточнение этих параметров является отдельной как научной так и практической задачей, которую необходимо решать в рамках Лунных исследований, в том числе и космическими средствами.

В результате длительных наземных и космических видеосъемок поверхности Луны космическими аппаратами создана подробная карта поверхности Луны [3].

Была создана бесшовная, глобально согласованная геологическая карта масштаба 1:5000000 с кратким описанием картографических единиц, полученных из шести цифровых обновленных геологических карт. Она основана на первоначальном цифровом обновлении шести лунных геологических карт масштаба 1:5000000

(ближняя, центральная, дальняя, восточная, западная, северная и южная стороны выпущенных в 2013 году. Эта реконструкция позволяет накладывать старые геологические карты на новые наборы данных с более высоким разрешением, включая мозаику широкоугольной камеры Lunar Reconnaissance Orbiter Camera и цифровую модель рельефа Лазерного высотомера Lunar Orbiter.

Эти исследования [1-3] могут служить основой для создания лунной навигационной системы.

Требования к точности лунной навигационной системы

Прежде определимся с необходимыми точностями, которые должны обеспечивать будущие навигационные системы. Эти точности определяются этапами лунных исследований и освоения Луны. И как показано в табл. 1 они будут меняться от сотен метров до единиц метров.

Таблица 1. Требования к лунной навигационной системе

| Этап лунной программы | Посадка одиночных станций | Посадка групп станций | Посадка в произвольных местах. Стыковка на орбите | Многоразовые посадочные станции (автономные станции) |
|---|---------------------------|-----------------------|---|--|
| Зона действия | Южный регион 90-60 км | - | - | - |
| Точность | 100-200м | 50-100м | 10-100м | 1м |
| Пропускная информационная способность каналов связи | 0-256/1 мбит/с | 20/45 Мбит/с | 45 /125 Мбит/с | 45 /125 Мбит/с |

Этапность создания лунной навигационной системы предполагает кроме поэтапного увеличения точности, также поэтапное увеличение районов навигации от некоторых площадок до вселунной поверхности.

На поверхности Луны потребителями, нуждающимися в информационно-навигационном обеспечении, являются мобильные транспортные средства, используемые для доставки научной аппаратуры, экипажа, вспомогательных систем и средств в заданный район (точку) на поверхности Луны (мобильные потребители). Работа по навигационному обслуживанию может быть заранее спланирована.

При проведении научных экспедиций на поверхности Луны может быть востребована высокоточная координатная привязка результатов космических научных исследований и экспериментов в выбранной навигационной точке (не хуже 1 м) с организацией плановых и достаточно длительных сеансов измерений навигационных параметров (стационарные потребители).

Исходя из вышесказанного, мы сформулируем основные требования к информационной и навигационной поддержке:

- непрерывная по времени доступность в любом из участков полета и во всем регионе ожидаемых перемещений лунных роверов и персонала лунной базы;
- программное обслуживание ограниченного числа потребителей;
- координатно-временное обеспечение лунных космических, мобильных и стационарных потребителей на уровне, аналогичном космическими навигационными системами околоземного пространства.

Задачи Лунной навигации

По задачам необходимым решать на Луне есть два направления которые довольно подробно рассматриваются разными исследователями:

-задача ближайшего применения – обеспечение высокой точности посадки КА на поверхность Луны;

-вторая - это высокоточная навигация в окололунном пространстве и на поверхности Луны.

Структурирование проектов систем лунной навигации

Структуры различных научно-технических предложений разработок в области Лунной навигации показаны на рис.1.

Прежде всего, рассмотрим системы, обеспечивающие посадку КА на поверхность Луны. Такие системы основаны на техническом телевизионном зрении и предполагаются в нескольких вариантах. Это метод светотеневого анализа видеоизображения подстилающей поверхности [4] (п.1.1 рис.1).

На основании исследования вида площадки при различных углах освещения Солнцем возможно квалифицировать при каком положении Солнца неровности поверхности выделяют длинные и отлично различимые тени. Расчетное пространство посадки будет выбрано в менее запятнанной тенями области. Вполне вероятно получение совместного облика подстилающей плоскости в направленности полета бортовой телекамерой и совмещением снимка с обликом поверхности, полученным заблаговременно при этих же параметрах освещения.

Во время спуска в реальном времени анализируется светотеневая обстановка в надире спускаемого аппарата. Бортовой компьютер определяет состояние незатененной площадки наибольшего размера в центре кадра и управляет горизонтальными корректировками спуска так, чтобы она все время пребывала в центре поля зрения видеокамеры.

Когда во всем поле зрения не окажется теней, это станет значить, что спуск ведется на район Луны с безопасным рельефом.

В процессе снижения масштаб отображения станет лишь только вырастать. По скорости движения в горизонтальном направлении резких пределов теней, возможно, определить горизонтальную скорость спускаемого аппарата (СА), и снизить ее до требуемой величины, имея ещё запас во времени, отводимый на погашение вертикальной скорости. На данном же этапе по датчикам звездной ориентации нужно довести ориентацию СА до требуемых значений азимутальных углов.

Предлагаемая схема управления плавной посадкой СА может гарантировать безопасный спуск КА в избранном регионе Луны. В принципе, точность посадки в данной точке имеет возможность настолько высокой, насколько позволят системы управления перемещением СА.

При частоте кадров бортовой телекамеры 30 кадр/сек и продолжительности спуска на третьем этапе 10 сек в распоряжении систем управления будет 300 мгновенных положений СА.

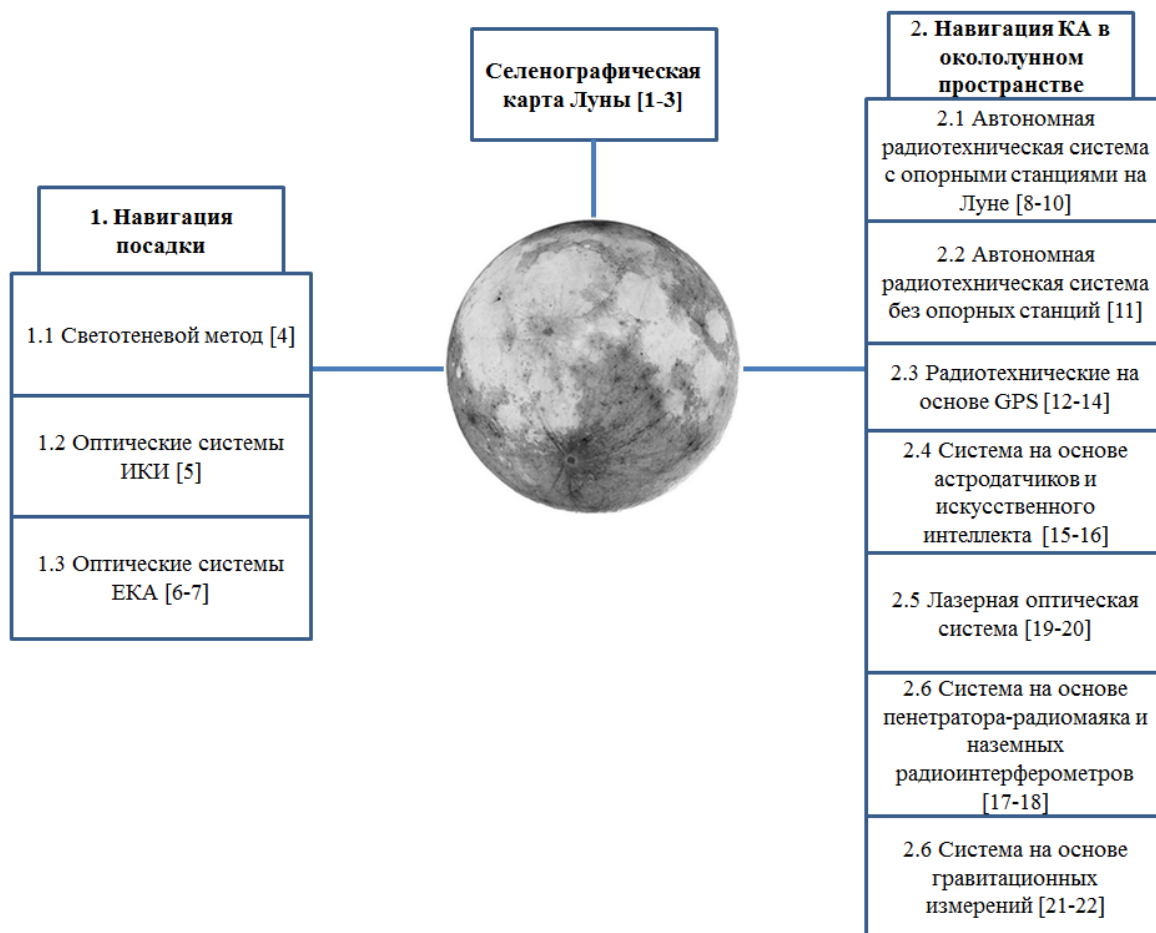


рисунок 1. Схема лунных навигационных систем

Вторая система данного направления - это предложение ИКИ РАН [5] (п.1.2 рис. 1).

Автономная оптическая навигация на окололунных орбитах и при посадке на Луну может осуществляться с помощью сверхширокоугольной навигационной камеры с углом зрения -180° , функционирующей в комплексе со звездными и инерциальными датчиками ориентации. Данная система позволит реализовать:

- исходную оценку положения КА на окололунных орбитах по горизонту Луны без сильной надобности использования априорной орбитальной информации;
- абсолютную навигацию на окололунных орбитах и на первом рубеже главного торможения по контрольным точкам на плоскости Луны, которая даст возможность оценки положения КА с точностью более 100 м;
- относительную навигацию на наименьших высотах на участке главного торможения по смещению ориентиров на последовательных изображениях;
- оценку боковой скорости КА по смещению ориентиров и построение карты риска с анализом безопасного пространства посадки на заключительном рубеже посадки — вертикальном спуске.

Примером осуществления проекта использования сверхширокоугольной навигационной камеры для автономной оптической навигации в лунных проектах служит камера обзора системы посадки (КОСП), эскизное проектирование которой приведено в ИКИ РАН [5].

И как пример развития оптических методов обеспечивающих высокоточную посадку можно рассмотреть работы [6-7] (п.1.3 рис. 1).

Данные работы ЕКА предлагают методы, навигации, основанные также на техническом зрении. Первый подход заключается в отслеживании признаков между последовательностями изображений с целью измерения угловой скорости, а также направления вектора скорости космического аппарата. Второй подход направлен на идентификацию объектов изображения с помощью геопривязки бортовая база

данных для определения ориентации и положения космического аппарата. Однако существующие алгоритмы имеют ограниченную устойчивость к различным условиям освещения и характеристикам поверхности. В данных работах представлена разработка автономной навигационной системы на основе технического зрения, решающей эти проблемы. Численное моделирование показало, что эта система способна оценивать положение и скорость транспортного средства с точностью более 100 м и 0,1 м/с соответственно. Минус данной системы привязка по объектам на поверхности Луны (кратерам, горам и т.д.), которые сами по себе не имеют жесткую привязку в системе координат.

Далее рассмотрим глобальные навигационные лунные системы. После успехов земных радионавигационных систем GLONAS, GPS и др. конечно многими исследователями рассматривались подобные системы для Лунной навигационной системы [8-14].

Разнообразие таких систем требует их структурирования, что является целью данной работы (как показано на рис 1)

Прежде всего, рассмотрим полный аналог земной автономной радионавигационной системы для Луны, представленной ЦНИИМАШ-ИСС в работе [8-10] (п.2.1. рис.1). Общая схема такой системы показано на рис 2.

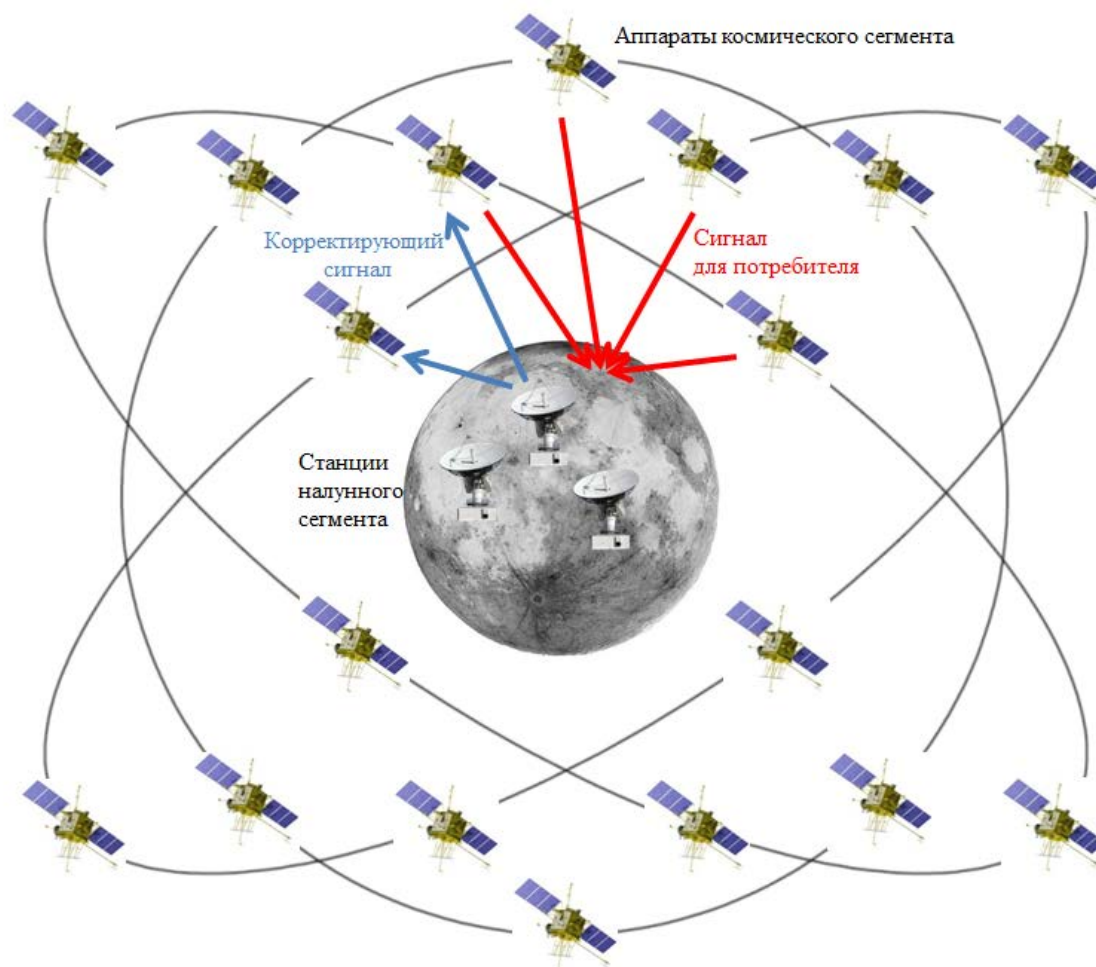


Рисунок 2. Схема автономной радионавигационной системы из 18 спутников.

Синими стрелками показаны сигналы с опорных наземных пунктов, объект должен принимать сигналы от 4-х спутников (красные стрелки)

Первый вариант — это радионавигационная система, аналогичная земному GPS и др. Она требует наличия до 18 лунных орбитальных спутников и наземных станций. Ее преимущество - полная автономность, недостаток — большое количество элементов инфраструктуры и, как следствие, дороговизна.

По планам АО «ИСС» информационно-навигационного обеспечение состоит из двух важных направлений: окололунное космическое пространство и поверхность Луны.

Окололунное космическое пространство охватывает сферическую область с радиусом от центра Луны до 20 000 км, в которую попадают:

- космические потребители, осуществляющие орбитальные маневры на подлетных траекториях для попадания в заданный район поверхности Луны или перевода на окололунную орбиту;

- космические потребители, осуществляющие пассивный полет по окололунным орбитам;

- космические потребители, проводящие орбитальные маневры для перехода на другую орбиту, для попадания в заданный район поверхности Луны или для обеспечения отлета от Луны.

Навигационно-связное обеспечение космических потребителей осуществляется на участках пассивного полета по орбите, охватывающих зоны выдачи импульса для орбитального маневра. Чем продолжительней участок навигационных измерений, тем точнее корректируется орбита и прогнозируются параметры места посадки на поверхность Луны. Работа с космическими потребителями по навигационному обеспечению может быть разнесена по временным интервалам, учитывая их малочисленность на начальном этапе освоения Луны.

Согласно проведенным исследованиям обеспечение связью потребителей на поверхности Луны (100 % однократное покрытие при рабочих углах места 5°) реализуется следующими ОГ:

- высота орбиты 1000 км, наклонение 90° (58°), количество КА – 18 (15), размещенных равномерно в 3 плоскостях;

- высота орбиты 1500 км, наклонение 90° (58°), количество КА – 10 (8), размещенных равномерно в 2 плоскостях;

- высота орбиты 4260 км, наклонение 90° (58°), количество КА – 8 (6), размещенных равномерно в 2 плоскостях.

Для целей навигации трехплоскостная структура ОГ из 15 КА с наклонением орбиты 58° , высотой 4260 км обеспечивает глобальное 100 % 3-кратное покрытие и глобальное 99,8 % 4-кратное покрытие поверхности Луны, а из 18 КА 100 % 4-кратное покрытие поверхности Луны.

ОГ с двукратным покрытием для дуплексной связи и активной дальномерной навигации: высота орбиты 4260 км ($a = 6000$ км), наклонение 58° , количество НКА – 8–10, равномерно размещенных в двух плоскостях.

Резюмируя анализ проведенных исследований по составу ОГ позволяет осуществить предварительный синтез следующих альтернативных вариантов структур ОГ, обеспечивающих навигацию и связь в реальном времени для потребителей на лунной поверхности:

1. ОГ с однократным покрытием для дуплексной связи и пассивной доплеровской навигации: высота орбиты 1000 км ($a = 2737$ км), наклонение 58° ,

количество НКА – 15, размещенных в трех плоскостях, равномерно по 5 КА в плоскости.

2. ОГ с 3(4)-кратным покрытием для дуплексной связи и активной (пассивной) дальномерной навигации: высота орбиты 4260 км ($a = 6000$ км), наклонение 58° , количество НКА – 15 (18), равномерно размещенных в трех плоскостях.

Второй проект (п.2.2. рис.1.) основан на использовании 6 лунных орбитальных спутников и межспутниковой лазерной навигационно-связной системы (МЛНСС). Но эта система также сложна и требует поддержания точного орбитального положения этих шести спутников и создание высокочувствительных приемников.

Этот вариант путем множества итераций предложили [10-11]. Авторы настаивают на том, что система будет автономна, т.е. не будет зависеть от наземных пунктов поддержки (GPS и др.), и не потребует наземных реперов. И все самоопределение системы, и поддержание орбит будет проходить исключительно по

каналам

связи

между

спутниками.

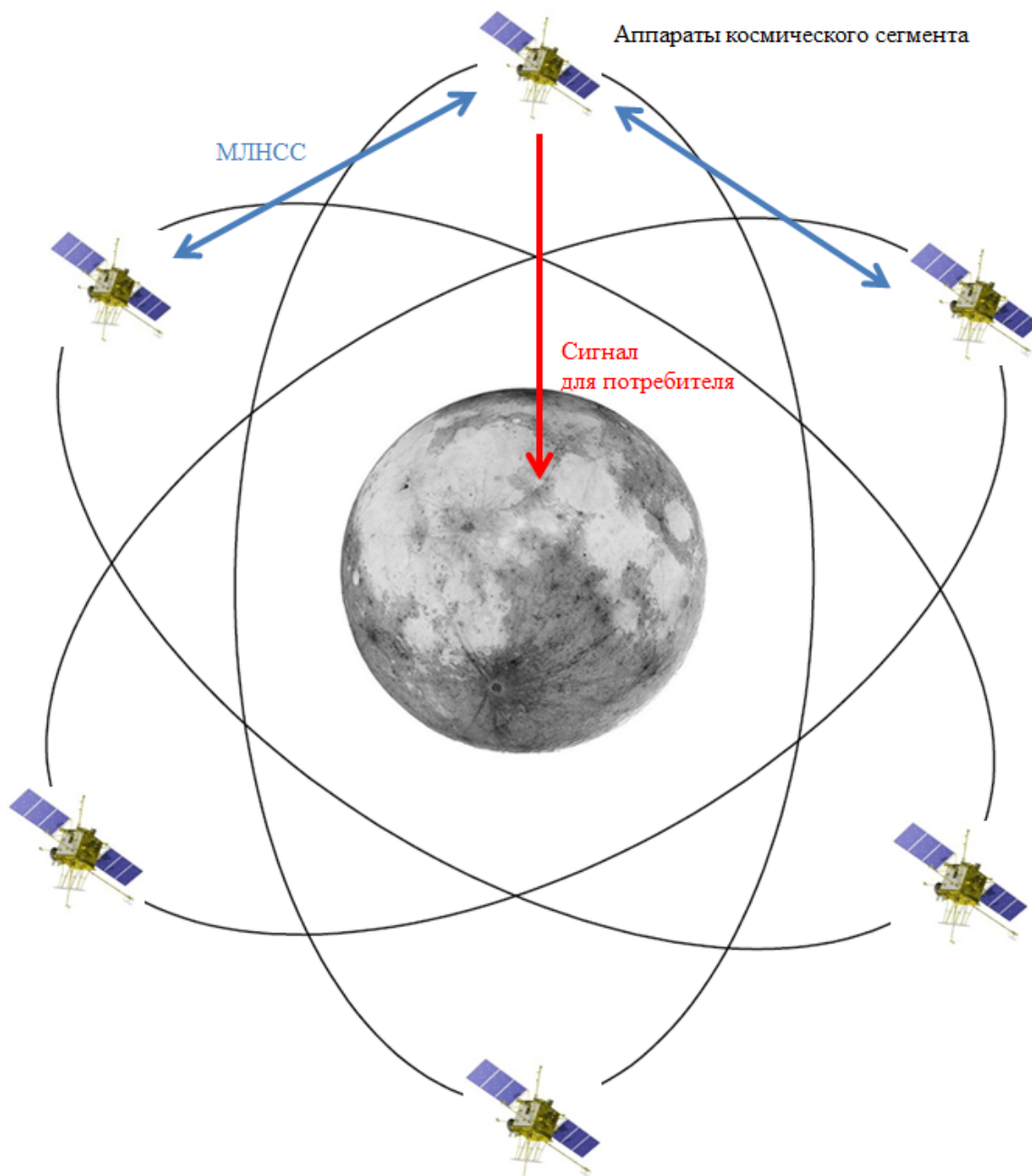


Рисунок 3. Схема автономной самоопределяющейся радионавигационной системы из 6 спутников. Самоопределение положения системы происходит за счет постоянной передачи информации между спутниками (синие стрелки). Потребитель получает сигнал от одного КА (красная стрелка).

Третья радионавигационная система (п.2.3. рис.1.) это практически полностью работающая на сигналах земных навигационных систем (GPS и др.). Для этого в ней предполагается создание высокочувствительных приемников (экспериментальные работы уже ведутся). Для стабильной и надёжной системы предполагается использование данных приемников на окололунных спутниках или посадочных станций на поверхности Луны [12-14].

Околоземная навигация осуществляется GPS, европейской системы Galileo и российской системы ГЛОНАСС — суммарно 81 спутника работают на высоте около 20,1 тыс. км над поверхностью Земли и доступны любым навигационным приёмникам на Земле.

Основная задача этих КА – передавать сигнал потребителям на поверхность Земли. Но также они способны излучать и в космос. Характеристики радиооборудования данных КА достаточно высоки, чтобы их сигналы были доступны для аппаратов на окололунной орбите. По оценкам КА на лунной орбите сможет принимать сигналы от 5 до 13 спутников.

НАСА разрабатывает спутниковую группировку системы позиционирования Луны, которая позволит посадочному модулю приземлиться на лунную базу с точностью до 1 м. Для этого NASA разрабатывает приёмник, который сможет принимать сигналы от нескольких десятков спутников GPS.

Использование данной системы затруднено в полярных регионах Луны так как земные навигационные КА находится низко над горизонтом. Сигналы спутников могут заблокировать лунные холмы или края кратера. Для решение этой проблемы

предложено использовать два спутника- ретранслятора на лунной орбите. Для этого рассмотрено два варианта А и В, два спутника-ретранслятора Луны (LRS) будут работать на 12-часовых орбитах с наклоном $57,7^\circ$. В варианте созвездия А космический аппарат будет находиться в одной плоскости для обеспечения охвата одного полушария, при этом одна LRS будет действовать как запасная. В варианте созвездия В LRS будут находиться в ортогональных плоскостях, что означает, что оба полушария будут покрыты двумя спутниками (рис.4).

Одной из основных задач развития данной системы является создание высокочувствительного навигационного приемника NavCube [14]. Цель заключалась в создании приёмника, который будет работать в космосе и будет быстро получать и отслеживать радиоволны GPS даже в областях со слабым сигналом. В новом приёмнике соединятся технологии навигатора GPS с MMS-миссии и SpaceCube, реконфигурируемой, с очень быстрой бортовой компьютерной платформой.

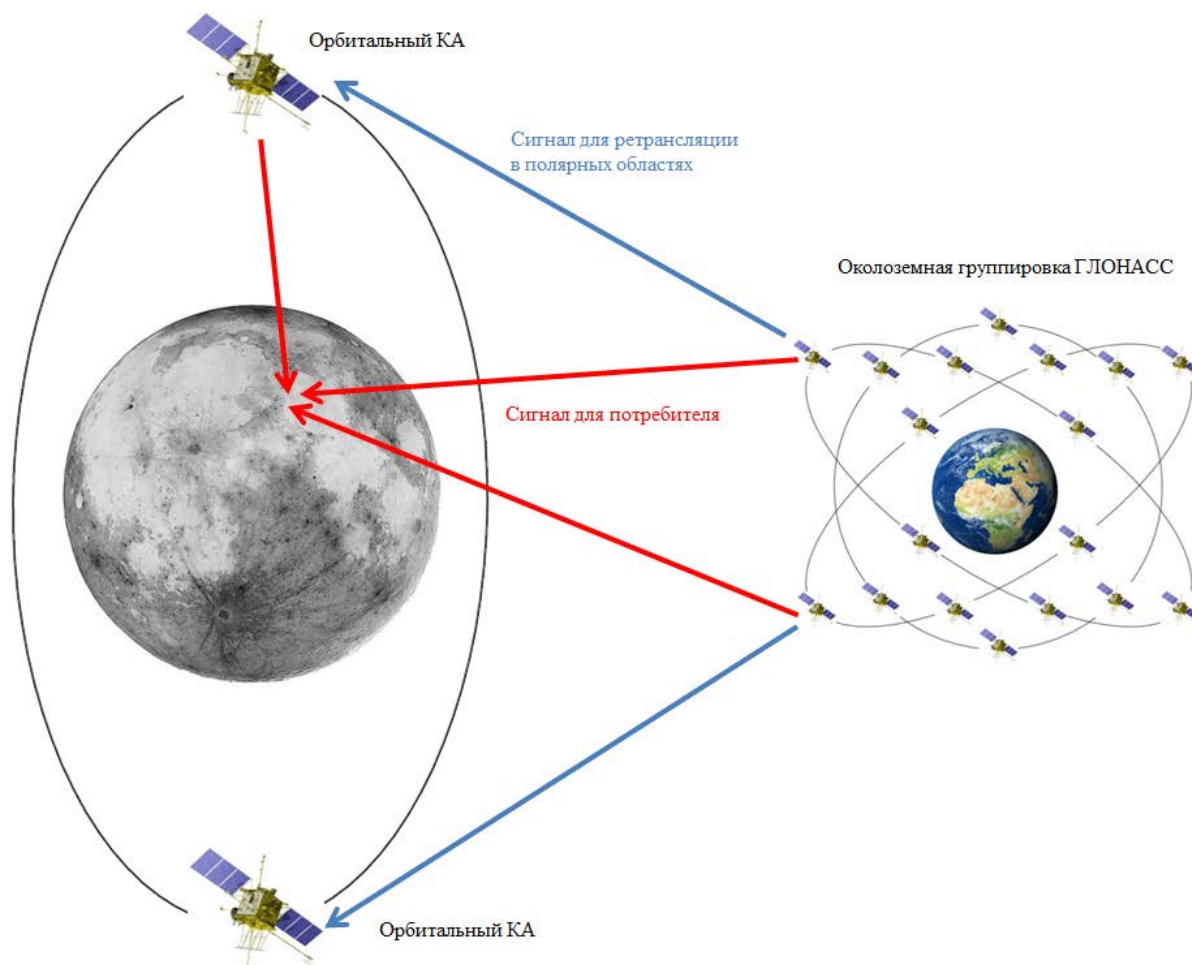


Рисунок 4. Схема радионавигационной системы, основанной на приеме сигналов земных радионавигационных систем. 2 аппарата выступают в качестве ретрансляторов, принимая сигналы земных служб (синие стрелки). Потребитель получает сигналы как с околоземных спутников, так и от окололунных (красные стрелки).

Четвертый проект (п.2.4. рис.1.) может использоваться для посадочных станций и луноходов. Он основан на совмещении астрономических наблюдений (звездный датчик) с данными с датчика вертикали и гироскопов, использует имеющуюся геодезическую карту Луны. Из минусов данного метода нужно сложную математику

и актуальность только для налунных объектов, а из плюсов то, что он не требует дополнительных космических аппаратов.

В работе китайских исследователей предлагается инновационный метод на основе Sins (Strapdown Inertial Navigation System) [15-16] с помощью звездных датчиков для точного определения положения и ориентации лунохода. Этот метод состоит из двух частей: начального определения положения и навигации. Определение положения лунохода состоит из первоначального «грубого» определения положения по объектам на поверхности Луны и уточняющей навигации по звездам. После завершения начальной настройки система может быть использована для обеспечения навигационных решений лунохода в режиме реального времени. Предложен автономный навигационный алгоритм для оценки и компенсации накопленных ошибок SINS в режиме реального времени. Высокоточная информация об ориентации от звездного датчика используется для исправления ошибок в расчетах. Результаты моделирования показывают, что предложенными методами можно добиться высокой точности автономной навигации луноходов.

Также есть аналогичное предложение от российских ученых из ИНАСАН и АО «НПО Лавочкина». Оно описано в патенте «Способ высокоточного позиционирования аппарата на поверхности Луны и устройство для его осуществления» (№2692350). Способ высокоточного позиционирования аппарата на поверхности Луны, состоит в измерении ориентации местной вертикали в точке позиционирования в аппаратной системе координат с помощью бортового датчика вертикали, в измерении положений двух навигационных звезд в аппаратной системе

координат с помощью бортовых звездных датчиков, при фиксации момента проведения измерений в шкале всемирного времени бортовой службой времени, в вычислении положения местного меридиана в системе лунных небесных координат с помощью бортового вычислительного устройства по данным проведенных измерений и с использованием известных экваториальных координат навигационных звезд и экваториальных координат полюса Луны. При этом в вычислении положения нулевого меридиана системы селенодезических координат для момента времени измерений используются параметры математической модели движения Луны, в результате чего широта позиционируемой точки вычисляется как высота полюса Луны над местным горизонтом, а долгота позиционируемой точки определяется как разность прямых восхождений местного и нулевого меридианов, вычисленных для момента проведения измерений.

Поставленная цель достигается тем, что находящийся на Луне аппарат снабжен звездными датчиками, датчиком вертикали, бортовым вычислительным комплексом и системой точного времени, необходимыми для проведения работ по целевому назначению аппарата, а в бортовой вычислительный комплекс дополнительно загружена математическая модель движения Луны, т.е. теоретически заданное положение полюса Луны и нулевого меридиана на небесной сфере в любой момент времени, а также производится фиксация момента проведения измерений. В результате измерений широта точки позиционирования вычисляется как высота лунного полюса над местным горизонтом, а долгота - как разность прямых

восхождений (в системе экваториальных небесных координат) нулевого и местного меридианов, вычисленных для момента проведения измерений.

Сочетание модельных характеристик ориентации тела Луны относительно звезд и результатов измерений положений позиционируемого аппарата относительно звезд и направления на центр масс Луны позволяет однозначно определить широту и долготу аппарата в селеноцентрической системе координат с точностью, определяемой точностью проводимых измерений.

Точность позиционирования по описанному способу определяется точностью измерений положений звезд и местной вертикали. Если же на борту посадочной станции будут применены односекундные датчики, то точность позиционирования по каждой координате возрастет до 1 метра.

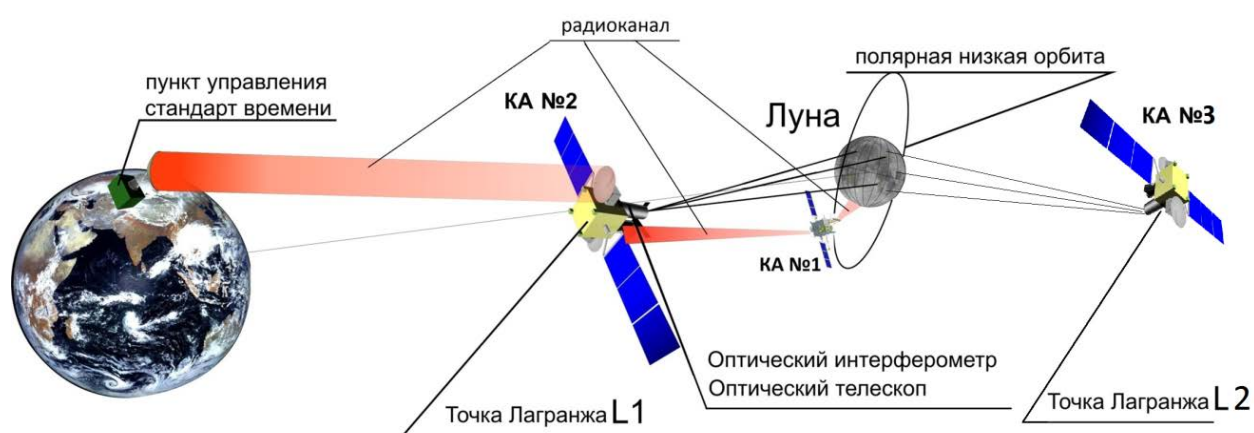
Еще одним способом налунной навигации является система с использованием Искусственного Интеллекта (ИИ). Суть которой заключается в использование большого количества фрагментов (файлов) различных видов информации которые требуют поиск связей в этом объеме информации чему может способствовать информационно-компьютерные технологии ИИ. И эту способность ИИ использовали в Development Lab (подразделение NASA) и Artificial Intelligence Products Group (подразделения Intel), [16] разрабатывающие технологию «планетарной навигационной системы», основанную на использовании огромного массива фотоснимков лунных ландшафтов, сделанных космическими аппаратами и экспедициями американских астронавтов.

Благодаря нейронной сети с технологией машинного обучения специалисты

смогли создать лунный навигационный сервис, загрузив в него 2.4 млн фотоснимков лунной поверхности, сделанных разными лунными миссиями. Нейронная сеть объединила эти снимки в глобальный «фотоландшафт виртуальной Луны».

Таким образом, пользователь на поверхности Луны, предъявляя созданной математической модели, фотоснимок окружающего его ландшафта, получит от навигационного сервиса рекомендации по маршруту передвижению к желаемому объекту.

Далее рассмотрим пятый проект это оптико-электронную лунную навигационную систему (п.2.5. рис.1). Система, предложенная в работе [17-18] 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 позволит построить поэтапную лунную навигационную систему с точностью до 5 метров.



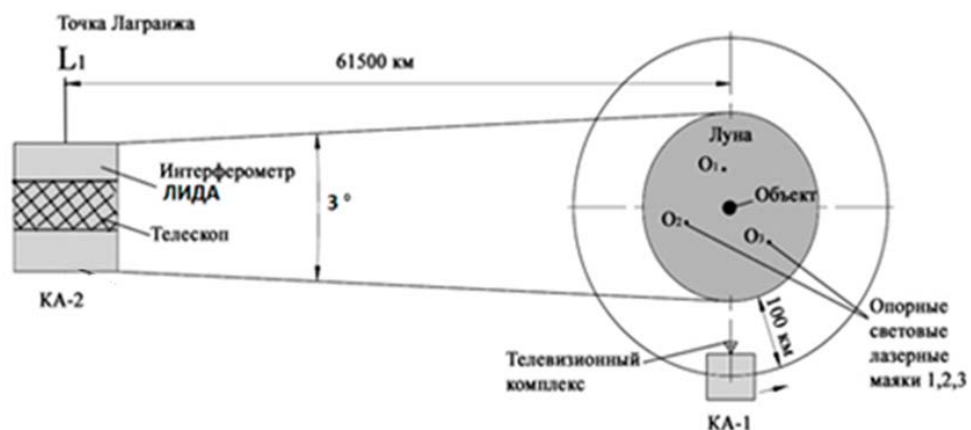


Рисунок 5. Схема построения глобальной оптической лунной навигационной системы [17-18]:

- а) – схема размещения космических аппаратов;
- б) – схема наблюдения

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 светового излучателя составляет 1-2 мм на основе лазерных диодов, и точность определения видимого положения центра изображения излучателя может быть в несколько раз больше его линейного размера, координатные измерения положений оптических маяков могут быть выведены на субмиллиметровый уровень точности.

Современная светотехника позволяет изготавливать компактные излучатели монохроматического излучения в различных спектральных диапазонах и в очень широком диапазоне излучаемой мощности. Нет принципиальных ограничений на то, чтобы создать световые маяки с собственной яркостью, достаточной для их

уверенной видимости в любой точке лунной поверхности, как на неосвещенной стороне Луны, так и на фоне рассеивающей солнечный свет поверхности.

Используя эти возможности, что возможно оптическое решение задачи точного определения места посадки посадочной станции на снимке окружающей лунной поверхности. Световой маяк на борту будет зафиксирован телекамерой на борту ИСЛ в виде яркой точки на снимке лунной поверхности.

Задача непрерывного мониторинга всей лунной поверхности с целью позиционирования всех находящихся на ней объектов по предложенной схеме может быть решена дополнением низкоорбитального ИСЛ двумя аппаратами в точках либрации системы «Земля-Луна». Из каждого аппарата будет видно полное полушарие Луны оптические маяки на поверхности Луны можно будет наблюдать непрерывно, а точность их позиционирования будет определяться исключительно точностью бортовой оптической угломерной аппаратуры.

Преимущества перед традиционной схемой глобальной навигации на основе радиодальнометрии следующие:

1) навигационная система на основе световых маяков может быть полностью обеспечена:

а) группировкой из 3 ИСЛ, если требуется непрерывная навигация всех аппаратов одновременно на видимой и обратной стороне Луны;

б) группировкой из 2 ИСЛ, если необходимо обеспечить навигацию аппаратов на одном полушарии;

в) одним спутником на полярной орбите, если частота позиционирования допускается один раз в две недели.

2) навигационная система на основе оптических маяков не нуждается в поддержке напланетными системами мониторинга орбитальных характеристик навигационных аппаратов. Проводимые на борту ИСЛ измерения дуг между звездами и маяками позволяют обеспечить самоопределение положений ИСЛ в пространстве. Любой ИСЛ с телевизионной аппаратурой для съемок поверхности Луны, оснащенный звездными датчиками и службой точного времени, может быть использован в качестве части навигационной системы.

3) точность координатных измерений с борта полярного ИСЛ с бортовой аппаратурой (служба времени, звездные датчики, телекамеры) освоенного уровня обеспечит позиционирование объектов с точностью от 10 до 30 метров (в зависимости от удаленности объекта от узлов каркаса установленной системы координат). Эта точность может быть повышена до любого уровня (вплоть до уровня субмиллиметровой точности) повышением точности угловых измерений на борту ИСЛ и размещением дополнительных маяков на поверхности Луны (за счет увеличения числа узлов каркаса селеноцентрической системы координат).

4) данная лунная навигационная система использованием ИСЛ в точке либрации L_1 системы Земля-Луна может быть легко дополнена функцией ретрансляционного узла для связи аппаратов на Луне с Землей.

Шестой проект – весьма оригинальным является предложение, развитое в работах [19-20] (п.2. рис 1.) об использовании лунных пенетраторов с

радиосистемами. Множество таких пенетраторов образуют сотовую сеть на Луне, которая связана с земными системами радиоинтерферометрии (VLBI) как показано на рис.6.

Данная система (LunaCell) основана на развертывание сети пенетраторов с радиосистемами развернутых на поверхности Луны. Пенетраторы, каждый из которых имеет бортовую оборудование, связь, визуализацию и другие датчики, будут доставляться на космическом аппарате. Космический аппарат будет расставлять пенетраторы по ранее разработанной соответствующей схеме [21].

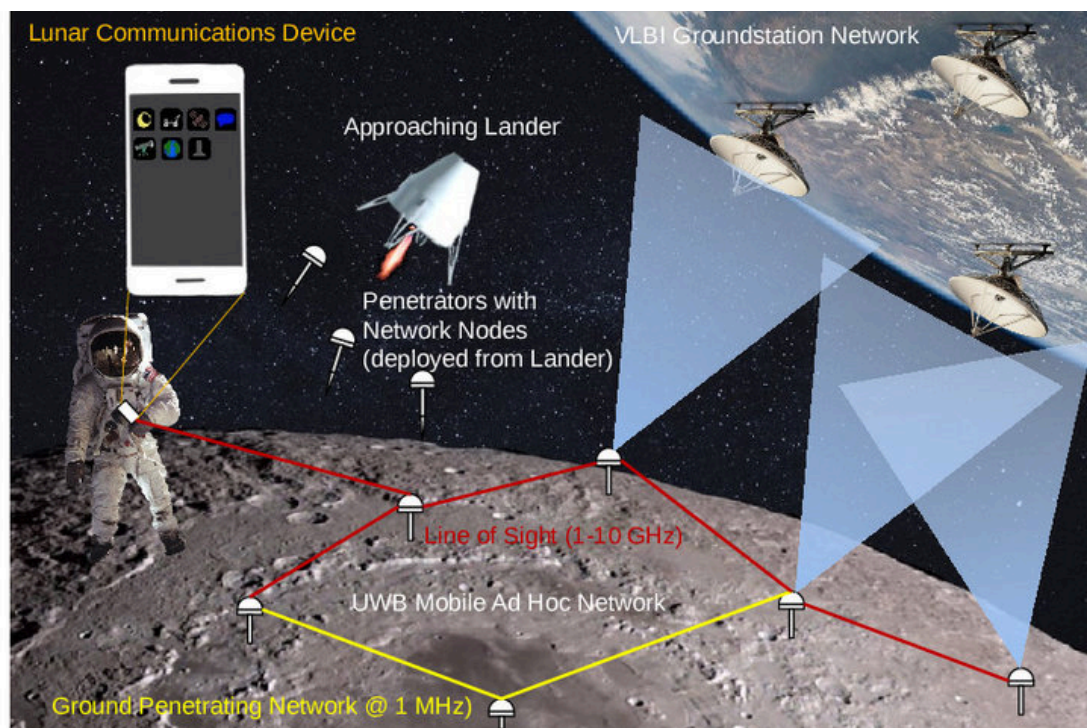


Рисунок 6. Лунная навигационная система с использованием сети пенетраторов и земных радиоинтерферометров [20].

После развертывания каждый пенетратор будет оценивать направление и

расстояние до других пенетраторов, (после их внедряются в лунную поверхность) и сформируют коммуникационную сеть. Система сконструирована таким образом, чтобы пенетраторы не зарывались слишком глубоко при посадке, что позволило бы разворачивать коммуникационные мачты и устанавливать локальная сеть. Используя бортовые радиочастотные системы пенетраторы определяют свое положения относительно друг друга на лунной поверхности исходя из поверхностных особенностей Луны и астрономических наблюдений. Использование интерферометрии (VLBI), которая может определять местоположение космических аппаратов с точностью до менее метра с помощью наземных радиотелескопов, позволяет более точно определять местоположение пенетраторов-узлов сети с Земли. Это позволит использовать бортовые системы синхронизации и позиционирования, откалиброванные с точностью, близкой к GPS. После развертывания на поверхности, процесс, который должен занять не более нескольких минут, пенетраторы будут готовы действовать как маяки позиционирования для спускающегося космического аппарата, а также использоваться для обеспечения локационного позиционирования, зональной связи, безопасности объекта и распределенных сетей научных приборов. Планируется использовать UWB маяки в диапазоне 2-14 ГГц, предназначенные для взаимодействия с обычными режимами новой глобальной системы наблюдения VLBI точностью пикосекундного уровня во время обычных сеансов наблюдения VGOS. Система Luna Cell предназначена для обеспечения коммуникационных и навигационных решений для лунных операций. Основы дифференциальной VLBI разрабатывались десятилетиями с использованием естественных и искусственных

источников радиоизлучения. Используя сверхширокополосную технологию (UWB) для обеспечения когерентной широкополосной передачи в нескольких частотных диапазонах, дифференциальная VLBI должна быть способна обеспечить поперечную точность 0,25 нанорадиана, или 10 см на лунной поверхности, и мгновенную дальность положения около 6 метров. Поверхностные маяки могли бы также обеспечить фазовые опорные источники для орбитальных маяков в поддержку критических по времени лунных операций, таких как во время посадки навигации, и будут полезны для лунной науки.

Седьмой проект – (п.2.7. рис.1) [22-23] это навигационная система на параметрах гравитационного поля. Подобные системы пробуют строить и для Земли.

Проведенное во ВНИИФТРИ программно-математическое моделирование показало возможность создания лунных систем навигации, использующих измерения параметров гравитационного поля Луны.

При использовании градиентометров и гравиметров потенциально достижимая точность навигации на Луне выше, чем на Земле, так как градиент гравитационного поля Луны по значительности выше земного. Таким образом аномальность (изрезанность) Лунного поля более выражена, чем аномальность гравитационного поля земной поверхности. Поэтому при измерениях одинаковой бортовыми гравитационными устройствами планируемая точность навигации на Луне выше.

В настоящее время ведется создание демонстрационных стендов и макетов новых систем позиционирования, использующих гравитационные поля космических

объектов. Такие системы смогут стать ассистирующими (вспомогательными) в работе лунного ГЛОНАСС.

Преимуществом такой системы является то, что она является помехозащищенной. Вспомогательные системы навигации на основе измерений параметров гравитационного поля имеют абсолютную помехозащищенность, из-за отсутствия искусственных гравитационных шумов на поверхности Луны. Массив данных о гравитационном поле Луны уже достаточно велик. Самая крупная миссия, направленная на сбор таких данных это миссия GRAIL.

GRAIL — программа изучения гравитационного поля и внутреннего строения Луны, реконструкции её тепловой истории и позволила получить более полную информацию о формировании Луны.

Программа реализовывалась парой космических аппаратов, которые были запущены 10 сентября 2011 года. Аппараты с орбиты высотой 55 километров снизили до орбиты высотой около 23 километров. Это позволило получить более точные данные при том, что уже сейчас разрешение созданной по данным GRAIL карты гравитационного поля Луны превосходит аналоги в три-четыре раза.

Метод сейчас представляет собой просто интересную идею без должной проработки и сложно оценивать точность, быстродействие и затраты на аппараты и их количество именно для этого метода навигации.

Заключение

По итогам анализа были выделены основные типы навигационных систем, предлагаемых к разработке российскими и иностранными исследователями.

Конечно, есть еще ряд концепций, например, навигация по пульсарам, но они еще сложнее в реализации и хуже по точности, чем рассматриваемые выше варианты.

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.

У всех видов систем есть как свои плюсы, так и недостатки: 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.

Поэтому считаем, что предложенная лунная оптическая навигационная система актуальна и решает многие проблемы и недостатки указанных выше современных проектов и предложений в области навигации на Луне.

Библиографический список

1. Чеботарев В.Е., Кузымов В.И., Коняев А.В. Земные навигационные технологии в селенодезическом обеспечении // Космические аппараты и технологии. 2018. Т. 24. № 2. С. 79 – 82.

2. Варакина Н.А. Создание навигационной опорной сети на поверхности Луны в фундаментальной системе координат: Дисс. ... к.ф-м.н. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2013. - 205 с.
3. Fortezzo C.M., Spudis P.D., Harrel S.L. Release of the digital unified global geologic map of the Moon at 1:5 000 000 scale // 51st Lunar and Planetary Science Conference, 2020.
URL: <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2020/pdf/2760.pdf>
4. Багров А.В., Вятлев П.А., Сергеев Д.В., Сысоев В.К. Концепция обеспечения посадки лунных посадочных станций посредством светотеневого анализа видеоизображения подстилающей поверхности // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2012. № 5 (16). С. 47 - 53.
5. Жуков Б.С., Полянский И.В., Жуков С.Б. Автономная оптическая навигация на окололунных орбитах и при посадке на Луну с помощью сверхширокоугольной камеры // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 24 – 35. DOI: [10.21046/2070-7401-2017-14-2-24-35](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-2-24-35)
6. Bilodeau V.S., Clerc S., Draï R., de Lafontaine J. Optical Navigation System Pin-Point Lunar Landing // IFAC Proceedings, 2014, vol. 47, issue 3, pp. 535 – 542.
DOI: [10.3182/20140824-6-ZA-1003.01693](https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01693)
7. Mark J. Verweld Relative Optical Navigation for a Lunar Lander Mission // Advances Aerospace Guidance, Navigation and Control, 2013, pp. 661 - 679.
8. Каплев С.А., Кременецкий Н.О., Игнатович Е.И., Болкунов А.И. Выбор структуры орбитальной группировки лунной навигационно-связной системы для различной кратности покрытия и этапов предоставления услуг // Полет. 2019. № 11. С. 3 – 19.

9. 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.
10. Чеботарев В.Е., Кудымов В.И., Звонарь В.Д., Внуков А.А., Владимиров А.В. Концепция околорунной навигации // Исследования наукограда. 2014. № 4 (10). С. 14 – 20.
11. Шаргородский В.Л., Косенко В.Е., Садовников М.А., Чубыкин А.А., Мокляк В.И. Лазерный ГЛОНАСС // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. М.Ф. Решетнева. 2013. № 6 (52). С. 50 - 55.
12. Capuano V., Botteron C., Ledere J., Han J. et al. Feasibility study of GNSS as navigation system to reach the Moon // Acta Astronautica, 2015, vol. 116, pp. 186 - 201. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.06.007>
13. Микрин Е.А., Михайлов М.В., Орловский И.В., Рожков С.Н., Семёнов А.С., Краснопольский И.А. Навигация околорунных космических аппаратов по измерениям от навигационных систем ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, BEIDOU // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27. № 3 (106). С. 3 - 17. DOI: [10.17285/0869-7035.0005](https://doi.org/10.17285/0869-7035.0005)
14. Detepaut A., Giordano P. et al. Use of GNSS for lunar missions and plans for lunar in-orbit development // Advances in Space Research, 2020, vol. 66, no.12, pp. 2739 – 2756. DOI: [10.1016/j.asr.2020.05.018](https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.018)
15. Li Xie, Peng Yang, Thomas Yang, Ming Li. Dual-EKF-Based Real-Time celestial Navigation for Lunar Rover // Mathematical Problems in Engineering, 2012. URL: <https://doi.org/10.1155/2012/578719>

16. 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>
17. Багров А.В., Дмитриев А.О., Леонов В.А. и др. Система глобального позионирования для Луны на основе активных световых маяков // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2017. № 4 (38). С. 5 - 10.
18. Багров А.В., Дмитриев А.О., Леонов В.А. и др. Построение оптической лунной навигационной системы на базе космических аппаратов АО «НПО Лавочкина» // Космическая техника и технологии. 2019. № 4 (27). С. 12 - 26. DOI: [10.33950/spacetech-2308-7625-2019-4-12-26](https://doi.org/10.33950/spacetech-2308-7625-2019-4-12-26)
19. Дмитриев А.О., Багров А.В., Сысоев В.К., Поляков А.А. Построение селенодезической системы координат на основе пенетраторов // XLIV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва: сборник тезисов конференции (Москва, 28-31 января 2020). - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. С. 281 – 282.
20. M. Eubanks, Ch.F. Radley, W.P. Blasé. Local navigation in lunar polar regions with compass, lunacell and mobile ad НОС Geodesy // Lunar and Planetary Science Conference, Houston, TX, USA, 2020, vol. 51.
21. 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>

22. Maria T. Zuber, David E. Smith, Michael M. Watkins. et al. Gravity Field of the Moon from the Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL) Mission // Science, 2013, vol. 339, issue 6120, pp. 668 – 671. DOI: [10.1126/science.1231507](https://doi.org/10.1126/science.1231507)

23. Афонин А.А., Сулаков А.С., Ямашев Г.Г., Михайлин Д.А., Мирзоян Л.А., Курмаков Д.В. О возможности построения бесплатформенного управляющего навигационно-гравиметрического комплекса беспилотного летательного аппарата // Труды МАИ. 2013. № 66. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=40812>

Options analysis of navigation systems for the Moon

Dmitriev A.O.*, **Moskatinev I.V.****, **Nesterin I.M.*****, **Sysoev V.K.******

*Lavochkin Research and Production Association, NPO Lavochkin,
24, Leningradskay str., Khimki, Moscow region, 141400, Russia*

*e-mail: dao@laspace.ru

**e-mail: miv@laspace.ru

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

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

Abstract

Conducting a detailed study of the Moon and its further development should be based on a high-precision positioning system for objects located on its surface and in the circumlunar space. Currently, many space agencies and research centers are developing navigation systems for the Moon. The proposed projects stay at various stages from concepts to experimental work. Thus, conducting detailed analysis of these projects is an up-to-date task.

Basic types of navigation systems, suggested to development by Russian and foreign researches, were outlined following the results of the analysis. Certainly, there is a number of concepts, such as navigation by pulsars, but they are even more complicated in realization and of less accuracy than those under consideration.

These are, in the first place, radio-navigational systems, which can be conditionally split into three basic groups:

- The systems based on constant contact with terrestrial systems;
- Navigation systems autonomous from the Earth navigation (i.e., those not employing the Earth GLONASS, GPS, etc. as a support) with lunar reference points;

- Autonomous systems without reference lunar based points.

All types of the systems have both their advantages and disadvantages: this is either the presence of a mandatory binding to the Earth (hence, there are delays in receiving any kinds of signals at such a distance), or either a large number of spacecraft or a complex lunar based segment.

Systems with gravitational measurements and the artificial intelligence application cannot fully perform the tasks of global lunar navigation.

Thus, we believe that the proposed lunar optical navigation system is up-to-date and solves many of the problems and shortcomings of the above-mentioned modern projects and proposals in the field of navigation on the Moon.

Keywords: *Moon, navigation, planetfall station, spacecraft.*

References

1. Chebotarev V.E., Kuzymov V.I., Konyaev A.V. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 79 – 82.
2. Varaksina N.A. *Sozdanie navigatsionnoi opornoj seti na poverkhnosti Luny v fundamental'noi sisteme koordinat* (Navigation reference network creating on the lunar surface in the fundamental coordinate system). Doctor's thesis. Moscow, MGU im. M.V. Lomonosova, 2013, 205 p.
3. Fortezzo C.M., Spudis P.D., Harrel S.L. Release of the digital unified global geologic map of the Moon at 1:5 000 000 scale, *51st Lunar and Planetary Science Conference*, 2020.

URL: <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2020/pdf/2760.pdf>

4. Bagrov A.V., Vyatlev P.A., Sergeev D.V., Sysoev V.K. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2012, no. 5 (16), pp. 47 - 53.
5. Zhukov B.S., Polyanskii I.V., Zhukov S.B. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, vol. 14, no. 2, pp. 24 – 35. DOI: [10.21046/2070-7401-2017-14-2-24-35](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-2-24-35)
6. Bilodeau V.S., Clerc S., Draï R., de Lafontaine J. Optical Navigation System Pin-Point Lunar Landing, *IFAC Proceedings*, 2014, vol. 47, issue 3, pp. 535 – 542. DOI: [10.3182/20140824-6-ZA-1003.01693](https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01693)
7. Mark J. Verweld Relative Optical Navigation for a Lunar Lander Mission, *Advances Aerospace Guidance, Navigation and Control*, 2013, pp. 661 - 679.
8. Kaplev C.A., Kremenetskii N.O., Ignatovich E.I., Bolkunov A.I. *Polet*, 2019, no. 11, pp. 3 – 19.
9. Gordienko E.S., Ivashkin V.V., Simonov A.V. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2016, no. 4, pp. 40 - 54.
10. Chebotarev V.E., Kudymov V.I., Zvonar' V.D., Vnukov A.A., Vladimirov A.V. *Issledovaniya naukoqrada*, 2014, no. 4 (10), pp. 14 – 20.
11. Shargorodskii V.L., Kosenko V.E., Sadovnikov M.A., Chubykin A.A., Moklyak V.I. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. M.F. Reshetneva*, 2013, no. 6 (52), pp. 50 - 55.

12. Capuano V., Botteron C., Ledere J., Han J. et al. Feasibility study of GNSS as navigation system to reach the Moon, *Acta Astronautica*, 2015, vol. 116, pp. 186 - 201. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.06.007>
13. Mikrin E.A., Mikhailov M.B., Orlovskii I.V., Rozhkov S.N., Semenov A.S., Krasnopol'skii I.A. *Giroskopiya i navigatsiya*, 2019, vol. 27, no. 3 (106), pp. 3 - 17. DOI: [10.17285/0869-7035.0005](https://doi.org/10.17285/0869-7035.0005)
14. Detepaut A., Giordano R. et al. Use of GNSS for lunar missions and plans for lunar in-orbit development, *Advances in Space Research*, 2020, vol. 66, no.12, pp. 2739 – 2756. DOI: [10.1016 / j asr 9090 05.018](https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.018)
15. Li Xie, Peng Yang, Thomas Yang, Ming Li. Dual-EKF-Based Real-Time celestial Navigation for Lunar Rover, *Mathematical Problems in Engineering*, 2012. URL: <https://doi.org/10.1155/2012/578719>
16. Slesarenok S.V., Shepet' I.P., Rubinov V.I., Titov Yu.P. *Trudy MAI*, 2016, no. 86. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=66381>
17. Bagrov A.B., Dmitriev A.O., Leonov B.A. et al. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2017, no. 4 (38), pp. 5 - 10.
18. Bagrov A.V., Dmitriev A.O., Leonov V.A. et al. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2019, no. 4 (27), pp. 12 - 26. DOI: [10.33950/spacetech-2308-7625-2019-4-12-26](https://doi.org/10.33950/spacetech-2308-7625-2019-4-12-26)
19. Dmitriev A.O., Bagrov A.V., Sysoev V.K., Polyakov A.A. *XLIV Akademicheskie chteniya po kosmonavtike, posvyashchennye pamyati akademika S.P. Koroleva: sbornik tezisov konferentsii*, Moscow, MGTU im. N.E. Baumana, 2020, pp. 281 – 282.

20. M. Eubanks, Ch.F. Radley, W.P. Blasé. Local navigation in lunar polar regions with compass, lunacell and mobile ad HOC Geodesy, *Lunar and Planetary Science Conference*, Houston, TX, USA, 2020, vol. 51.
21. Rodchenko V.V., Sadretdinova E.R., Zagovorchev V.A., Lugovtsov I.V. *Trudy MAI*, 2012, no. 59. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35254>
22. Maria T. Zuber, David E. Smith, Michael M. Watkins. et al. Gravity Field of the Moon from the Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL) Mission, *Science*, 2013, vol. 339, issue 6120, pp. 668 – 671. DOI: [10.1126/science.1231507](https://doi.org/10.1126/science.1231507)
23. Afonin A.A., Sulakov A.S., Yamashev G.G., Mikhailin D.A., Mirzoyan L.A., Kurmakov D.V. *Trudy MAI*, 2013, no. 66. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=40812>