

II. Космическая гравиметрия. Фундаментальные исследования

УДК 006.92 + 521.92

**КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ
ЛАЗЕРНОЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ АНТЕННЫ
НА ГЕОЦЕНТРИЧЕСКОЙ ОРБИТЕ ГЛОНАСС «SOIGA»**

В.И. Пустовойт, С.И. Донченко, О.В. Денисенко, В.Ф. Фатеев

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.

vladpustovoit@gmail.com,

director@vniiftri.ru,

denisenko@vniiftri.ru,

fateev@vniiftri.ru

На основе анализа известных зарубежных предложений по созданию космических лазерных гравитационно-волновых антенн (ГВА) в статье предлагается проект создания космической лазерной интерференционной ГВА на основе использования устойчивых средневисотных орбит спутников ГЛОНАСС «SOIGA» (Space Optical Interferometric Gravitation Antenna). В разных вариантах антенны длина баз между тремя спутниками составляет от 36 до 43,3 тыс. км. Диапазон частот регистрируемых гравитационных волн в такой антенне составляет 0,2–10 Гц. Для создания антенны предполагается широкое использование отечественного задела, имеющегося при создании платформ спутников ГЛОНАСС и их орбитальных структур, методов управления системой и её метрологического обеспечения, а также имеющегося задела по созданию лазерных эталонов длины.

Ключевые слова: космическая лазерная гравитационная антенна, спутники ГЛОНАСС, орбитальные структуры, методы управления.

**CONCEPT OF DEVELOPMENT OF SPACE
LASER GRAVITATIONAL ANTENNA
IN GLONASS GEOCENTRIC ORBIT «SOIGA»**

V.I. Pustovoit, S.I. Donchenko, O.V. Denisenko, V.F. Fateev

FSUE “VNIIFTRI”, Mendeleevo, Moscow region

vladpustovoit@gmail.com,

director@vniiftri.ru,

denisenko@vniiftri.ru,

fateev@vniiftri.ru

Based on the analysis of well-known foreign proposals for the development of space laser gravitational wave antennas (GWA), the article proposes a project for development the space laser interference GWA based on the application of stable mid-altitude orbits of GLONASS satellites «SOIGA» (Space Optical Interferometric Gravitation Antenna). In different versions of the antenna, the length of the bases between the three satellites is from 36 to 43.3 thousand km.

The frequency range of recorded gravitational waves in such an antenna is 0.2-10 Hz. To develop the antenna, it is assumed that the domestic backlog wide use available when developing GLONASS satellite platforms and their orbital structures, methods for managing the system and its metrological support, as well as the backlog for developing laser standards of length, will be widely used.

Key words: space laser gravitational antenna, GLONASS satellites, orbital structures, control methods.

Введение

В 1916 году А. Эйнштейном на основе разработанной им общей теории относительности предсказано существование гравитационных волн. Спустя 100 лет, в 2016 году, в США эти волны были обнаружены с помощью уникального сооружения — наземной гравитационно-волновой антенны (ГВА) [1]. Это событие открывает не только новый информационный канал в астрономии, но и существенно продвигает технологию сверхточных измерений в космической гравиметрии.

В настоящее время в мире известно несколько реализованных и перспективных проектов гравитационно-волновых антенн: LIGO (США), VIRGO (Италия), GEO600 (Германия), KAGRA (Япония). Разрабатываются перспективные проекты космических гравитационно-волновых антенн: LISA — совместный проект Европейского космического агентства (ESA) и Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США (NASA); японский проект космической антенны DECIGO; китайский проект космической гравитационной антенны TianQin.

Кроме того, силами NASA и ESA уже реализовано несколько проектов для высокоточного измерения параметров гравитационного поля Земли (ГПЗ) с борта космических аппаратов (КА) (проекты CHAMP, GOCE, CRACE). Запущены в космос спутники более совершенного проекта GRACE-FO, в стадии проектирования находится проект GRACE-2.

Идеологически гравитационно-волновые и гравиметрические проекты очень тесно связаны, поскольку оба основаны на сверхточном измерении относительного движения свободных (или полусвободных) масс в переменном гравитационном поле. Поэтому планирование и реализация гравитационно-волновых проектов являются локомотивом в развитии проектов космической дистанционной гравиметрии, которые являются промежуточным результатом при создании сверхчувствительных космических гравитационно-волновых антенн. Ряд зарубежных стран, в частности Япония и Китай, при планировании своих проектов DECIGO и TianQin пошли именно по этому пути.

Необходимость создания высокочувствительных космических систем мониторинга параметров ГПЗ на технологиях гравитационно-волновых антенн вызвана не только созданием возможностей постоянного мониторинга изменений ГПЗ в интересах решения проблем океанологии, климатологии, сейсмологии и геодинамики.

Важнейшая причина создания систем высокоточного мониторинга параметров ГПЗ из космоса связана с необходимостью повышения устойчивости

глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) путём дополнительного использования информации о ГПЗ для навигации. Для работы гравитационных систем навигации необходимо создание высокоточных гравиметрических карт. Именно гравитационные системы навигации, обладая абсолютной помехоустойчивостью к естественным и организованным радиопомехам, способны в условиях радиопомех существенно повысить устойчивость комплексных «радио-гравитационных» систем автономной навигации на основе системы GPS (разработчик — США), системы GALILEO (разработчик — ESA), системы BeiDou (разработчик — КНР), а также системы QZSS (разработчик — Япония). Здесь важно отметить, что именно страны — создатели ГНСС являются активными разработчиками космических систем дистанционного мониторинга ГПЗ на основе перспективных технологий гравитационно-волновых антенн.

К сожалению, в России до настоящего времени нет собственного космического проекта гравитационно-волновой антенны, а также не созданы системы для высокоточного мониторинга ГПЗ из космоса. В данной Концепции предлагается путь создания отечественной космической гравитационно-волновой антенны (ГВА), а также как попутные результаты — варианты создания высокоточной космической гравиметрической системы на технологиях ГВА.

1. Мировые тенденции в создании гравитационно-волновых антенн

Наибольшее развитие к настоящему времени получили два типа гравитационно-волновых детекторов, или антенн: твердотельные резонансные и лазерные интерферометрические.

1.1. Наземные твердотельные антенны

Наземные твердотельные антенны стали создаваться с середины 1960-х годов. Пионером этих разработок по праву можно считать американского физика Д. Вебера (Мерилендский университет, США). Твердотельная гравитационная антенна — это, как правило, металлический массивный цилиндр, охлаждённый до низкой температуры. Размеры такого детектора при падении на него гравитационной волны изменяются. При этом если частота волны совпадает с резонансной частотой антенны, амплитуда её колебаний может стать настолько большой, что колебания можно детектировать. В пионерском эксперименте Вебера [2] антенна представляла собой алюминиевый цилиндр длиной 2 м и диаметром 1 м, подвешенный на стальных нитях. Резонансная частота антенны составляла 1660 Гц, амплитудная чувствительность пьезодатчиков — 10^{-16} м. Вебер использовал два детектора, работавших на совпадения, и сообщил об обнаружении сигнала, источником которого с наибольшей вероятностью был центр Галактики. Однако независимые эксперименты не подтвердили наблюдений Вебера.

Несмотря на отсутствие результата, конструирование резонансных детекторов продолжается усилиями ведущих мировых научных школ. Из действующих в настоящее время детекторов, созданных на таком принципе, работает сферическая антенна MiniGRAIL (Лейденский университет, Голландия), а также антенны ALLEGRO, AURIGA, EXPLORER и NAUTILUS. В России разработкой резонансных цилиндрических антенн занимается научная группа МГУ им. М.В. Ломоносова, созданная профессором В.Г. Брагинским. Главным недостатком наземных резонансных антенн является их спектральная узкополосность, и надеяться на то, что частота излучения гравитационных волн какого-либо источника совпадёт с резонансной частотой гравитационной антенны, вряд ли приходится. Кроме того, для уменьшения уровня шумов эти антенны приходится охлаждать до весьма низких температур — менее одного градуса Кельвина, помещая массивные цилиндры в ванны жидкого гелия, что представляет собой довольно сложную задачу. Кроме того, антенны этого типа весьма чувствительны к сейсмическим помехам. В результате после непосредственного обнаружения гравитационных волн работы с резонансными антеннами в 2016 году в большинстве лабораторий были прекращены.

1.2. Наземные лазерные интерферометрические антенны

В наземных лазерных гравитационных антеннах с помощью лазерного интерферометра Майкельсона или Фабри — Перо фиксируется изменение взаимного положения пространственно разнесённых свободных масс под воздействием гравитационной волны. Впервые идею использования интерферометра Майкельсона для обнаружения гравитационных волн предложили в 1962 году советские физики М.Е. Герценштейн и В.И. Пустовойт [3].

Интерферометрическая гравитационная антенна (рис. 1) содержит два ортогональных плеча, каждое из которых образовано парой параллельных зеркал, закреплённых на чувствительных массах (пробных телах).

Плечи располагаются в вакуумных камерах, длина которых составляет несколько сот метров и даже километров. Пары чувствительных масс с зеркалами подвешиваются на концах камер, образуя интерферометр Фабри — Перо. Исходный лазерный луч с помощью полупрозрачного зеркала расщепляется на два луча, каждый из которых распространяется вдоль своей вакуумной камеры и многократно отражается от параллельных зеркал плеча интерферометра. Небольшая часть энергии каждого луча возвращается обратно на полупрозрачное зеркало. Далее с помощью вспомогательного зеркала обе части возвращённой энергии объединяются на плоскости фотоприёмника, образуя интерференционную картину.

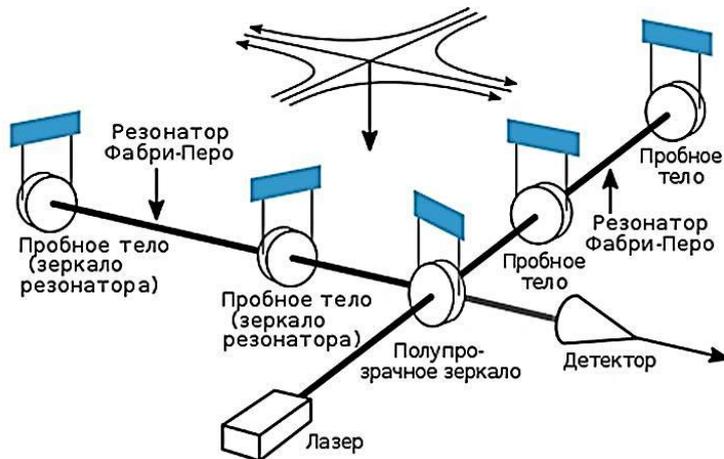


Рис. 1. Детектор гравитационных волн на базе двух резонаторов Фабри — Перо, поставленных под углом 90°

Главное свойство гравитационной волны состоит в том, что если она распространяется перпендикулярно плоскости (см. рис. 1), образованной плечами интерферометра, то гравитационные силы направлены так, что в одном плече чувствительные массы смещаются навстречу друг другу (сходятся), а в другом смещаются в противоположном направлении (расходятся). Это противоположное по знаку изменение длины плеч антенны регистрируется в фотоприёмнике по смещению интерференционной картины. Чувствительность современных интерференционных антенн к относительному изменению длины плеча составляет 10^{-21} . При длине плеча 3–4 км это составляет около 10^{-18} м в абсолютном значении.

На сегодняшний день известно несколько реализованных проектов лазерных интерферометрических гравитационных антенн:

- американо-австралийская гравитационная антенна LIGO [4]. Именно на ней в 2016 г. впервые зафиксирована гравитационная волна из космоса. Она содержит 2 интерферометра, размещённых в США (Хэнфорд и Ливингстон), длина плеч составляет 4 км [3];
- антенна VIRGO (Пиза, Италия), длина плеча — 3 км [5];
- антенна GEO600 (Ганновер, Германия), длина плеч — 600 м [6];
- антенна KAGRA (Токио, Япония), длина плеч — 3 км [7] (вводится в эксплуатацию).

Недостатком наземных антенн такого рода является наличие значительных помех, вызванных воздействиями сейсмического происхождения. Вторым недостатком является необходимость поддержания глубокого вакуума в камерах (трубах) значительной протяжённости. Наконец, в силу ограниченной длины плеч интерферометра, такие антенны эффективно регистрируют только волны с частотой сотни Гц и выше.

1.3. Космические лазерные интерференционные антенны

1.3.1. Космическая интерферометрическая антенна LISA

Проект LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*) — это совместный проект Европейского космического агентства (ESA) и Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США (NASA) [8]. В этой антенне роль свободных масс играют 6 зеркал, расположенных на трёх спутниках, находящихся на специальных солнечных орбитах вблизи Земли. Расстояние между спутниками — 5 млн км (рис. 2). Расчётный диапазон частот детектируемых гравитационных волн — $10^{-1} - 10^{-4}$ Гц.

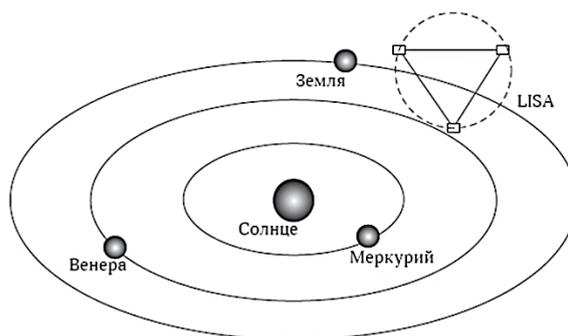


Рис. 2. Схема проекта LISA

Так как расстояние между КА достаточно большое, реализовать метод интерферометрии с отражением лазерного луча от удалённого зеркала, расположенного на другом КА, невозможно. Поэтому в LISA используется метод ретрансляции принятого сигнала на борту другого КА с усилением сигнала и сохранением фазовой задержки на трассе распространения. Согласно предварительным расчётам, абсолютная погрешность определения приращения межспутникового расстояния будет составлять $10^{-10} - 10^{-12}$ м, что в относительном измерении составит $10^{-20} - 10^{-22}$.

Проектная чувствительность LISA уверенно перекрывает сигнал от двойных звёзд в нашей Галактике. В отличие от слияния компактных звёзд или от вспышек сверхновых, которые происходят «одноразово» и редко (на эти события в основном нацелен проект Advanced LIGO), двойные звезды излучают непрерывно, сигнал от них должен быть всегда. Также чувствительность LISA заметно перекрывает предполагаемый сигнал от процессов, связанных со сверхмассивными чёрными дырами, а частота этих событий — до 50 раз в год.

Для отработки технических решений и тестирования бортовой аппаратуры будущего LISA-детектора 3 декабря 2015 года в точку либрации L1 на линии Земля — Луна — Солнце был запущен экспериментальный КА LISA-Pathfinder (PLISA) [9, 10]. Этот спутник в миниатюре представляет одно плечо

созвездия LISA, в котором расстояние между двумя чувствительными массами уменьшено с 5 млн км до 35 см. Внутри такого КА чувствительная масса реализует известную технологию «спутника, свободного от сноса». Корпус КА в данном случае является защитным экраном от воздействия неконтролируемых активных внешних сил. Сама же экранированная чувствительная масса движется только под действием гравитационных сил ближайших небесных тел, а также сил, создаваемых гравитационными волнами.

Чувствительная масса в эксперименте PLISA выполнена в виде куба из сплава золота и платины и заключена в кубический объём, связанный с корпусом КА, с зазором 4 мм. Лазерная интерферометрическая система обеспечила контроль положения чувствительной массы относительно внешнего объёма с погрешностью 10^{-12} м. На основе этих измерений спутник корректирует своё положение с помощью микродвигателей, обеспечивая движение чувствительной массы только под действием гравитационных сил. В целом в «спутнике, свободном от сноса», реализованном в проекте PLISA, погрешность определения и компенсации внешних возмущающих ускорений составила 10^{-14} м/с² (против 10^{-12} м/с² в проекте GOCE). При использовании такой технологии на околоземном спутнике возможна реализация гравитационного градиентометра с чувствительностью $10^{-4} - 10^{-5}$ Этвеш, что на 1–2 порядка лучше, чем в известном проекте GOCE.

1.3.2. Космическая гравитационная антенна DECIGO (DECi-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory)

Японский проект антенны DECIGO [11–13] состоит из трёх КА на орбите Земли вокруг Солнца, образующих правильный треугольник с длиной стороны 1000 км, на каждой из которых реализуется интерферометр Фабри — Перо. В настоящее время рассматривается возможность создания четырёх кластеров КА в виде правильного треугольника, два из которых будут вращаться вблизи одной точки орбиты Земли, образуя правильный 6-угольник (рис. 3). На каждом КА, являющемся вершиной космического треугольника, располагаются источники лазерного излучения, а также по две чувствительные массы, на которых закреплены зеркала интерферометров Фабри — Перо соответствующего плеча. Бортовая система КА обеспечивает для каждой чувствительной массы режим «спутника, свободного от сноса».

В проекте предполагается обеспечить измерение приращений расстояний между чувствительными массами с погрешностью на уровне $10^{-15} - 10^{-16}$ м.

Для реализации проекта планируется выполнить несколько промежуточных запусков КА с целью проверки правильности выбора технических решений. В настоящее время выполнен первый этап путём запуска КА JAXA (SDS-1), на котором испытывалась система компенсации внешних микро-возмущений с помощью бортовых двигателей.

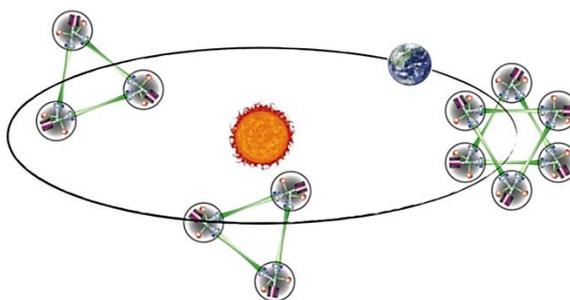


Рис. 3. Предварительная схема размещения КА проекта DECIGO

В частности, в промежуточном проекте B-DECIGO [18] длина плеча составляет 100 км, диаметр чувствительной массы составляет 30 см, вес — 30 кг. Тройка КА будет располагаться на солнечно-синхронной орбите вокруг Земли высотой 2000 км. Запуск аппаратов B-DECIGO предполагается в конце 2020-х годов. Фактически этот вариант проекта обнаружения гравитационных волн представляет собой сверхточный космический измеритель параметров ГПЗ.

Проект DECIGO является первым космическим проектом, в котором предложено использование космического интерферометра Фабри — Перо, по аналогии с наземными детекторами типа LIGO. В дальнейшем эту технологию предполагается использовать в гравитационных градиентометрах типа GRACE-FO и GRACE-2, так как эта технология существенно повышает точность дистанционных измерений параметров ГПЗ.

1.3.3. Китайский проект космической гравитационной антенны TianQin

Космический проект TianQin (Тяньцзинь, «Тянь» — небеса и «Цинь» — струнный инструмент) [14] представляет собой космический детектор гравитационных волн (ГВ), состоящий из трёх космических аппаратов (КА), движущихся по высокой околоземной орбите (рис. 4). Расстояние между космическими аппаратами составляет 10^5 км.

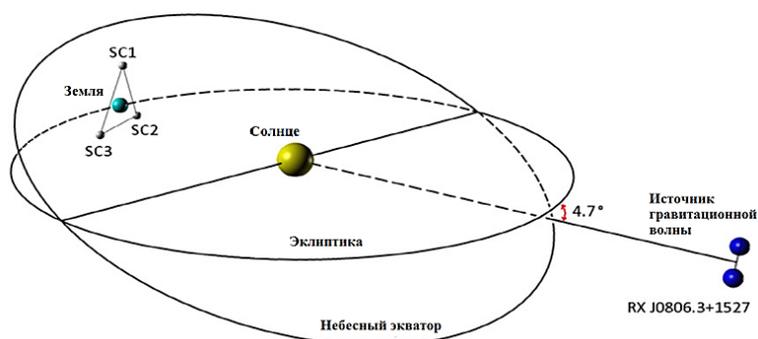


Рис. 4. Конфигурация системы TianQin

Основная задача TianQin заключается в детектировании ГВ в диапазоне 0,1–100 мГц. Каждый космический аппарат оснащён лазерной интерферометрической системой, способной отправлять и принимать сигналы с двух других КА системы. Кроме того, на каждом корабле размещается система «спутник, свободный от сноса», предназначенная для исключения негравитационных сил, действующих на КА. Таким образом, ключевыми компонентами системы являются: высокоточный лазерный интерферометр и система «спутник, свободный от сноса», включающая чувствительную массу и систему компенсации активных помех, воздействующих на КА.

Наземная инфраструктура проекта включает в себя научно-исследовательское здание, испытательную лабораторию в сейсмически стабильной пещере и наблюдательный центр. Строительство началось в марте 2016 года. Стоимость проекта оценивается в 2,3 млрд долларов США, с прогнозируемой датой запуска между 2025 и 2030 годами.

Разработка системы TianQin состоит из четырёх основных этапов (рис. 5).

0. Осуществление лазерной локации по линии Земля — Луна.
1. Эксперимент на борту одного низкоорбитального КА.
2. Эксперимент на борту двух низкоорбитальных КА.
3. Изготовление космического детектора гравитационных волн, состоящего из трёх КА.



Рис. 5. Основные этапы создания детектора ГВ TianQin

Первый наземный прототип гетеродинного лазерного интерферометра длиной 10 м был построен в Хуачжунском университете науки и технологии (HUST) в 2010 году. Разрешение интерферометра составило 3 нм. Для достижения более высокой точности измерений был разработан цифровой фазометр и использовалась фазовая автоподстройка частоты. Это позволило достичь пространственного разрешения интерферометра на уровне единиц

пикометров. Для реализации системы ретрансляции лазерного дальномера была построена гетеродинная оптическая петля фазовой синхронизации (OPLL), в которой ведомый лазер синхронизирован по фазе с входящим лазерным лучом.

С 2000 года в HUST постоянно ведётся разработка малошумящего инерционного датчика. Лётная модель «спутника, свободного от сноса» с кубической пробной массой, окружённой серией рамочных электродов для осуществления ёмкостного съёма положения массы, испытана на орбите в 2013–2014 гг. Ёмкостный датчик положения основан на конструкции дифференциального трансформатора. Экспериментальные исследования показывают возможность достичь уровня шума не более $1 \text{ аФ} / \sqrt{\text{Гц}}$ (10^{-18} Ф), что соответствует необходимой чувствительности бортового акселерометра на уровне $10^{-15} \text{ м/с}^2 / \sqrt{\text{Гц}}$. Для исследования характеристик электростатических акселерометров на Земле было построено несколько крутильных маятниковых установок.

Первый натуральный эксперимент планируется произвести на борту КА с высотой орбиты 700 км с целью проверки принципа эквивалентности гравитационной и инертной масс на уровне 10^{-16} . Это позволит провести первые испытания уже космического лазерного интерферометра, а также отработать систему компенсации активных помех на «спутнике, свободном от сноса».

Второй эксперимент заключается в реализации межспутникового лазерного интерферометра, который позволит детектировать изменение расстояния между двумя КА. Система схожа с запущенным в прошлом году градиентометром GRACE-FO [15]. Таким образом, этот эксперимент позволит не только испытать оборудование детектора гравитационных волн, но и провести картирование гравитационного поля Земли с недоступным на сегодняшний день пространственным разрешением.

Отдельно в этом проекте стоит задача создания комплексного программного обеспечения, которое предназначено для решения следующих задач:

- моделирование и учёт возмущающих факторов;
- симуляция ГВ от определённого источника и расчёт реакции системы;
- анализ бортовой измерительной информации.

1.3.4. Проект лазерной гравитационной антенны LAGRANGE

Проект космической лазерной гравитационной антенны LAGRANGE (*LAser GRavitational-wave ANtenna at GEo-lunar*) [16] основан на использовании трёх КА, размещённых на орбите Луны в точках либрации (точках Лангранжа) L1, L4 и L5. Три базы симметричного интерферометра имеют длину около 666–667 тыс. км. Во многом проект схож с проектом LISA. Проектная чувствительность при измерении колебаний длины баз вследствие воздействия гравитационных волн составляет $5 \text{ пм} \cdot \sqrt{\text{Гц}^{-0,5}}$, погрешность компенсации активных (негравитационных) ускорений всех КА антенны оценивается

величиной $3 \cdot 10^{-15} \text{ м/с}^2$. Частота регистрируемых гравитационных волн находится в диапазоне $(10^{-3} - 1) \text{ Гц}$.

Оценки показывают, что при безразмерной амплитуде гравитационных волн, которые мы имеем шанс зарегистрировать на Земле (или в окрестности Земли), $h \sim 10^{-20} - 10^{-21}$ целевыми астрофизическими источниками для такой антенны являются [17, 18]:

- слияние чёрных дыр массой в диапазоне $10^4 - 10^7$ солнечных масс;
- слияние звёздных масс компактных объектов с массивными чёрными дырами с сигнальным периодом $10^2 - 10^3 \text{ с}$;
- двойные звёздные массы в Млечном Пути с орбитальным периодом $10^2 - 10^3 \text{ с}$.

1.3.5. Проект гравитационной антенны GEOGRAWI

В проекте гравитационной антенны GEOGRAWI [18] три спутника располагаются на геостационарной орбите. При равномерном расположении вдоль орбиты спутников, являющихся вершинами антенны, длина баз интерферометра составляет около 73 тыс. км. Для реализации антенны могут использоваться технологии проекта LISA. Диаграмма направленности такой антенны имеет вид вытянутого тела вращения (эллипса), большая ось которого перпендикулярна к плоскости орбиты, а её наклон стабилен во времени и составляет $23,5^\circ$ к плоскости эклиптики. Диапазон регистрируемых частот гравитационных волн лежит в пределах $(10^{-4} - 2 \cdot 10^{-2}) \text{ Гц}$. Такой детектор способен наблюдать гравитационные волны от слияния супермассивных чёрных дыр с массой более чем 10^6 масс Солнца.

1.4. Преимущества и недостатки космических ГВА на удалённых орбитах

На основе проведённого анализа можно выделить несколько преимуществ космических антенн перед наземными:

- меньший уровень сейсмических помех;
- отсутствие необходимости создания вакуума в канале лазерного луча;
- более высокая чувствительность антенны за счёт возможности значительного увеличения длины баз интерферометра;
- возможность принимать волны любой поляризации при использовании трёх спутников, связанных тремя измерительными базами.

Вместе с тем в качестве недостатка космических проектов с удалёнными спутниками (LISA, DECIGO, TianQin) необходимо отметить существенное влияние ближайших небесных тел (Солнца, Луны, Юпитера, крупных астероидов) на орбиту КА этих антенн. Это приводит к значительному изменению длин сторон интерферометров, к изменению углов треугольника в созвездии КА антенны, а также к появлению значительного доплеровского сдвига частот в измерительной лазерной линии КА — КА. Например, в про-

екте TianQin ожидаемая относительная скорость спутников составляет 10 м/с, в проекте LISA относительная скорость достигает 15 м/с, что вызывает доплеровский сдвиг частоты более 10 МГц.

Кроме того, для удалённых антенн следует отметить сложности создания и поддержания стабильности их орбитальной структуры, а также трудности удалённого поддержания характеристик бортовых измерительных средств антенн на требуемом уровне.

В целом, по сравнению с удалёнными гравитационными антеннами, для околоземных ГВА условия вывода, эксплуатации и управления ими с наземного комплекса управления значительно проще. Ниже предлагается антенна на основе стабильной средневысотной околоземной орбиты спутников ГЛОНАСС.

2. Гравитационно-волновая антенна на основе орбиты КА ГЛОНАСС

С целью создания средневысотной околоземной гравитационной антенны космические аппараты, оснащённые системой «спутник, свободный от сноса», предлагается разместить на устойчивых орбитах спутников ГЛОНАСС.

Основой системы ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система) являются 24 навигационных КА (НКА), движущихся над поверхностью Земли в трёх идентичных орбитальных плоскостях с наклоном $64,8^\circ$, высотой орбит 19 100 км и периодом обращения 11 часов 15 минут [19]. Орбитальные плоскости разнесены по долготе восходящего узла на 120° . В каждой орбитальной плоскости размещаются по 8 НКА с равномерным сдвигом по аргументу широты 45° . Кроме того, НКА из разных плоскостей сдвинуты относительно друг друга по аргументу широты на 15° .

Основное отличие ГЛОНАСС от других навигационных систем (GPS и др.) в том, что спутники ГЛОНАСС в своём орбитальном движении не имеют резонанса (синхронности) с вращением Земли, что обеспечивает им большую стабильность. Поэтому орбита ГЛОНАСС не требует дополнительных корректировок практически в течение всего срока активного существования навигационных спутников.

Для обеспечения беззапросного режима автономной навигации наземных потребителей на борту всех НКА располагаются высокостабильные стандарты частоты и времени с относительной нестабильностью около $(5-7) \cdot 10^{-14}$.

В первом варианте создания гравитационно-волновой антенны на одной из орбит ГЛОНАСС (рис. 6а) один аппарат этой антенны размещён между орбитальными позициями 1 и 2 НКА ГЛОНАСС, второй аппарат антенны — между позициями 7 и 8, а третий аппарат — между позициями 3 и 4. Между тремя КА гравитационной антенны распространяются лазерные лучи, образующие 3 плеча интерферометра. При таком размещении узловых точек ГВА длина плеч составляет около 36 тыс. км, а сами плечи ортогональны друг другу, обеспечивая максимальную эффективность ГВА. В такой схеме третья лазерная линия связи невозможна, поскольку она пересекает Землю.

Во втором варианте ГВА на основе орбиты ГЛОНАСС (рис. 6б) космические аппараты антенны располагаются в вершинах равностороннего треугольника, вписанного в круговую орбиту, обеспечивая организацию третьей лазерной измерительной линии между КА антенны. При этом три аппарата антенны располагаются между позициями навигационных КА 1 — 2, 3 — 4, а также 6 — 7. Угол между плечами интерферометра составляет 60° , длина базы составляет 43,3 тыс. км. Однако при такой конфигурации эффективность антенны не падает, поскольку в ней дополнительно используется третье измерительное плечо.

Космические аппараты ГВА целесообразно строить на основе многократно испытанных космических платформ НКА типа ГЛОНАСС-К, ГЛОНАСС-М и других, оснащённых системами ориентации, термостабилизации, электропитания на основе солнечных батарей, системами связи с бортовыми системами.

Для повышения надёжности обнаружения гравитационных волн возможно размещение КА интерферометров ГВА на двух орбитах ГЛОНАСС. При этом количество КА увеличивается до шести.

Диапазон частот наблюдаемых гравитационных волн составляет (0,2–10) Гц.

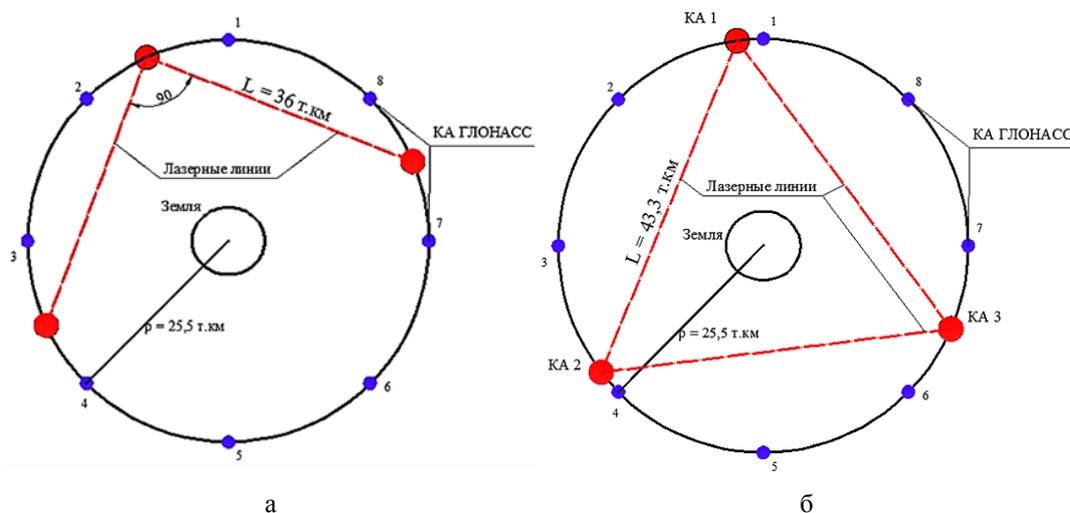


Рис. 6. Схемы размещения КА гравитационной антенны в плоскости орбиты ГЛОНАСС

Так как расстояние между КА гравитационной антенны в обоих вариантах достаточно большое, реализовать метод интерферометрии с прямым отражением лазерного луча от удалённого зеркала, расположенного на другом КА, невозможно. Поэтому в данном проекте, как и в ГВА LISA и TianQin, предполагается использование метода ретрансляции принятого сигнала на борту другого КА с фазированием ведомого лазера и ретрансляцией усиленного сигнала с сохранением принимаемой фазы. Согласно предварительным

расчётам, для обеспечения необходимой чувствительности гравитационной антенны абсолютная погрешность определения приращения межспутникового расстояния должна составлять $10^{-12} - 10^{-13}$ м.

Как и в предыдущих проектах, основными элементами каждого КА гравитационной антенны являются высокоразрешающий лазерный интерферометр и бортовая система «спутник, свободный от сноса», которая предназначена для компенсации активных ускорений, вызванных внешними воздействиями негравитационного происхождения. На каждом аппарате размещаются по два «спутника, свободного от сноса», каждый из которых обеспечивает измерения в своём плече интерферометра. Погрешность компенсации активных ускорений должна быть не выше $0,5 \cdot 10^{-15}$ м/с².

Основные расчётные параметры ГВА на основе орбиты ГЛОНАСС представлены ниже в таблице 1.

Таблица 1

Параметры ГВА на основе орбиты ГЛОНАСС

Параметр	Значение
Количество аппаратов	3
Конфигурация	Треугольник
Тип орбиты	Геоцентрическая средневысотная
Расстояние между соседними КА	43,3 тыс. км
Погрешность определения расстояния между КА	$10^{-12} - 10^{-13}$ м / $\sqrt{\text{Гц}}$
Погрешность компенсации негравитационных возмущений	$0,5 \cdot 10^{-15}$ м/с ² / $\sqrt{\text{Гц}}$
Длина волны лазера	около 1 мкм
Диапазон частот регистрируемых волн	(0,2–10) Гц

Как и в рассмотренных выше проектах космических ГВА, предлагаемая антенна способна наблюдать как минимум следующие астрофизические цели: слияние чёрных дыр массой в диапазоне $10^4 - 10^6$ солнечных масс (частота этих событий — до 50 раз в год), а также двойные звёздные массы в Млечном Пути с орбитальным периодом $10^2 - 10^3$ с.

Предлагаемую ГВА целесообразно назвать «SOIGA» (*Space Optical Interferometric Gravitation Antenna*).

3. Технические преимущества и основные технические проблемы реализации предлагаемой структуры космической гравитационной антенны

3.1. Технические преимущества и проблемы

Процесс создания, проектирования и эксплуатации ГВА на основе орбит ГЛОНАСС имеет ряд преимуществ:

- 1) в стране накоплен большой и многолетний опыт создания и испытания космических платформ спутников ГЛОНАСС, которые могут стать основой КА гравитационной антенны;
- 2) в системе ГЛОНАСС накоплен опыт проектирования и испытаний лазерных межспутниковых измерений на основе импульсных сигналов («Лазерный ГЛОНАСС»);
- 3) для управления системой ГЛОНАСС создан развитый наземный комплекс управления, накоплен значительный опыт метрологического обеспечения ГЛОНАСС, а также опыт испытания новых космических средств в её составе.

Исходя из опыта проектирования и первых испытаний элементов других известных космических гравитационных антенн, основными техническими проблемами при создании космических ГВА на основе технологии ГЛОНАСС являются:

- создание интерферометрического высокоточного измерителя расстояний в космосе с погрешностью 10^{-12} – 10^{-13} м;
- создание системы «спутник, свободный от сноса» на лазерном или ёмкостном принципе слежения за чувствительной массой, а также системы компенсации активных ускорений на борту КА с погрешностью порядка 10^{-15} м/с².

3.2. Предлагаемые этапы реализации ГВА на основе ГЛОНАСС

Реализацию предлагаемой антенны, как и антенн зарубежных проектов, целесообразно проводить в несколько этапов.

Этап № 1 (3–4 года). Создание наземных макетов основных измерительных элементов космической ГВА, их метрологическое обеспечение и наземные испытания.

1. Создание наземного стационарного лазерного интерферометра с чувствительностью к изменению длины в единицы пикометров (10^{-12} м) на длине от метра до десятков метров.
2. Создание лабораторного стенда с использованием лазерного интерферометра на двух подвижных зеркалах, закреплённых на подвешенных на нитях чувствительных массах ЧМ 1;2, с двумя степенями свободы [20] (рис. 7).

Такая высокая чувствительность необходима для реализации бортового космического лазерного градиентометра с двумя чувствительными массами, движущимися внутри объёма одного и того же КА.

Опыт создания лазерных высокоточных измерителей больших длин, а также лазерных эталонов длины в стране имеется на нескольких предприятиях [21, 22].

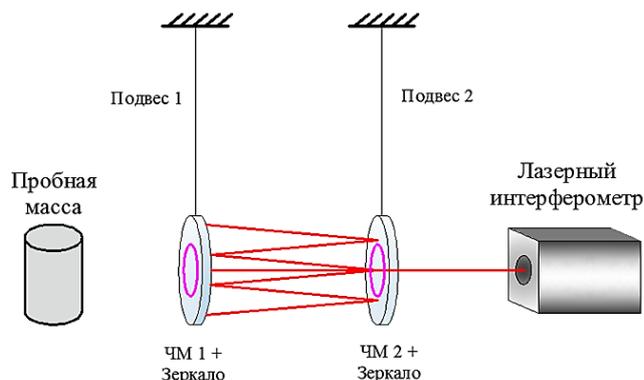


Рис. 7. Лабораторный стенд для испытания лазерного интерферометра на двух подвешенных на нитях чувствительных массах ЧМ 1;2 с закреплёнными на них зеркалами

3. Создание, испытание и доработка наземного макета «спутника, свободного от сноса» с ёмкостным или лазерным съёмом.
4. Создание наземного лазерного стенда для испытания лазерного интерферометра, измеряющего взаимное положение пары макетов «спутников, свободных от сноса» с двумя степенями свободы с ёмкостным или лазерным съёмом (рис. 8).

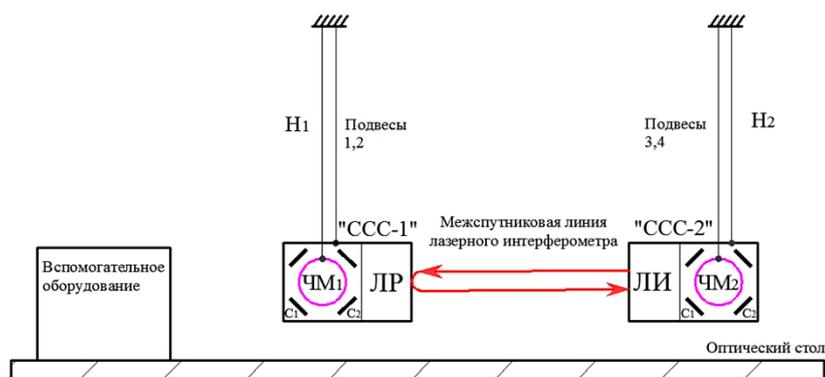


Рис. 8. Лабораторный стенд для наземного испытания лазерного интерферометра в режиме измерения взаимного расстояния пары макетов подвешенных на нитях «спутников, свободных от сноса»: ССС 1, 2 — макеты «спутников, свободных от сноса»; ЛР — лазерный ретранслятор (отражатель); ЛИ — лазерный интерферометр; С1, С2 — конденсаторы ёмкостной системы определения перемещения чувствительных масс ЧМ₁ и ЧМ₂

На этом стенде проводятся испытания лазерного интерферометра в режиме измерения приращения расстояния между парой «спутников, свободных от сноса». При этом в лазерном интерферометре сначала реализуется простой режим приёма и слежения за фазой отражённого сигнала, а затем режим переотражения с захватом и ретрансляцией фазы. В лабораторных условиях должна быть достигнута погрешность определения приращения расстояния по результатам измерения фазы лазерного луча не более единиц-десятков пикометров (10^{-12} м). В перспективе погрешность измерений на стенде должна быть снижена до уровня 10^{-14} – 10^{-15} м.

Этап № 2 (3–4 года). Создание космических макетов основных измерительных элементов космической ГВА, их метрологическое обеспечение и испытания.

1. Создание, запуск, метрологическое обеспечение и испытания низкоорбитального КА с бортовым макетом «спутника, свободного от сноса» с чувствительностью к активным возмущениям 10^{-12} – 10^{-15} м/с². При этом проходят испытания системы компенсации активных, т.е. негравитационных ускорений, воздействующих на КА.
2. Создание, запуск и испытания лазерного интерферометра с двумя чувствительными массами с закреплёнными на них зеркалами, свободно движущимися внутри объёма КА (рис. 9).

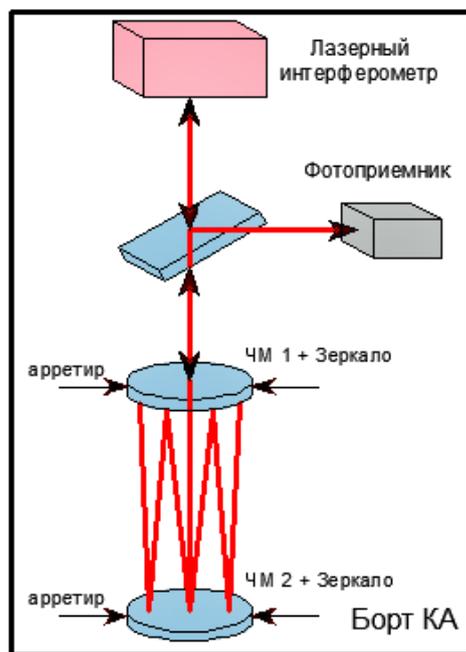


Рис. 9. Схема испытаний лазерного интерферометра с двумя зеркалами на чувствительных массах, движущихся внутри объёма КА [17]

Данный эксперимент аналогичен эксперименту в проекте PLISA с двумя чувствительными массами, движущимися внутри одного и того же КА. На низкой орбите при расстоянии между массами не более 1 м этот эксперимент является измерителем гравитационного градиента.

Этап № 3 (3–4 года). Создание космического низкоорбитального испытательного макета ГВА на спутниках, движущихся тандемом.

1. Создание тандемной пары КА, движущихся на низкой орбите (300–400 км), с бортовыми системами «спутник, свободный от сноса» (рис. 10).
2. Создание комплексного радиотехнического и лазерного интерферометрического измерительного межспутникового канала с погрешностью 10^{-14} – 10^{-15} м.
3. Создание системы обработки измерительной информации и системы метрологического обеспечения измерительных каналов.

Данный комплекс фактически будет представлять космический градиентометр с эквивалентной погрешностью 10^{-4} – 10^{-5} Этвеш, что на 1–2 порядка ниже погрешности проекта GOCE и позволит существенно поднять точность отечественных моделей ГПЗ для удалённых территорий.

Этапы 1–3 могут выполняться с перекрытием во времени.

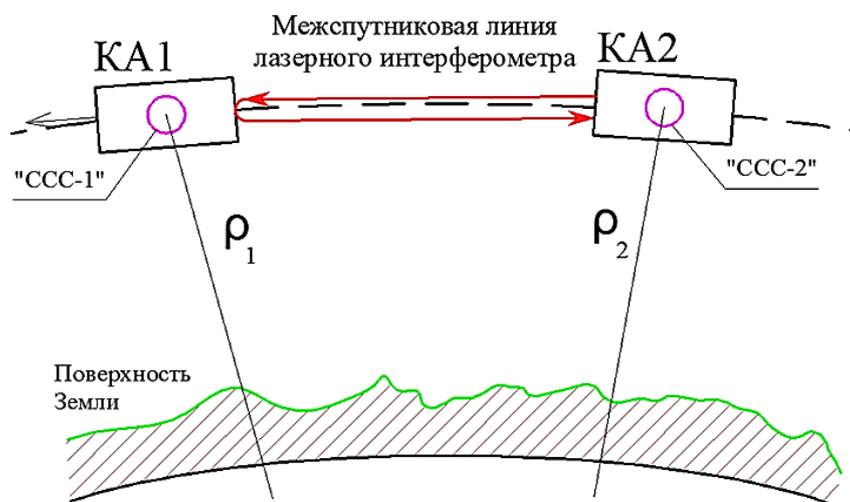


Рис. 10. Низкоорбитальный комплекс «КА1–КА2» для испытания межспутникового лазерного интерферометра и системы «спутник, свободный от сноса»: СССР — спутник, свободный от сноса

Этап № 4 (после 2030 года). Создание ГВА на орбите ГЛОНАСС.

Этап предполагает создание, разработку метрологического обеспечения и испытания антенны на основе одной плоскости орбиты ГЛОНАСС (4–5 лет).

3.3. Предлагаемая отечественная кооперация исполнителей

В состав кооперации при создании отечественной гравитационной антенны целесообразно включить институты, предприятия и организации следующих ведомств:

1. Российской академии наук;
2. Росстандарта;
3. Роскосмоса;
4. Министерства науки и высшего образования.

Состав кооперации подлежит дополнительному обсуждению.

При этом *основные требования к Головному исполнителю* заключаются в следующем:

- наличие опыта разработки высокоточных лазерных интерферометрических дальномерных средств, в частности лазерных эталонов длины и др.;
- наличие опыта в разработке и эксплуатации высокостабильных бортовых радиотехнических и лазерных эталонов времени и частоты;
- опыт разработки, эксплуатации и интерпретации испытаний высокоточных наземных и космических гравиметрических средств;
- опыт разработки, эксплуатации и создания системы метрологического обеспечения космических измерительных средств (ГЛОНАСС и др.).

4. Значимость задела, получаемого при создании отечественной космической гравитационной антенны «SOIGA»

4.1. Значимость задела в научно-технической области

В научно-технической области реализация проекта позволяет:

- выйти на мировой уровень в области проектирования и создания гравитационно-волновых антенн; этот проект открывает возможности международного сотрудничества в области гравитационно-волновой астрономии и открывает прямой доступ к мировым достижениям в области наземной и космической лазерной интерферометрии, микромеханики и гравиметрии;
- выйти на мировой уровень в области космической гравиметрии и ликвидировать значительное отставание в этой области от ведущих мировых держав (на 10–15 лет);
- дать толчок развитию отечественного космического приборостроения в части повышения возможностей космической лазерной интерферометрии, микромеханики и микроэлектроники;
- повысить фундаментальный метрологический уровень отечественной лазерной измерительной техники путём создания новых, более совершенных измерительных эталонов в лазерной оптике, микромеханике и гравиметрии.

Для России этот проект является *мегапроектом*, объединяющим и активизирующим творческие научно-технические силы сразу нескольких министерств и ведомств. Реализация проекта позволит России вернуть утраченные позиции в области космической лазерной оптики, микромеханики, микроэлектроники, а также гравитационно-волновой астрономии и дистанционной космической гравиметрии.

4.2. Значимость задела в прикладной области

В прикладной области реализация проекта позволит:

- повысить устойчивость навигации в системе ГЛОНАСС в сложных условиях применения за счёт создания ассистирующих технологий навигации на основе использования ГПЗ;
- повысить точность перспективных космических геодезических комплексов серии ГЕО-ИК за счёт реализации более точных измерителей по линии «спутник — спутник»;
- повысить точность эфемеридного обеспечения в системе ГЛОНАСС на основе более «тонкого» учёта малых сил, действующих на навигационные КА;
- приступить к созданию цифрового банка гравиметрических данных поверхности Земли, что необходимо для создания навигационно-гравиметрических карт на удалённые территории и акватории в рамках создания помехоустойчивых систем навигации по ГПЗ.

Выводы

1. В мире имеется несколько проектов космических гравитационных антенн со сроком реализации после 2030 г. Все они имеют весьма высокие, но достижимые в обозримом будущем технические характеристики. Промежуточные результаты в виде космических систем «спутник — спутник» имеют, по мнению зарубежных специалистов, большое практическое применение для задач геодезии и космической гравиметрии: ожидаемая погрешность измерения гравитационного градиента на борту низковысотного КА составляет 10^{-4} – 10^{-5} Этивеш, что на 1–2 порядка лучше, чем в европейском проекте GOCE.

Важнейший ожидаемый результат создания зарубежных ГВА и, как следствие, повышения точности мониторинга ГПЗ с помощью систем типа «спутник — спутник», заключается в повышении устойчивости зарубежных радионавигационных систем GPS, GALILEO, BaiDou, QZSS в сложных условиях применения на основе создания ассистирующих технологий навигации с использованием ГПЗ. Важно отметить, что разработчиками систем дистанционного мониторинга ГПЗ на основе перспективных технологий ГВА являются именно страны — разработчики ГНСС.

2. Российский проект космической гравитационной антенны «SOIGA» целесообразно реализовать на технологиях системы ГЛОНАСС. При этом возможно использование большого и многолетнего научно-технического задела, полученного на отечественных предприятиях при создании космической платформы КА ГЛОНАСС, создании высокостабильных стандартов частоты и времени, в развитии методов и средств эфемеридно-временного обеспечения системы, в развитии методов и средств управления системой, а также её метрологического обеспечения. Антенна может использоваться для обнаружения гравитационных волн, возникающих от слияния чёрных дыр массой в диапазоне 10^4 – 10^7 солнечных масс, от слияния звёздных масс компактных объектов с массивными чёрными дырами, а также от двойных звёздных масс в Млечном Пути с орбитальным периодом 10^2 – 10^3 с. Антенна имеет диапазон частот регистрируемых волн в интервале 0,2–10 Гц.
3. Главными техническими проблемами создания такого рода антенны является создание высокоточного космического межспутникового лазерного интерферометра, а также создание системы «спутника, свободного от сноса» с высокой чувствительностью и возможностью компенсации негравитационных ускорений на борту КА.
4. В научно-технической области реализация российского проекта ГВА позволяет выйти на мировой уровень в области проектирования и создания гравитационно-волновых антенн, а также открывает прямой доступ к мировым достижениям в области наземной и космической лазерной интерферометрии, микромеханики и гравиметрии. В процессе проектирования и реализации проекта Россия может занять равное и достойное великой державы место в научно-техническом мире.
5. В прикладной области реализация проекта позволит повысить точность и устойчивость навигации в системе ГЛОНАСС в сложных условиях применения за счёт создания ассистирующих технологий навигации на основе использования ГПЗ.
6. Проект открывает возможность повышения точности перспективных космических геодезических комплексов типа GRACE на несколько порядков за счёт создания более точных измерителей по линии «спутник — спутник».
7. Реализация проекта открывает возможность создания отечественного цифрового банка глобальных гравиметрических данных поверхности Земли. Это необходимо для создания высокоточных ассистирующих технологий автономной навигации в рамках ГЛОНАСС.

В целом для России рассматриваемый проект ГВА «SOIGA» является мегапроектом, объединяющим и активизирующим творческие научно-технические силы сразу нескольких министерств и ведомств. Реализация проекта

позволит России вернуть утраченные позиции в области космической лазерной оптики, микромеханики и микроэлектроники, а также выйти на новый научный уровень в области гравитационно-волновой астрономии и дистанционной космической гравиметрии.

Литература

1. Пустовойт В.И. О непосредственном обнаружении гравитационных волн // УФН. 2016. Т. 186. № 10. С. 1–20.
2. Weber J. Gravitational-Wave-Detector Events // Physical Review Letters. 1968. 20. 1307–1308. Doi:10.1103/PhysRevLett.20.1307.
3. Герценштейн М.Е., Пустовойт В.И. К вопросу об обнаружении гравитационных волн малых частот // ЖЭТФ. 1962. 43. 605; Gertsenshtein M.E., Pustovoit V.I. // Sov. Phys. JETP. 1963. 16. 433.
4. Abramovici A., Althouse W.E., Drever R.W.P. et al. LIGO: The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory // Science. 1992. V. 256. No. 5055. P. 325–333.
5. Flaminio R. et al. The gravitational wave detector VIRGO [Electronic resource]. URL: http://icfa-nanobeam.web.cern.ch/icfa-nanobeam/paper/Flaminio_Virgo.pdf.
6. Willke B., Aufmuth P., Aulbert C. et al. The GEO600 gravitational wave detector // Classical and Quantum Gravity. 2002. V. 19. No. 7. P. 1377–1387.
7. Aso Y. et al. Interferometer design of the KAGRA gravitational wave detector // Phys. Rev. D. 20 August 2013. V. 88. P. 043007.
8. Max-Planck-Institut für Quantenoptik, 1998, LISA (laser interferometer space antenna): an international project in the field of fundamental physics in space Pre-Phase A Report MPQ, 233 (Garching bei München, Germany).
9. Giuseppe D. Racca, Paul W. McNamara The LISA Pathfinder Mission, Tracing Einstein's Geodesics in Space // Space Science Reviews. V. 151. No. 1–3, March 2010. P. 159–181. DOI: 10.1007/s11214-009-9602-x.
10. Armano M. et al. Sub-Femto-g Free Fall for Space-Based Gravitational Wave Observatories: LISA Pathfinder Results (англ.) // Physical Review Letters. 2016. V. 116. No. 23. P. 231101.
11. Seto N., Kawamura S., Nakamura T. Possibility of direct measurement of the acceleration of the universe using laser interferometer gravitational wave antenna in space // Phys. Rev. Lett. 2001. 87. 221103.
12. Sato S., Kawamura S. et al. The Japanese space gravitational wave antenna — DECIGO // J. Phys.: Conf. 2008. Ser. 122 (1). Bibcode: 2008JPhCS.122a2006K. Doi:10.1088/1742-6596/122/1/012006.
13. Kawamura S. et al. Space gravitational-wave antennas DECIGO and B-DECIGO [Electronic resource] // International Journal of Modern Physics D. 2019. V. 28. No. 12. URL: <https://doi.org/10.1142/S0218271818450013>.
14. Jun Luo et al. TianQin: a space-borne gravitational wave detector // Class. Quantum Grav. 2016. 33. 035010. 19 p.

15. Sheard B.S., Heinzel G., Danzmann K., Shaddock D.A., Klipstein W.M., Folkner W.M. Intersatellite laser ranging instrument for the GRACE follow-on mission // *J. Geod* 2012. 86:1083–1095. DOI 10.1007/s00190-012-0566-3.
16. Conclin J.W. et al. Lagrange: LAser GRavitational-wave ANtenna at GEO-lunar L 1, L 4, L 5 [Electronic resource]. URL: <http://pros.gsfc.nasa.gov/studies/grave-waves>.
17. Многоканальная астрономия / ред.-составитель А.М. Черепашук. Фрязино: Век-2, 2019. 528 с.
18. Tinto M., de Araujo J.C.N., Aguiar O.D. and Alves M.E.S. Searching for gravitational waves with a geostationary interferometer // *Astroparticle Physics*. 2013. 48. P. 50.
19. Интерфейсный контрольный документ «Глобальная навигационная спутниковая система». Ред. 5.1. М.: РКС, 2008.
20. Фатеев В.Ф. Космические измерители параметров гравитационного поля // *Альманах современной метрологии*. 2015. № 3. С. 32–62.
21. ГЭТ 2-2010 Государственный первичный эталон единицы длины — метра. ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 2010.
22. ГЭТ 199-2012 Государственный специальный первичный эталон единицы длины. ФГУП «ВНИИФТРИ», 2012.