

I. Фундаментальные исследования

УДК 006.92+521.92

**КОСМИЧЕСКАЯ ЛАЗЕРНАЯ
ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКАЯ ГРАВИТАЦИОННАЯ
АНТЕННА НА ОСНОВЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ,
РАСПОЛОЖЕННЫХ НА ОРБИТАХ ГЛОНАСС**

**^{1,2}В.И. Пустовойт, ^{1,3}Н.А. Тестоедов, ²В.Ф. Фатеев, ²С.С. Донченко,
³В.Е. Косенко**

¹РАН, Москва,

²ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.,

³АО «ИСС» им. М.Ф. Решетнёва», г. Железногорск, Красноярский край

vladpustovoi@gmail.com,

fateev@vniiftri.ru

В работе представлен российский научный проект космической гравитационной антенны, реализация которой предполагается на технологиях системы ГЛОНАСС. При этом важную роль может сыграть использование большого и многолетнего научно-технического задела, полученного на отечественных предприятиях.

Ключевые слова: космическая гравитационная антенна, концепция, технология системы ГЛОНАСС, низкоорбитальное моделирование.

**SPACE LASER INTERFEROMETRIC GRAVITATIONAL ANTENNA
ON THE BASIS OF SPACECRAFTS LOCATED IN GLONASS ORBITS**

**^{1,2}V.I. Pustovoi, ^{1,3}N. A. Testoedov, ²V. F. Fateev, ²S. S. Donchenko,
³V.E. Kosenko**

¹RAS, Moscow,

²FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow region,

³Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk re-

gion

vladpustovoi@gmail.com,

fateev@vniiftri.ru

The work presents a Russian scientific project of a space gravitational antenna, the implementation of which is expected to be based on the technologies of the GLONASS system. In this case, use of a large and long-term research and technical groundwork obtained at domestic enterprises can play an important role.

Key words: space gravitational antenna, concept, GLONASS system technology, low-orbit modeling.

В настоящее время по всему миру развиваются научные проекты по созданию гравитационно-волновых антенн (ГВА) на поверхности Земли и в космосе [1]. Главная задача ГВА заключается в регистрации движения механических систем датчика ГВА вследствие эффекта искривления пространства, возникающего при прохождении гравитационной волны через датчик.

Наибольшее распространение получили наземные лазерные интерферометрические детекторы гравитационных волн. В 1962 г. отечественными учеными М.Е. Герценштейном и В.И. Пустовойтом была предложена принципиальная схема лазерного интерферометрического детектора гравитационных волн, которая легла в основу современных лазерных детекторов [2]. В настоящее время существуют следующие наземные ГВА:

- американско-австралийская гравитационная антенна LIGO [3];
- антенна VIRGO, Пиза, Италия [4];
- антенна GEO600, Ганновер, Германия [5];
- антенна KAGRA, Токио, Япония [6].

На гравитационной антенне LIGO в 2015 г. была впервые зафиксирована гравитационная волна из космоса.

Важнейшим недостатком наземных ГВА является наличие значительных помех, вызванных воздействиями сейсмического происхождения. Вторым недостатком является необходимость поддержания глубокого вакуума в каналах распространения лазерного луча. Наконец, в силу ограниченной длины плеч интерферометра такие антенны регистрируют гравитационные волны с частотой от 10 Гц до 10 кГц с максимумом чувствительности на частоте 150 Гц.

Для регистрации низкочастотных гравитационных волн ($10^{-4} - 10^{-1}$ Гц) с длиной больше диаметра Земли необходимо создание космических ГВА. У космических ГВА следует выделить ряд преимуществ по сравнению с наземными ГВА:

- отсутствие сейсмических помех;
- отсутствие необходимости создания вакуума в канале распространения лазерного луча;
- возможность определения направления и поляризации гравитационных волн.

Космические ГВА представляют собой кластер трех и более космических аппаратов, на каждом из которых размещены две пробные массы. На этих массах закрепляются конечные зеркала лазерного интерферометрического

межспутникового дальномера. В настоящее время в ведущих зарубежных научных лабораториях мира выполняются исследования по созданию космических ГВА. Наиболее известными проектами являются: LISA [7], DECIGO [8], TianQin [9], LAGRANGE [10], GEOGRAWI [11].

В известных проектах по созданию космических ГВА КА располагаются на сверхвысоких околоземных орбитах, геостационарных и солнечно-земных орбитах. Большое межспутниковое расстояние в указанных космических ГВА позволяет регистрировать ГВ с частотой до 1 Гц. В то же время наземные ГВА обеспечивают регистрацию ГВ с частотой более 10 Гц. Таким образом, возникает задача создания системы, обеспечивающей регистрацию ГВ с максимумом чувствительности в диапазоне 1-10 Гц.

Для детектирования гравитационных волн с такими частотами предлагается использование КА на орбите ГЛОНАСС.

При этом возможны два варианта реализации этой ГВА. В первом варианте (рисунок 1а) один аппарат этой антенны размещен 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 (рисунок 1б) 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 градусов, длина базы составляет 43,3 тыс. км. Однако при такой конфигурации эффективность антенны не падает, поскольку в ней дополнительно используется третье измерительное плечо.

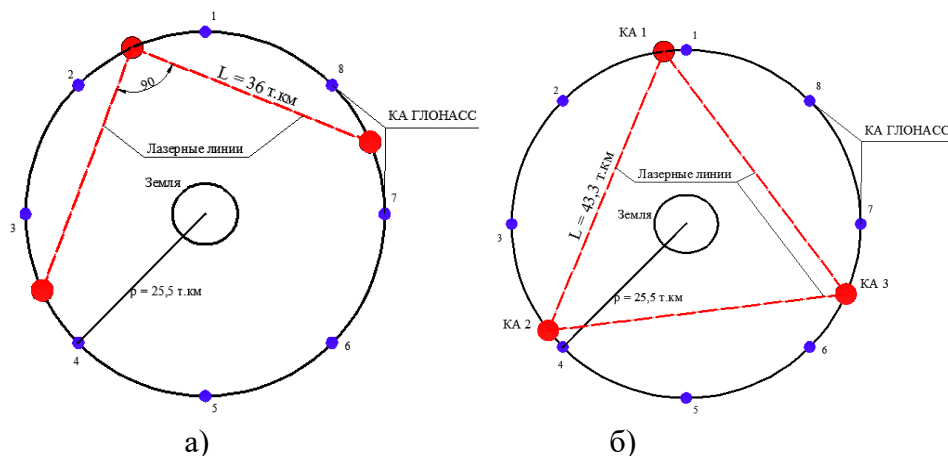


Рис. 1. Схемы размещения КА гравитационной антенны в плоскости орбиты ГЛОНАСС

Основой системы ГЛОНАСС 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 [12].

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. Кроме того, при создании космической ГВА на основе ГЛОНАСС следует учитывать, что можно использовать уже существующие подсистемы контроля и управления спутниками системы.

Космические аппараты ГВА целесообразно строить на основе многократно испытанных космических платформ НКА типа ГЛОНАСС-М, ГЛОНАСС-К, ГЛОНАСС-К2, оснащенных системами ориентации, термостабилизации, электроснабжения на основе солнечных батарей, системами связи с ПКУ и другими бортовыми системами.

Параметры ГВА на основе КА ГЛОНАСС представлены в таблице 1. Для повышения надежности обнаружения гравитационных волн возможно размещение КА интерферометров ГВА на двух орбитах ГЛОНАСС. При этом количество КА увеличивается до шести.

Основные расчетные параметры КА ГВА на основе орбиты ГЛОНАСС представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры ГВА на основе 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	$0,5 \times 10^{-15}$ м/с ² / $\sqrt{\text{Гц}}$
Длина волны лазера	Около 1 мкм
Диапазон частот регистрируемых волн	(0,2-0,0002) Гц

Как отмечалось, при размещении ГВА на средневысотной околоземной орбите ГЛОНАСС появляется возможность регистрировать гравитационные волны в частотном диапазоне, находящемся вне пределов чувствительности существующих наземных и проектируемых космических ГВА. При этом каждый КА должен быть оснащен системой «спутник, свободный от сноса».

Теоретическая оценка чувствительности предлагаемой космической ГВА была проведена для второго варианта предлагаемой системы (расстояние между КА 43 тыс. км). При этом учтены основные факторы, влияющие на точность смещения гравитационных масс, а, следовательно, на минимально детектируемую амплитуду гравитационной волны: дрейф частоты лазера, остаточный фазовый шум стабилизированного лазера, термо-оптический шум, нестабильность частоты опорного генератора, погрешность системы компенсации чувствительных масс, погрешность системы ориентации КА, угловой «джиттер» чувствительных масс, дробовый шум, светоэлектрический эффект.

Наибольшее влияние на точность измерений оказывает дрейф частоты лазера интерферометрического датчика и остаточный фазовый шум синхронизации бортовых лазеров КА. Теоретическая чувствительность такой антенны к изменению расстояния КА-КА составляет $0,1..1$ пм/ $\sqrt{\text{Гц}}$ (в зависимости от параметров используемых лазеров). Это позволит зарегистрировать гравитационную волну с безразмерной амплитудой до $0,5 \cdot 10^{-19}$.

Как и в других известных проектах космических ГВА, основными элементами каждого КА гравитационной антенны является высокоразрешающий лазерный интерферометр и бортовая система «спутник, свободный от сноса», которая предназначена для компенсации активных ускорений, вызванных внешними воздействиями негравитационного происхождения. На каждом аппарате для реализации двух плечей интерферометра размещается по два «спутника, свободного от сноса», каждый из которых обеспечивает измерения в своем плече интерферометра. Погрешность компенсации активных ускорений должна быть не выше $0,5 \cdot 10^{-15} \text{ м/с}^2$.

На первом этапе разработки космической ГВ предлагается создать наземные макеты высокоточного лазерного интерферометра и системы компенсации положения пробной массы («спутник, свободный от сноса») [13] (рисунок 2).



Рис. 2. Схема наземного макета «спутников свободных от сноса» совместно с оптическим интерферометром

На предложенном наземном макете измеряется взаимное положение пары макетов «спутников, свободных от сноса» с двумя степенями свободы с емкостным или лазерным съемом.

При этом в лазерном интерферометре сначала реализуется простой режим приема и слежения за фазой отраженного 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.

Ожидаемая остаточная погрешность системы компенсации неустойчивости положения чувствительных масс в лабораторных условиях составляет не более 10^{-13} м.

На следующем этапе реализации ГВА предлагается создать односпутниковый макет на низкоорбитальных космических аппаратах. Данный эксперимент аналогичен эксперименту в проекте Pathfinder LISA с двумя чувствительными массами, движущимися внутри одного и того же КА [14]. На низкой орбите при расстоянии между массами не более 1 м этот эксперимент является измерителем гравитационного градиента [13].

Далее планируется эксперимент по реализации ГВА в виде двухспутникового макета на низкоорбитальных космических аппаратах.

Идея эксперимента состоит в использовании переменного гравитационного поля Земли, возникающего при перемещении пары КА по низкой околоземной орбите. Это поле вызывает переменные взаимные смещения КА взаимодействующей пары, подобные воздействию истинной переменной гравитационной волны.

Двухспутниковый низкоорбитальный макет ГВА предлагается исследовать по следующим направлениям:

- 1) оценка чувствительности макета на переменном гравитационном поле Земли;
- 2) определение предельных возможностей системы компенсации негравитационных воздействий на пробные массы;
- 3) оценка метрологических характеристик системы синхронизации лазеров из состава лазерного межспутникового интерферометра, а также интерферометра в целом.

Выводы

1. Российский проект космической гравитационной антенны 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, развитии методов и средств эфемеридно-временного обеспечения системы, развитии методов и средств управления

системой, а также ее метрологического обеспечения.

2. Создание наземных макетов спутников, свободных от сноса, и лазерного интерферометрического датчика позволит отработать технические решения, проверку основных технологических компонентов в лабораторных условиях. На разработанных макетах будут проведены исследования для определения характеристик узлов, разрабатываемых ГВА.

3. Низкоорбитальное моделирование космической ГВА позволит отработать систему компенсации пробных масс и оценить их остаточную нестабильность. Также будет произведена оценка лазерной интерферометрической системы измерения приращений. По результатам исследований характеристик низкоорбитальной космической ГВА будет оценена чувствительность системы, выявлены источники наибольших погрешностей и предложены пути их уменьшения.

4. Реализация предложенной космической ГВА на орбитах ГЛОНАСС позволит наблюдать, как минимум, следующие астрофизические цели: слияние черных дыр массой в диапазоне 10^4 - 10^6 солнечных масс (частота этих событий – до 50 раз в год), а также двойные звездные массы в Млечном пути с орбитальным периодом 10^2 – 10^3 с.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-11022.

Литература

1. Пустовойт В.И. О непосредственном обнаружении гравитационных волн // УФ., 2016. Том 186. № 10. С. 1-20.
2. Герценштейн М.Е., Пустовойт В.И. К вопросу об обнаружении гравитационных волн малых частот // ЖЭФТ 43. 605. (1962); Gertsenshtein M. E., Pustovoit V I// Sov. Phys. JETP, 16. 433 (1963).
3. Abramovici A., Althouse W. E., Drever R. W. P. et al. LIGO: The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory // Science. 1992. V. 256, № 5055. P. 325–333.
4. Flaminio R et al. The gravitational wave detector VIRGO http://icfa-nanobeam.web.cern.ch/icfa-nano-beam/paper/Flaminio_Virgo.pdf.
5. Willke B., Aufmuth P., Aulbert C. et al. The GEO600 gravitational wave detector // Classical and Quantum Gravity. 2002. V. 19. № 7. P. 1377–1387.

6. Aso Y. et al. Interferometer design of the KAGRA gravitational wave detector // Phys. Rev. D, 20 August 2013. V. 88. P.043007.
7. 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).
8. 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. 87. 221103 (2001).
9. Jun Luo et al. TianQin: a space-borne gravitational wave detector. // Class. Quantum Grav. 33 (2016). 035010. (19pp).
10. Conclin J.W. et al. Lagrange: LAsER GRavitational-wave ANtenna at GEo-lunar L 1, L 4, L5 // <http://pros.gsfc.nasa.gov/studies/gravewaves>.
11. 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.
12. Интерфейсный контрольный документ «Глобальная навигационная спутниковая система», ред. 5.1. Изд. РКС, 2008.
13. Фатеев В.Ф. Космические измерители параметров гравитационного поля // Альманах современной метрологии. 2015. №3. С. 32-62.
14. Giuseppe D. Racca, Paul W. McNamara. The LISA Pathfinder Mission, Tracing Einstein's Geodesics in Space // Space Science Reviews. V. 151. № 1-3, March 2010. P. 159-181, DOI: 10.1007/s11214-009-9602-x.