

Разработка наземного стенда лазерного интерферометра для проекта космического детектора гравитационных волн на орбитах ГЛОНАСС

С. С. Донченко, Р. А. Давлатов, Д. А. Соколов, Е.А. Лавров, И.О. Скакун

ФГУП «ВНИИФТРИ», р.п. Менделеево, Россия

В работе рассмотрены оптические системы существующих проектов космических детекторов гравитационных волн. Описаны принципы построения лазерного межспутникового интерферометра Майкельсона для проекта космического детектора гравитационных волн на орбитах ГЛОНАСС «SOIGA». Представлены результаты разработки наземного стенда интерферометра, оценен шумовой бюджет и подтверждена чувствительность интерферометра на уровне 100 пм. Предложена система углового совмещения оптических осей телескопов с подтвержденной угловой чувствительностью системы на уровне 0,01 угловой секунды.

Ключевые слова: Межспутниковый лазерный интерферометр, Гравитационные волны.

Цитирование: **Донченко, С. С.** Разработка наземного стенда лазерного интерферометра для проекта космического детектора гравитационных волн на орбитах ГЛОНАСС / С. С. Донченко, Р. А. Давлатов, Д. А. Соколов, Е.А. Лавров, И.О. Скакун // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 219–223.

Введение

В настоящее время активно развиваются проекты гравитационно-волновых антенн (LISA, TIANQIN, DECIGO и др.). Основные задачи, решаемые в таких проектах – регистрация длинноволновых гравитационных волн и уточнение гравитационного поля Земли с помощью лазерной интерферометрии в космосе. Принцип работы в этих миссиях основан на измерении относительного положения космических аппаратов (КА) и пробных масс, размещенных внутри них.

1. Существующие проекты космических детекторов гравитационных

ВОЛН

В проекте LISA предлагается разместить КА на гелиоцентрической орбите на расстоянии от 50 до 65 миллионов км от Земли, со средним расстоянием между КА около 2,5 миллиона км. КА в углах треугольника имеют две пробные массы, которые определяют конечные точки плеч, а также оборудование для лазерного интерферометрического измерения длины этих плеч.

В космическом детекторе TIANQIN на каждом космическом аппарате имеются три оптических модуля: модули стабилизации частоты лазера, оптической фазовой синхронизации и гетеродинный интерферометр.

В проекте GRACE-FO группировка состоит из двух низкоорбитальных спутников на высоте от 170 до 200 км, летящих друг за другом. Между космическими аппаратами реализована интерферометрическая измерительная линия.

2. Проект гравитационно-волновой антенны SOIGA

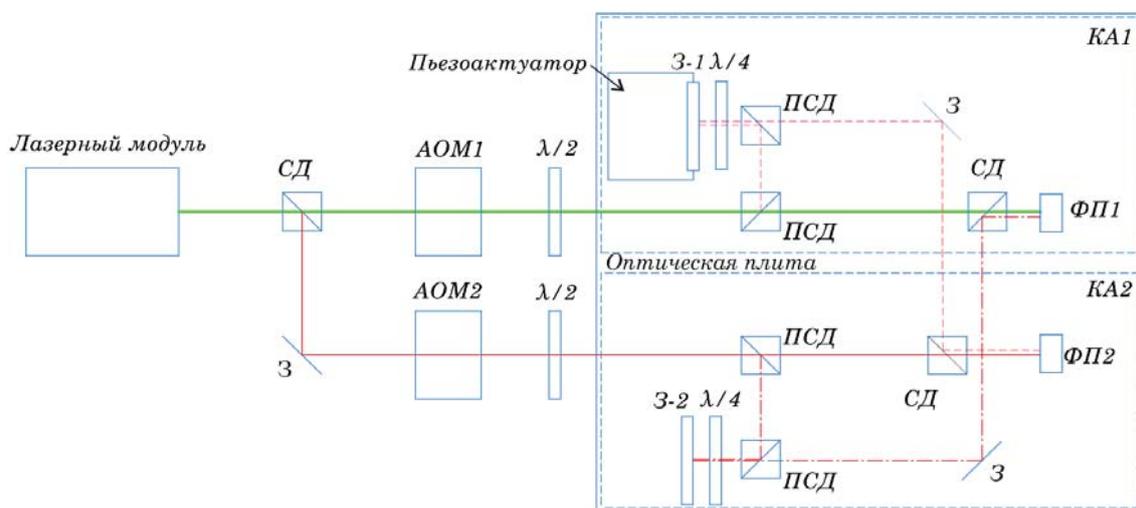
В Российской Федерации предлагается проект космической ГВА на геоцентрической орбите ГЛОНАСС под названием «SOIGA» (Space Optical Interferometric Gravitation Antenna) для регистрации гравитационных волн в диапазоне от 10^{-2} до 1 Гц [1].

В работе [2] было установлено, что оптимальной конфигурацией гравитационно-волновой антенны является кластер из 12 космических аппаратов на высоте орбиты спутников ГЛОНАСС. Космические аппараты размещены в трех орбитальных плоскостях, разнесенных по долготе восходящего узла на 120° .

В предлагаемом проекте «SOIGA» расстояние между космическими аппаратами составляет от 36 тыс. км до 144 тыс. км, апертура оптической передающей и приемной системы – 200 мм, длина волны – 535 нм.

3. Наземный макет интерферометра

Для отработки технических решений по межспутниковому интерферометру был разработан наземный макет интерферометра, функциональная схема которого представлена на рис. 1.



СД – светоделитель, АОМ – акустооптический модулятор, $\lambda/2$ – полуволновая пластинка, $\lambda/4$ – четвертьволновая пластинка, З – зеркало, ПСД – поляризационный светоделитель, ФП – фотоприемник

Рис. 1. Функциональная схема макета межспутникового интерферометра

На оптической плите имитируются бортовые системы КА1 и КА2, считается, что излучение с частотой f_0+f_1 формируется бортовым лазером первого аппарата, излучение с частотой f_0+f_2 – бортовым лазером второго аппарата. С помощью обычных и поляризационных светоделителей часть излучения подается напрямую на ФП1 и ФП2 с фазой оптического излучения φ_{on1} (рис.1, зеленая сплошная линия) и φ_{on2} (рис.1, красная сплошная линия) соответственно. Пунктирной синей линией показан путь оптического излучения от первого лазера, попадающее на зеркало З-1, выполняющее роль грани пробной массы КА-1,

далее отраженное излучение направляется на ФП2 с фазой φ_{3-1} . Штрихпунктирной линией показан путь оптического излучения от первого лазера, попадающее на зеркало 3-2, выполняющее роль грани пробной массы КА-2, далее отраженное излучение направляется на ФП1 с фазой φ_{3-2} . Таким образом на ФП1 и ФП2 формируются разностные электрические сигнал с частотой f_1-f_2 и фазой $\varphi_{on1} - \varphi_{3-2}$ и $\varphi_{on2} - \varphi_{3-1}$ соответственно.

Сигналы с ФП1 и ФП2 подаются на цифровой осциллограф, который регистрирует сигнал биений. Далее с помощью Фурье-метода измеряются фазы сигнала с фотоприемников и вычисляется разность $\varphi_1 - \varphi_2$ для ФП1 и ФП2 соответственно. Приращение расстояния ΔL между зеркалами 3-1 и 3-2 соответственно можно рассчитать из соотношения:

$$\Delta L = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)\lambda}{4\pi}$$

где λ – длина волны оптического излучения.

Для проверки разрешающей способности макета интерферометра использовался пьезоактуатор, на котором размещается зеркало 3-1. На пьезоактуаторе устанавливается режим сканирования, при котором с заданной периодичностью зеркало перемещается на указанное расстояние с дискретностью перемещения 1 нм. Результаты сканирования с шагом 5 и 100 нм приведены на рис.2.

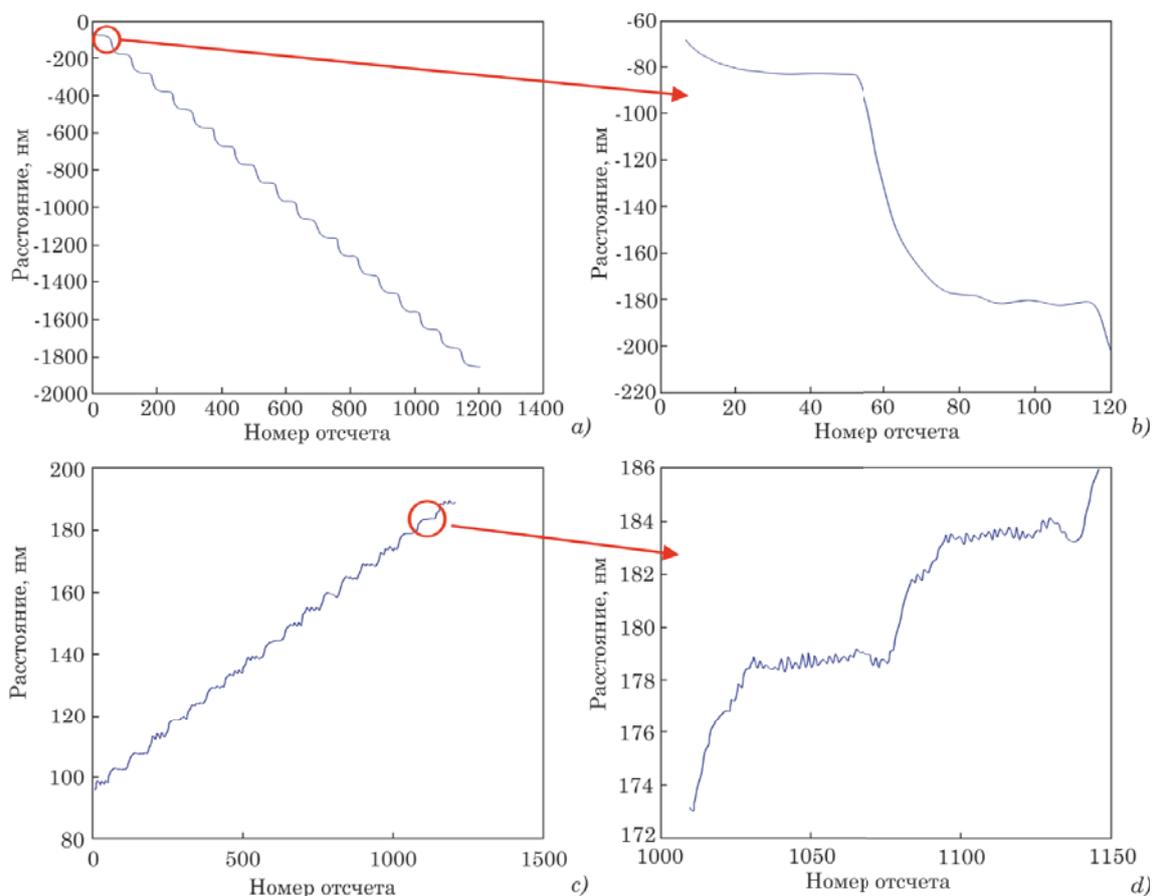


Рис.2. Результаты исследования линейного разрешения на макете интерферометра

Было показано, что измеренное с помощью макета интерферометра перемещение зеркала 3-1 относительно 3-2 с шагом в 5 и 100 нм соответствует данным энкодера пьезоактуратора со средней разницей в 0,5 нм и СКО измерений 0,17 нм.

На рисунке 3 показана угловая разрешающая способность системы.

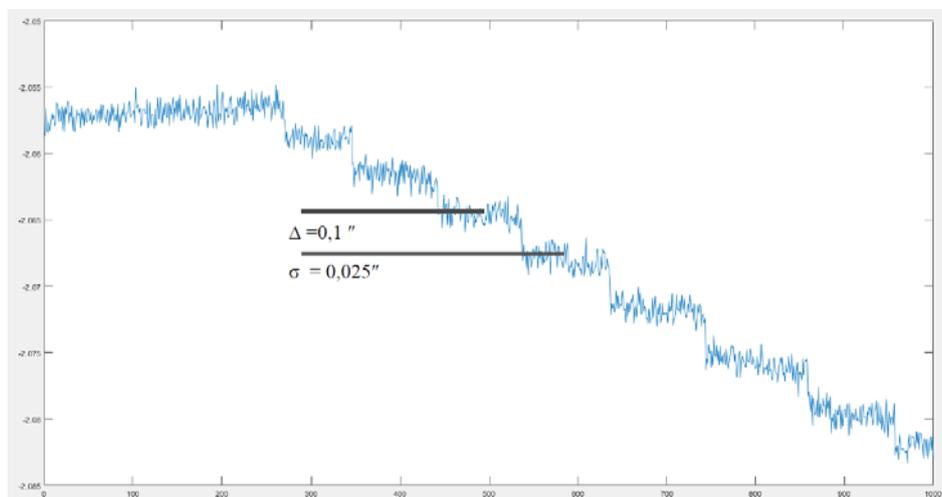


Рис.3. Результаты исследования угловой разрешающей способности на макете интерферометра

Заключение

В работе представлен проект отечественной гравитационно-волновой антенны «SOIGA». Предложен и разработан наземный макет межспутникового интерферометра. Показана точность измерений приращений расстояния между зеркалами на уровне $\pm 0,5$ нм с СКО 0,17 нм. Предложена система углового совмещения оптических осей телескопов с подтвержденной угловой чувствительностью системы на уровне 0,01 угловой секунды.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-11022\20.

Список источников

- [1] Пустовойт, В. И. Концепция создания космической лазерной гравитационной антенны на геоцентрической орбите ГЛОНАСС «SOIGA» / В. И. Пустовойт, С. И. Донченко, О. В. Денисенко, В. Ф. Фатеев // Альманах современной метрологии — 2020. — № 1 (21). — С. 27–49.
- [2] Донченко, С. С. Особенности высокоточной космической лазерной гравитационно-волновой антенны на основе спутников, движущихся по орбитам ГЛОНАСС / С. С. Донченко, В. Ф. Фатеев., Р. А. Давлатов., П. Г. Харламов., Е. А. Карауш., Ю. В. Гостев., Д. А. Соколов., Е. А. Лавров // Альманах современной метрологии — 2020. — № 3 (23) — С. 53-96.

Development of a ground model of a laser interferometer for the space gravitational wave detector project of in GLONASS orbits

S. S. Donchenko, R. A. Davlatov, D. A. Sokolov, E. A. Lavrov, I. O. Skakun

FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Russia

The paper considers the optical systems of existing projects of space gravitational wave detectors. The principles of constructing an inter-satellite Michelson laser interferometer are described for the space gravitational wave detector project "SOIGA" in GLONASS orbits. The results of the engineering of a ground model of an interferometer are presented, the noise budget is evaluated, and the sensitivity of the interferometer at a level of 100 pm is affirmed. A system of angular alignment of the optical axes of telescopes with a confirmed angular sensitivity of the system at the level of 0.01 arc seconds is provided.

Keywords: Intersatellite laser interferometer, Gravitational waves.