

МЕЖСПУТНИКОВЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ГРАВИТАЦИОННЫЙ ГРАДИЕНТОМЕР НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРА КА НАНОКЛАССА

В.Ф. Фатеев, С.С. Донченко, Р.А. Давлатов

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений»

davlatov_r_a@mail.ru

Актуальность

Существующие навигационные системы не в полной мере отвечают требованиям точности, глобальности, скрытности и помехозащищенности при навигации под водой и других сложных условиях. Основой систем автономной навигации являются бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС). Однако БИНС обеспечивает требуемую точность только на начальном участке маршрута. На протяженных трассах погрешность БИНС накапливается и их показания должны корректироваться. Наилучшим решением для коррекции БИНС является использование результатов измерений параметров гравитационного поля, т.к. это поле:

- не подвержено влияниям помех;
- стабильно во времени;
- обладает глобальностью.

Для обеспечения системы навигации по гравитационному полю Земли необходимо предварительно сформировать навигационные гравиметрические карты. Так как актуальными областями использования такой системы навигации являются удаленные и труднодоступные территории, в т.ч. в зоне Арктики, то целесообразно использовать космические средства измерений. В данной работе рассматривается возможность создания лазерного гравитационного градиентометра на основе кластера космических аппаратов нанокласса.

Оценка структуры и параметров бортового лазерного интерферометра

Принцип лазерного градиентометра заключается в определении разности гравитационных сил, действующих на космические аппараты. При этом выполняются высокоточные измерения относительного движения космических аппаратов. В настоящей работе предлагается использовать лазерный интерференционный измеритель, так как он является самым точным средством регистрации изменения межспутникового расстояния. В зависимости от архитектуры космического гравитационного градиентометра могут быть использованы следующие типы интерферометров: Майкельсона, Саньяка, Фабри-Перо.

Интерферометр Фабри-Перо используется в том случае, когда требуется получить высокий отклик при небольшом межспутниковом расстоянии. Однако этот интерферометр чувствителен к угловым флуктуациям оптических элементов. Интерферометр Саньяка также не подходит, так как применяется для высокоточного определения вращения измеряемой системы. Оптимальным выбором для космического гравитационного градиентометра будет интерферометр Майкельсона, так как он обеспечивает высокую точность и при этом его реализация в космосе технически осуществима.

Необходимым условием функционирования межспутникового интерферометра является обеспечения низкого уровня шума. Основными источниками шумов являются шумы лазера,

шумы детектора и нестабильность системы наведения. Дробовый шум фотоприемника является фундаментальным и вносит наибольший вклад в шумовой бюджет детектора.

Помимо низкого уровня шума необходимо обеспечить достаточный уровень мощности оптического излучения в интерферометре, которая зависит от мощности лазерного излучения и потерь в системе. Основным источником потерь является расходимость оптического излучения, возникающая из-за конечных размеров приемо-передающей оптики. Так для Гауссова пучка с длиной волны λ с перетяжкой, равной половине диаметра зеркала D , для плеч длиной L потери составят $D^4/(\lambda^2 L^2)$

При габаритах одного блока КА аппарата типа CubeSat 100x100x100 мм апертура оптической системы не должна превышать 80 мм. В качестве лазерного источника предлагается использовать монолитный частотно-стабилизированный Nd:YAG лазер кольцевого типа. Небольшой объем спутника приводит к ограничению максимальной мощности лазера на уровне 100 мВт. Необходимый уровень сигнала для работы интерферометра - не менее 100 мкВт. Это ограничивает максимальное межспутниковое расстояние до 100 км при использовании пассивных отражателей.

Оценка орбитальной структуры многоспутникового гравитационного градиентометра

Предлагаются следующие варианты конфигурации построения космического градиентометра на основе пассивных отражателей:

- три пары космических аппаратов, в каждой из которых один ведущий с лазерным излучателем и измерителем, второй - с отражателями;
- один ведущий космический аппарат и 6 маленьких космических аппаратов с отражателями типа трипель-призм или линз Люнеберга.

В случае больших дистанций (>100 км) предлагаются следующие конфигурации:

- три пары космических аппаратов, формирующих дуплексные интерферометрические системы;
- три пары космических аппаратов, при этом на одном из КА размещается ведущий лазерный модуль, на втором – ведомый, который ретранслирует обратно сигнал ведущего спутника.

Предложенный проект космического гравитационного градиентометра при чувствительности лазерной интерферометрической системы на уровне 10 пм позволит измерить гравитационный градиент с погрешностью на уровне 10^{-7} Этвеш, что в 100 раз лучше зарубежных измерительных систем.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-67-10007, <https://rscf.ru/project/23-67-10007/>