

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. Ломоносова

На правах рукописи



Жамков Александр Сергеевич

**Моделирование орбит космических аппаратов для решения
астрометрических и гравиметрических задач**

Специальность 01.03.01 – астрометрия и небесная механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2018 г.

Работа выполнена на кафедре небесной механики, астрометрии и гравиметрии физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель — *Жаров Владимир Евгеньевич, д.ф.-м.н., профессор, МГУ имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, заведующий кафедрой небесной механики, астрометрии и гравиметрии*

Официальные оппоненты — *Гаязов Искандер Сафаевич — д.ф.-м.н., ИПА РАН, заведующий лабораторией космической геодезии и вращения Земли*

Кудрявцев Сергей Михайлович — д.ф.-м.н., доцент, ГАИШ МГУ, ведущий научный сотрудник

Холшевников Константин Владиславович — д.ф.-м.н., профессор, СПбГУ, заведующий кафедрой небесной механики

Защита диссертации состоится «13» декабря 2018 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.02 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Университетский проспект, дом 13, конференц-зал.

E-mail: zhamkov@physics.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/122350483/>

Автореферат разослан «30» октября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



М.В. Пружинская

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Важность исследований, проводимых космическими аппаратами (КА), как на околоземной орбите, так и на отлетных гелиоцентрических траекториях, трудно переоценить. Особую нишу занимают КА, функционирующие в интересах развития фундаментальной науки, предметом исследования которой являются основополагающие процессы всех явлений, наблюдаемых во Вселенной. Зачастую исследование этих процессов накладывает жесткие ограничения на характеристики аппаратуры, проводящей эти измерения. Если речь идет об измерениях с помощью космических средств, то, в первую очередь, это означает предъявление строгих требований к баллистическому обеспечению КА, поскольку выявление и исследование тонких эффектов невозможно без точного знания местоположения КА.

Определение орбиты КА в сфере действия Земли отличается от классической задачи определения орбиты небесных тел. Для большинства КА, функционирующих на низких околоземных орбитах, гравитационные силы значительно отличаются от центральных притягивающих сил, а воздействие атмосферы имеет существенное воздействие. Наоборот, КА, функционирующие на высоких орбитах в большей степени подвержены влиянию Луны, Солнца и планет Солнечной системы и в меньшей степени зависят от всех остальных факторов. Эта специфика требует индивидуального подхода к моделированию орбит КА, выполняющих различные целевые задачи.

Необходимость знания с высокой точностью положения КА на низких круговых околоземных орбитах (до 1000 км) обусловлена решением научно-прикладных задач. Одной из таких задач является исследование гравитационного поля Земли (ГПЗ). К настоящему времени уже реализованы некоторые проекты исследования ГПЗ с помощью КА:

«GRACE» (NASA) [1,2,3], «GOCE» (ESA) [4], «CHAMP» (ESA) [5]. В первом из них используются два КА, двигающиеся по одной орбите. Определение параметров ГПЗ осуществляется путем измерения расстояния между ними с помощью системы микроволновой связи. При этом требования к точности абсолютного местоположения КА на орбите предъявляются очень строгие и составляют ≈ 1 см.

Необходимость знания с высокой точностью положения КА на высокоапогейных орбитах стала очевидной с запуском проекта «Радиоастрон» [9,10,11]. В ходе научных наблюдений находящийся на борту КА «Спектр-Р» радиотелескоп диаметром 10 метров является элементом наземно–космического интерферометра, вынесенным относительно наземных радиотелескопов на расстояние, ограниченное апогеем орбиты КА (около 300 тыс. км). Для успешной работы, а также корреляции наблюдений на наземно-космическом интерферометре необходимо с максимально высокой точностью определять положение базы наземно-космического интерферометра, а, значит, и геоцентрическую орбиту КА. Для корреляционной обработки научной информации отличие расчетной орбиты от реальной по положению, скорости и ускорению не должно превышать соответственно 100-300 м, 2 мм/с и 5×10^{-5} мм/с² [10].

Знание с высокой точностью положения КА на высоких круговых околоземных орбитах (около 100 тыс. км) диктуется необходимостью решения одной из фундаментальных и актуальных задач современности – поиска гравитационных волн (ГВ). Существующие проекты космических детекторов гравитационных волн (например, «LISA») ставят целью создание ГВ-обсерватории для регистрации и изучения гравитационных волн от многообразия еще неизвестных источников. Имеющиеся альтернативные отечественные проработки такого проекта [12] показывают, что оптимальная конфигурация космического детектора для регистрации ГВ от известного источника должна быть реализована на трех

идентичных КА, размещенных на почти идентичных геоцентрических орбитах с большой полуосью $\approx 10^5$ км и формирующих почти равносторонний треугольник. Требования к измерению межспутникового расстояния составляют величину ≈ 1 пм, как и в проекте «LISA», а это значит, что должен быть произведен точный баллистический расчет группировки КА.

Представленные выше примеры как функционирующих, так и готовящихся к запуску проектов, раскрывают актуальность решаемой в настоящей работе задачи моделирования орбит КА.

Необходимо отметить, что в зарубежных проектах для достижения целевой задачи в части определения орбиты КА находит широкое применение сеть наземных измерительных станций, а также использование сигналов ГНСС (глобальных навигационных спутниковых систем) с последующей их обработкой, использующей комплекс математических методов. По этой причине в данной работе при моделировании орбиты (программным методом) рассмотрен вопрос развития наземных измерительных станций, учета ГНСС сигналов, а также задействованы такие математические аппараты, как метод наименьших квадратов (МНК) и фильтр Калмана. В качестве интегратора орбиты был выбран алгоритм Рунге-Кутты 4-го порядка. Для расчета орбиты были использованы общедоступные модели:

- модель ГПЗ EGM-96;
- модель атмосферы NRLMSISE-00;
- модель океанических приливов FES2004;
- эфемериды Луны, Солнца и планет DE 421.

Кроме этого в программе реализован высокоточный переход между системой GCRS (Geocentric Celestial Reference System) и ITRS (International Terrestrial Reference System), а также учет твердых (в том числе полярных) приливов согласно рекомендациям IERS 2010 (International Earth Rotation

Service). Для расчета океанических полярных приливов использована модель Desai.

Новизна работы и ее цель заключаются в создании унифицированного программного комплекса, применяющего описанные выше методы расчета и уточнения орбиты КА, для его использования в космических проектах астрометрической и гравиметрической направленности, требующих определения орбиты КА с высокой точностью.

Практическая значимость работы определяется возможностью в перспективе осуществлять прецизионное моделирование орбит отечественных КА для реализации проектов, решающих широкий спектр как научно-прикладных задач в интересах социально-экономического сектора, так и задач двойного назначения.

Положения диссертации, выносимые на защиту

1. В рамках моделирования движения КА на низкой околоземной орбите в интересах решения фундаментальных задач гравиметрии определены оптимальные величины межспутникового расстояния орбитальной группировки, состоящей из двух КА, и требования к точности измерения межспутникового расстояния в зависимости от уточняемой гармоники геопотенциала. Определена оптимальная рабочая высота группировки (400 км) и необходимое время проведения измерений для восстановления карты гравитационного поля Земли, которое составляет 1 месяц. Определены зависимости точности определения коэффициентов Стокса от наклона и межспутникового расстояния, где показано, что коэффициенты уточняются тем лучше, чем выше исследуемый порядок геопотенциала. Проведена оценка работы КА с градиентометром на борту и показано, что такой КА может проводить измерения на одной и той же орбите, что и система «спутник-спутник», расширяя тем самым состав измерений в выделенной области пространства, однако более

предпочтительной для градиентометрических измерений является более низкая орбита (≤ 300 км).

2. В рамках моделирования движения КА на высокой эллиптической орбите в рамках решения фундаментальных астрометрических задач на примере проекта «Радиоастрон» с помощью алгоритма фильтра Калмана на основе радиодальномерных и доплеровских измерений улучшен показатель отношения сигнал/шум, с одновременным уменьшением задержки и остаточной частоты интерференции в результате корреляционной обработки данных наблюдений, что является уверенным подтверждением успешной работы алгоритма по уточнению орбиты КА. Показано, что измерения дальности и радиальной скорости должны производиться минимум с трех наземных станций, для которых КА находится в зоне видимости. Отмечена необходимость рассмотрения возможности одновременных измерений со станций «Медвежьи Озера» и «Уссурийск» и увеличения периода радиодальномерных измерений более 15 минут. Для уточнения орбиты на основе одних только радиодальномерных данных нужна дополнительная независимая информация о ее наклонении и долготе восходящего узла; для уточнения орбиты на основе двух комплектов радиодальномерных данных нужна дополнительная независимая информация либо о наклонении, либо о долготе восходящего узла.

3. В рамках моделирования движения КА на высокой круговой околоземной орбите в интересах решения задач фундаментальной гравитации было получено, что измерительная система КА в составе орбитальной группировки по детектированию гравитационных волн (ГВ) должна быть способна проводить измерения межспутникового расстояния с точностью ≈ 1 пм на фоне изменения длины базы $\approx 0,2$ м/с. Для выявления эффектов прохождения ГВ необходим, в том числе, учет атмосферы Земли, оказывающей ускорение $\approx 10^{-14}$ м/с² при требуемой

чувствительности эксперимента $\approx 10^{-15}$ м/с². Определены предварительные требования к системе ориентации КА группировки: максимальная скорость коррекции угла при наведении луча лазера на другой КА в орбитальной группировке должна составлять $\approx 1,25 \times 10^{-4}$ °/с, при этом оценка сверху для точности упреждения луча $\approx 7,2 \times 10^{-5}$ °.

Апробация результатов работы программы в части астрометрической направленности проведена на корреляторе АКЦ ФИАН при обработке наблюдений проекта «Радиоастрон», в части гравиметрической направленности – при сравнении полученных данных с имеющимися данными зарубежных проектов.

Результаты работы изложены в таких рецензируемых журналах из списка Scopus, WoS, RSCI как:

1. Жамков А.С., Жаров В.Е., // Уточнение орбиты КА «Спектр-Р» в проекте «Радиоастрон» с помощью радиодальномерных и доплеровских измерений // Вестн. Моск. ун-та. Физ., Астрон., 2016., №3., С. 61. (Zhamkov A.S., Zharov V.E., // Moscow University Physics Bulletin. 71. N 3. pp. 299-308, 2016, DOI 10.3103/S0027134916030152). Импакт-фактор: 0.503.
2. Жамков А.С., Жаров В.Е., // Уточнение орбиты КА «Спектр-Р» в проекте «РадиоАстрон» и необходимые для этого условия при использовании фильтра Калмана // Вестн. Моск. ун-та. Физ., Астрон., 2017., №3., С.99. (Zhamkov A.S., Zharov V.E., // Moscow University Physics Bulletin. 72. N3. pp. 318-325, 2017, DOI 10.3103/S0027134917030158). Импакт-фактор: 0.503.
3. А.В. Бурданов, А.С. Жамков, В.Е. Жаров, В.К. Милюков, М.В. Сажин // Новый подход к проведению гравитационных исследований на околоземной орбите. // Космонавтика и ракетостроение, ЦНИИмаш, 2016, том 8, №93, с. 5-15. Импакт-фактор: 0.284.

4. Жамков А.С., Жаров В.Е., // Моделирование движения двух информационно связанных космических аппаратов в гравитационном поле Земли для решения гравиметрических задач // Вестн. Моск. ун-та. Физ., Астрон., 2018, №5, стр. 71-77. (Zhamkov A.S., Zharov V.E., // Moscow University Physics Bulletin. 73. N5. pp. 534-541, 2018, DOI 10.3103/S0027134918050181) Импакт-фактор: 0.503.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- «Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», г. Москва, 2016, 2017 г.;
- «VI Пулковская молодежная астрономическая конференция», г. Санкт-Петербург, 2016 г.;
- «Научно-практическая конференция «Космонавтика и ракетостроение: Взгляд в будущее», г. Королев, 2016 г.;
- «Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение», г. Менделеево, 2017 г.;
- «Ломоносовские чтения», г. Москва, 2017 г.

Личный вклад автора в работах 1 и 2 заключается в написании программы на языке «Fortran», использующей фильтр Калмана для уточнения орбиты КА «Спектр-Р» в проекте «Радиоастрон» на основе радиодальномерных и доплеровских измерений. Личный вклад автора в работе 3 заключается в моделировании и последующем выделении из результатов моделирования требований к ориентации и стабилизации КА в группировке, предполагаемой для регистрации гравитационных волн на высокой геоцентрической орбите. В работе 3 автором также предложена идея отработки лазерной системы измерения межспутникового расстояния на более простом проекте в интересах исследования гравитационного поля Земли. В работе 4 автором усовершенствован исходный код, используемый

в работах 1-3, в результате которого был разработан программный комплекс, предназначенный для проектирования высокоточных орбит КА на низкой околоземной орбите с целью измерения геодезических параметров Земли.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и двух приложений. Общий объем диссертации составляет 158 страниц (из них Приложения занимают 7 страниц), включающих 55 рисунков и 11 таблиц. Список использованных источников включает 55 наименований.

Содержание работы по главам

Введение

Во введении определена актуальность избранной темы, научная новизна и цели работы, ее практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту и апробация результатов.

Раздел 1 Моделирование и уточнение орбиты КА «Спектр-Р» в проекте «Радиоастрон» с помощью радиодальномерных и доплеровских измерений

Результаты раздела 1 основаны на статье [1] из списка публикаций автора, указанных в апробации. В разделе 1 изложены первые результаты по уточнению вектора состояния КА «Спектр-Р» в проекте «Радиоастрон», являющегося элементом наземно-космического радиоинтерферометра. Вектор состояния включает в себя по три компоненты положения и скорости аппарата в геоцентрической системе координат, которые посредством применения фильтра Калмана на основе радиодальномерных и доплеровских данных уточняются с каждой итерацией алгоритма.

Определением расчетной орбиты КА «Спектр-Р» занимается Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша (ИПМ РАН). На момент работы (2014 год) над этим проектом в рамках настоящей

диссертационной работы из 700 сеансов наблюдений, только 200 были успешными, большинство из них были связаны с неточным определением орбиты КА «Спектр-Р».

В целях устранения этой проблемы была предпринята попытка определения координат и компонент скорости КА «Спектр-Р» на момент проведения им наблюдений с использованием фильтра Калмана, учитывающего дальномерные и доплеровские измерения, что и является отличительной чертой настоящей работы. Данные штатных радиотехнических измерений дальности и радиальной скорости были получены на станциях управления в Уссурийске и Медвежьих Озерах.

Для работы фильтра Калмана необходимо задать модель движения КА, а также модель наблюдения. Модель движения включала в себя несферичность геопотенциала до 10 порядка и степени включительно, воздействие от планет и давления солнечного излучения. Модель наблюдений включала модель для радиодальномерных и доплеровских измерений с учетом релятивистских поправок и задержки радиосигнала.

Показано, что полученные результаты по уточнению орбиты улучшают точность орбиты, рассчитываемой Институтом прикладной математики им. М.В. Келдыша.

На рисунке 1.1 представлен первый успешный результат применения фильтра Калмана к задаче уточнения орбиты КА «Спектр-Р» в проекте «Радиоастрон». Представленные изображения – найденный корреляционный отклик на плоскости «fringe rate» и «delay». Первый параметр – проявление ошибки в положении аппарата, а второй – в скорости. Чем они меньше – тем точнее определена орбита. В данном сеансе видно, что по задержке удалось улучшить результат на 1 мкс, но по частоте интерференции в 10 раз с 0.3 Гц, до 0.03 Гц, что означает, что удалось более точно определить скорость изменения базы наземно-

космического интерферометра (6 мм/с вместо 5 см/с). Соответственно, отношение сигнал/шум интерференционной картины увеличилось в 2 раза.

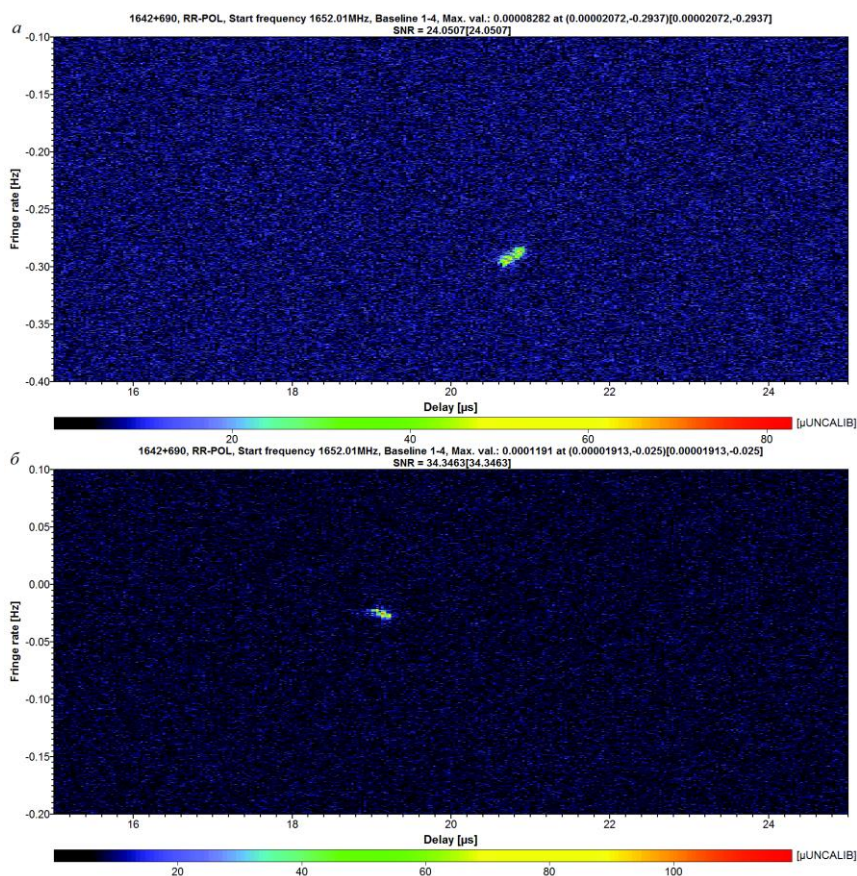


Рисунок 1.1 – Интерферометрический отклик на плоскости fringe rate/delay (частота интерференции/задержка): а) исходные данные; б) уточненные данные

Тем не менее, в ряде сеансов наблюдений не удалось достигнуть улучшения, и показано, что отсутствие значимого отношения сигнал/шум может быть следствием не только плохо определенной орбиты, но и, вероятно, инструментальных факторов.

Различия в координатах орбит ИПМ и полученных с помощью фильтра Калмана составляли несколько километров. Таким образом, раздел 2 настоящей диссертационной работы был посвящен исследованию возможных причин такого поведения.

Раздел 2 Уточнение орбиты КА «Спектр-Р» в проекте «Радиоастрон» и необходимые для этого условия при использовании фильтра Калмана

Результаты раздела 2 основаны на статье [2] из списка публикаций автора, указанных в апробации. В разделе 2 рассматриваются вопросы применения фильтра Калмана при использовании только одного комплекта радиодальномерных и доплеровских измерений с наземных станций, и проводится анализ условий, при выполнении которых будет наблюдаться улучшение орбиты. Показано, что наличие трех наземных станций, проводящих измерения одновременно, решает поставленную задачу в полном объеме даже при очень плохом начальном приближении. Для этого было проведено моделирование со следующей постановкой задачи.

Орбита ИПМ Орб 2 (орбита, которая показала хорошие результаты в результате корреляционной обработки) была использована в качестве модели истинного положения аппарата.

Начальная точка для инициализации фильтра Калмана была взята на основе орбиты ИПМ Орб 1 (плохая орбита, которая показала результат на порядок хуже орбиты Орб 2), моделирующей неточное знание истинной орбиты.

Дополнительно к станциям «Медвежьи Озера» и «Уссурийск» была добавлена станция «Пушино», моделирующая 3-ю наземную станцию.

На основе орбиты ИПМ Орб 2 и координат трех наземных станций были смоделированы одновременные измерения дальности. Для моделирования необходимо было задать ошибку измерений расстояния. Она была положена равной 1 см. Модельные значения дальности охватывали один 30 минутный этап с 14:00:00 по 14:30:00 (UTC). Для простоты численный расчет проводился только для дальномерных измерений.

Цель моделирования: получить из орбиты Орб1 орбиту Орб2.

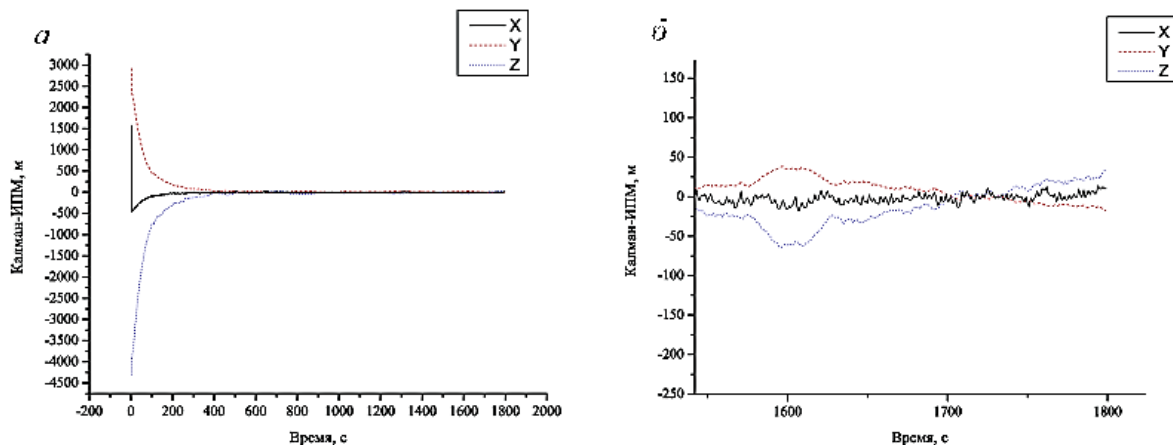


Рисунок 2.1 – а) Разность координат X,Y,Z численного моделирования уточнения орбиты аппарата «Спектр-Р» и орбиты ИПМ на основе трех независимых измерений дальности на всем временном интервале моделирования; б) Разность координат X,Y,Z численного моделирования уточнения орбиты аппарата «Спектр-Р» и орбиты ИПМ на основе трех независимых измерений дальности на окончании временного интервала моделирования

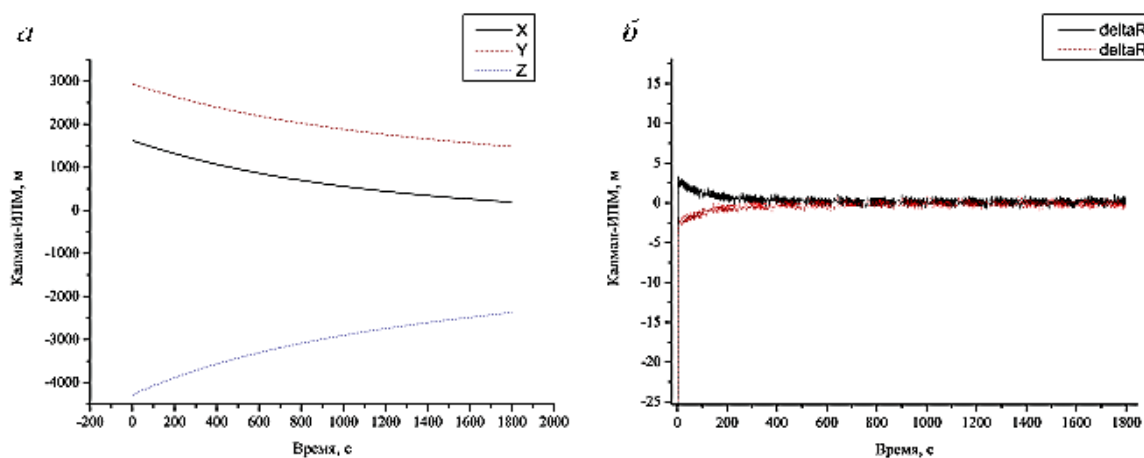


Рисунок 2.2 - а) Разность координат X,Y,Z численного моделирования уточнения орбиты аппарата «Спектр-Р» и координат орбиты ИПМ на основе двух независимых измерений дальности на всем временном интервале моделирования; б) Ошибка дальности до КА «Спектр-Р» с двух наземных станций: Медвежьи Озера и Уссурийск (deltaR1, deltaR2), на всем временном интервале численного моделирования

В результате уточнения орбиты Орб1 с помощью фильтра Калмана на основе 3 измерений дальности была получена сходимость координат

орбиты Орб1 к орбите Орб2 с погрешностью ≈ 50 метров (рисунок 2.1), а сходимость по модулю расстояния до сантиметров.

При использовании только 2 комплектов измерений присутствует сходимость орбиты Орб1 к орбите Орб2 по модулю расстояния, но отсутствует по координатам (рисунок 2.2).

Если используется хорошее начальное приближение Орб2, то и при использовании одного комплекта наблюдений можно достичь неплохих результатов по сходимости координат, с точностью до нескольких метров.

На основе полученных результатов выделен список требований, выполнение которых обеспечит более точное знание как орбиты КА «Спектр-Р», так и орбиты аппаратов, рабочая орбита которых имеет сходство с орбитой КА «Спектр-Р».

Раздел 3 Моделирование высокоточных орбит для низкоорбитальных КА

Результаты раздела 3 основаны на статье [4] из списка публикаций автора, указанных в апробации. В разделе 3 рассмотрено моделирование движения двух низкоорбитальных информационно связанных космических аппаратов для измерения параметров гравитационного поля Земли. В модели движения аппаратов учтены факторы, влияющие на движение спутников, находящихся в непосредственной близости к Земле, основными из которых являются несферичность геопотенциала и сопротивление атмосферы, действие приливов, а также влияние Луны, Солнца и планет Солнечной системы. Кроме этого в модели учтены эффекты вхождения КА в тень Земли и его ориентации относительно Солнца для точного описания воздействия излучения на корпус КА.

Расчет несферичности геопотенциала осуществлялся с помощью модели EGM96 и алгоритма Беликова и Тайбаторова. Для расчета несферичности необходимо осуществлять переход из небесной в земную

систему координат. Этот переход был выполнен в соответствии со стандартами IERS2010 (Международная служба вращения Земли).

Учет твердых приливов был также проведен согласно стандартам IERS 2010 по 2-шаговой процедуре: сначала был произведен учет частотно-независимых вкладов в коэффициенты Стокса, а затем был учтен частотно зависимый вклад в коэффициенты Стокса, полученным на шаге 1.

Океанические приливы были также учтены в соответствии со стандартами IERS2010 в соответствии с моделью океанических приливов FES2004.

Были учтены твердые и океанические полярные приливы вследствие отклонения мгновенного полюса Земли от среднего. Вычисления проведены в соответствии со стандартами IERS2010 и моделью Desai.

Учет воздействия атмосферы был произведен в соответствии со стандартной международной моделью атмосферы для космических исследований NRLNSISE-00 с использованием данных о солнечной и геомагнитной активности.

Для учета воздействия солнечного излучения в качестве модели КА был выбран прямоугольный параллелепипед с размерами сторон $3\text{ м} \times 1.5\text{ м} \times 1.5\text{ м}$ (длина $\times$ ширина $\times$ высота), часть сторон которого покрыто алюминиевой фольгой, а часть – солнечными батареями с соответствующими коэффициентами отражения.

На основе описанной модели были написаны две программы: «SpaceGrav», моделирующая высокоточные орбиты и планирующая эксперименты по определению геодезических параметров Земли, а также «PlanGrav», обеспечивающая планирование измерений геодезических параметров Земли в части спутниковой градиентометрии и межспутниковых измерений.

В результате моделирования с помощью программы «SpaceGrav» проведен поиск оптимальной взаимной конфигурации аппаратов в

обеспечение полноты выполнения научных задач и возможности технической реализации проекта. В частности, построены зависимости необходимого межспутникового расстояния и точности измерения от величины разрешаемой гармоники (рисунок 3.1):

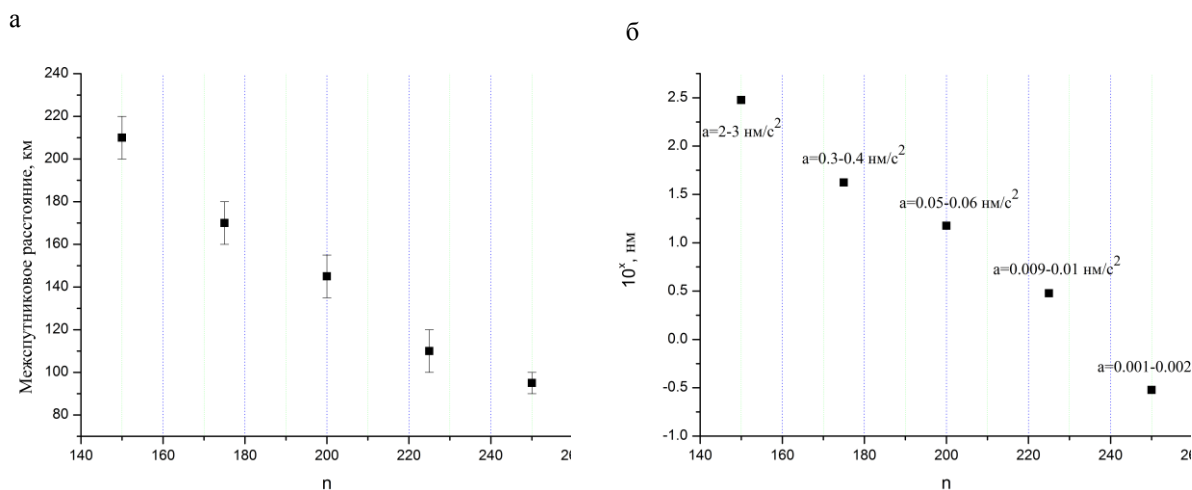
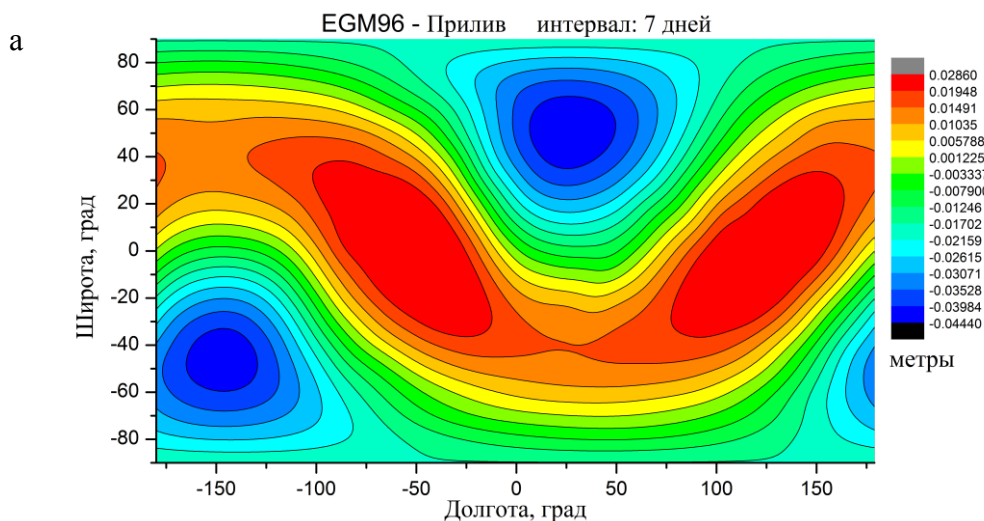


Рисунок 3.1 – а) Зависимость межспутникового расстояния от разрешаемой гармоники n ; б) Зависимость требуемой точности измерения межспутникового расстояния от исследуемой гармоники (справа)

Определена оптимальная рабочая высота орбита группировки КА, требования к наклонению и времени проведения измерений.

С помощью программы «PlanGrav» произведена пробная оценка коэффициентов Стокса на основе данных, моделирующих действие прилива (твёрдого, океанического и полярного), с представлением результатов оценки в шкале высот геоида (рисунок 3.2).



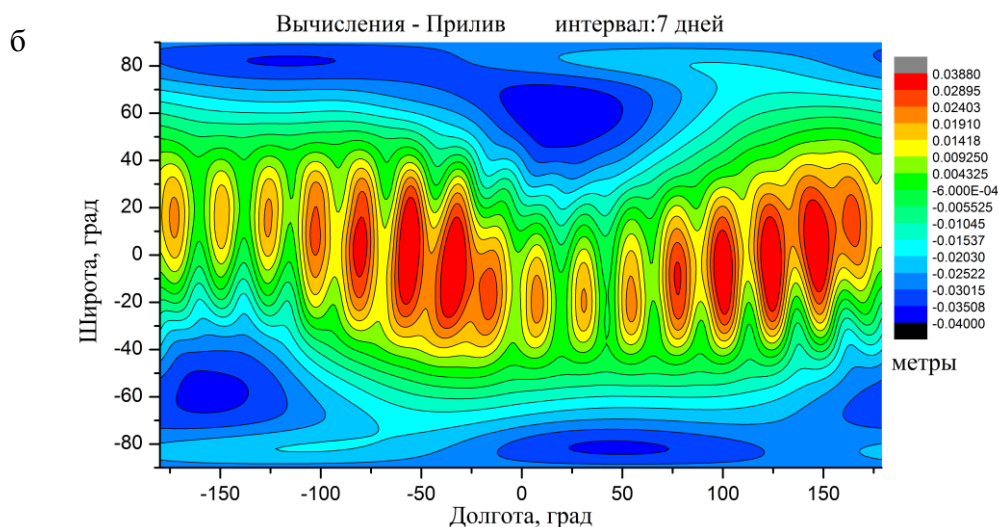


Рисунок 3.2 – Результаты уточнения коэффициентов Стокса с учетом действия приливов. а) Результат действия приливов на структуру геопотенциала EGM96 на интервале 7 дней; б) Разность уточненной модели, полученной в результате вычислений и приливного воздействия на интервале 7 дней

Кроме этого рассмотрены аспекты проведения градиентометрических измерений с низкой околоземной орбиты. Проведено моделирование работы градиентометра типа «GOCE» и показано, что КА с градиентометром на борту целесообразнее использовать для уточнения низких гармоник, в отличие от системы «спутник-спутник», нацеленной на высокие гармоники.

Сделан также вывод об оптимальной рабочей высоте КА с градиентометром на борту.

Раздел 4 Уточнение орбиты низкоорбитального КА по данным глобальных навигационных спутниковых систем

В разделе 4 излагаются основы уточнения орбиты низкоорбитального КА по данным глобальных навигационных спутниковых систем и результаты работы фильтра Калмана по уточнению орбиты на основе модели движения, применяемой в разделе 3, а также измерений ГНСС.

Основываясь на опыте проекта «GRACE», в котором межспутниковые измерения проводились с точностью до 1 мкм, можно заключить, что точности абсолютного местоположения КА «GRACE» в 1 см с помощью системы GPS было достаточно для выполнения целевой задачи проекта. Поэтому на данном этапе работы необходимо было отработать принципы уточнения местоположения КА на низкой околоземной орбите с помощью ГНСС. В качестве низкоорбитального КА был рассмотрен КА «GRACE», а в качестве КА ГНСС были использованы КА системы GPS.

В уточнении орбиты с помощью фильтра Калмана были использованы наиболее точные измерения GPS – фазовые измерения, а вместе с кодовыми измерениями решалась задача определения фазовых неоднозначностей.

Эфемериды КА GPS и их измерения были взяты из открытых источников (сайты IGS и ESA), в то время как эфемериды КА «GRACE» оказалось невозможным найти в свободном доступе. Тем не менее, на основе данных измерений и эфемерид КА GPS удалось получить грубое приближение для координат и компонент скоростей КА «GRACE».

В результате проделанной работы была получена уточненная орбита КА «GRACE В». Расчет был выполнен для измерений, проводившихся 1 января 2005 года в период с 00:00:00 по 00:14:30 времени GPS. Результаты представлены в виде зависимостей разности между вычисленными расстояниями «КА «GRACE В» - спутник GPS» и исходными псевдодальностями (невязками) от времени. На рисунке 4.1 можно увидеть, как ведут себя невязки без включения алгоритма фильтрации Калмана.

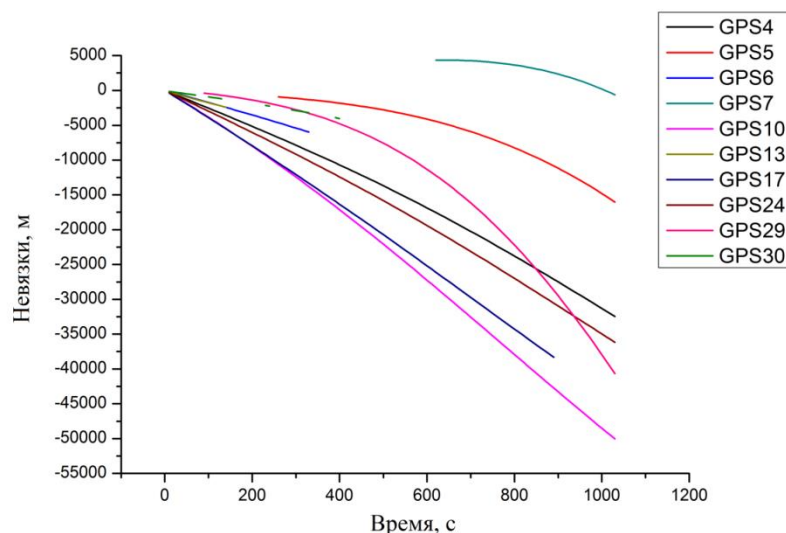


Рисунок 4.1 – Зависимость невязок различных спутников GPS от времени в случае отсутствия фильтра Калмана

Такое расхождение является, в том числе, следствием плохо определенной начальной точки интегрирования орбиты КА «GRACE В», ошибки по координатам которой составили ≈ 50 м, а по скорости ≈ 10 м/с.

На рисунке 4.2 показана та же зависимость, но в результате работы фильтра Калмана.

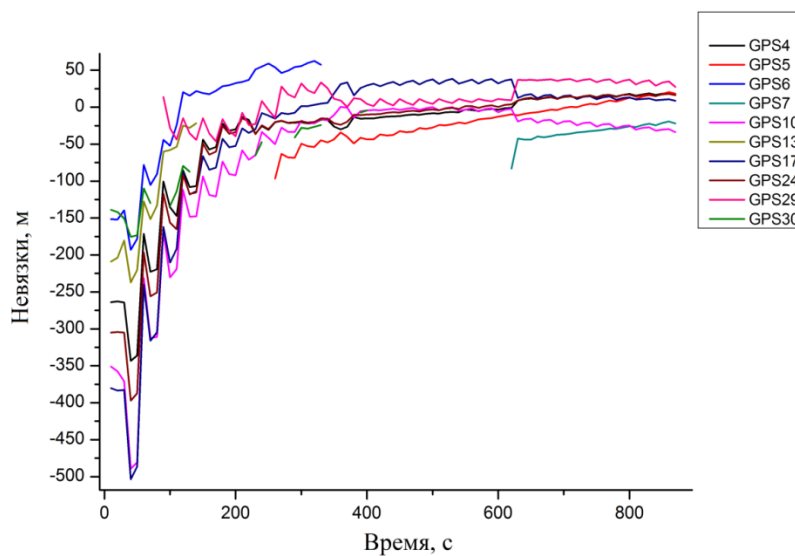


Рисунок 4.2 – Зависимость невязок различных спутников GPS от времени в результате работы фильтра Калмана

Из сравнения двух графиков видно, что алгоритм действительно работает, он позволил сократить начальные (300-400 метров) невязки, до 30-40 метров. Однако такой результат нельзя считать удовлетворительным. Требуемая точность уточнения орбиты КА до 1 см не была достигнута.

Несмотря на неудовлетворительный результат, была отработана схема уточнения орбиты низкоорбитального КА по данным ГНСС и показана принципиальная возможность такого уточнения.

Раздел 5 Моделирование высокоточных орбит для высокоорбитальных КА

Результаты раздела 5 основаны на статье [3] из списка публикаций автора, указанных в апробации. В разделе 5 рассмотрено моделирование движения КА на высокой орбите в интересах задач фундаментальной гравитации. Моделирование проведено на примере проекта «TianQin» (рисунок 5.1) - российско-китайского проекта, нацеленного на регистрацию гравитационных волн от известного источника [12].

Модель движения КА используемая в данном моделировании была выбрана такой же, как и в случае моделирования движения КА на низкой околоземной орбите, вследствие высоких точностных требований, предъявляемых к проекту (1 пм – по межспутниковому расстоянию и 10^{-15} м/с² по компенсации негравитационных ускорений).

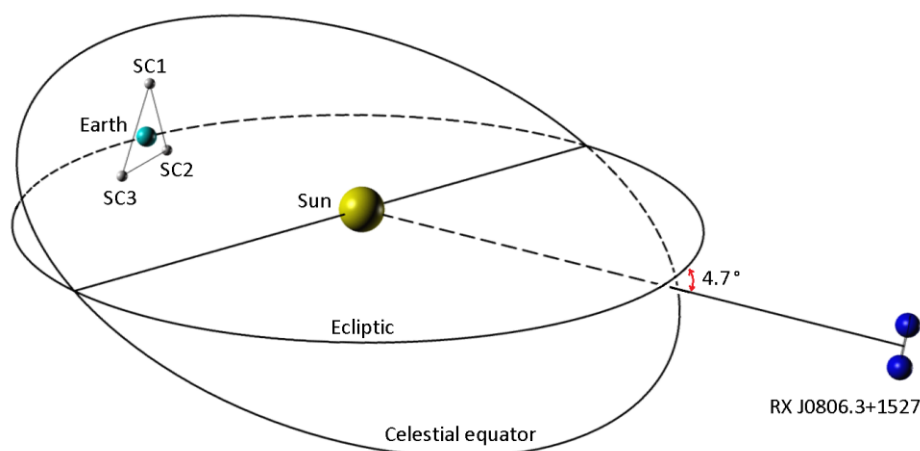


Рисунок 5.1 –Схема космического ГВ эксперимента с двойной звездой J0806 в качестве источника ГВ. Космические аппараты обозначены как SC1, SC2 и SC3.

В результате моделирования было получено, что на предполагаемой высоте проведения эксперимента (100 000 км) необходим учет атмосферы, так как величина ускорения, вызываемая ее воздействием, на порядок выше требований, предъявляемых к проведению эксперимента и составляет $\approx 10^{-14}$ м/с².

Воздействия других факторов, как гравитационного, так и негравитационного характера приводят к тому, что расстояние между КА в группировке будет меняться с максимальной скоростью $\approx 0,23$ м/с, что накладывает серьезные требования к технологической реализации аппаратуры, способной поддерживать при всем этом точность измерения межспутникового расстояния на уровне 1 пм.

Был также исследован вопрос точности наведения луча лазера между КА. Получено, что точность наведения должна быть на уровне $\approx 7 \times 10^{-5}$ ", что представляет серьезный технологический вызов для разработки соответствующей аппаратуры.

Отмечено, что на данный момент в нашей стране отсутствуют комплексы, способные поддерживать высокоточные орбиты КА, находящихся на высоких орбитах. Как вариант для уточнения орбиты рассматривается возможность использования слабого ГНСС-сигнала, РСДБ и, что наиболее вероятно, развитие системы дальней космической связи, состоящей из наземных российских и китайских станций, распределенных по широте и долготе таким образом, что в любой момент времени группировка КА ГВ эксперимента будет видна как минимум с 3-х станций.

Заключение

В настоящей работе проведено моделирование и создан программный комплекс, описывающий движение КА на разных типах орбит: низкой околоземной круговой, высокоапогейной эллиптической, высокой околоземной круговой, в интересах астрометрических и

гравиметрических задач, требующих высокой точности определения орбиты КА. Модельный расчет орбит был выполнен на примере как функционирующих («Радиоастрон», «GRACE»), так и готовящихся к запуску («GRACE Follow-On», «TianQin») проектов. Показано, что в зависимости от целевой задачи проекта требования к рабочим орбитам КА различаются существенно, эти требования определены, и предложен метод их учета.

В рамках моделирования движения КА на низкой околоземной орбите в интересах решения фундаментальных задач гравиметрии были получены следующие результаты.

1. Для увеличения чувствительности системы «спутник-спутник» необходимо варьировать взаимное расстояние между КА в зависимости от желаемого максимального порядка разрешаемой гармоники; при увеличении порядка расстояние между КА необходимо уменьшать; для разрешения $n=250$ гармоники потребуется взаимное расстояние ≈ 90 км.
2. Чем выше порядок (n) разрешаемой гармоники, тем строже требования к измерительной аппаратуре межспутникового расстояния: для $n=150$ за время накопления сигнала 10 с необходимо выявлять эффекты порядка микрона, для $n=200$ – уже порядка нанометра, поэтому разрешение гармоник выше $n=250$ с помощью орбитальной космической группировки КА не представляется возможным с существующим уровнем развития отечественных технологий.
3. Для системы «спутник-спутник» работа КА на высоте ≈ 400 км более предпочтительна, чем на высотах 300 и 500 км, поскольку работа на высотах ниже 400 км затруднена из-за сильного тормозного воздействия со стороны атмосферы, а при работе на высотах более 400 км регистрация тонкой структуры гравитационного поля

становится все более проблематичной ввиду потери чувствительности к амплитудам гармоник гравитационного потенциала.

4. Первые данные моделирования определения поправок к коэффициентам Стокса показали, что поправки тем точнее, чем меньше взаимное расстояние между двумя КА.
5. Явной зависимости ошибок определения коэффициентов Стокса от величины наклона орбиты аппаратов не обнаружено; не выявлено так же и других улучшений в части чувствительности и необходимого времени проведения измерений при использовании орбит, отличных полярной.
6. В системе «спутник-спутник» больший порядок гармоник определяется с большей точностью, в то время как в режиме градиентометра лучше всего уточняются гармоники до $n \approx 100$.
7. Оптимальным временем проведения непрерывных измерений для достижения разрешения 250 гармоник является период 1 месяц.
8. Использование КА на орбитах с наклонами отличными от полярной целесообразно в случае совместной их работы с основной группировкой, расположенной на полярной орбите; улучшение достигается за счет увеличения одновременных измерений в один и тот же момент времени и за счет более равномерного заполнения сферы наблюдений.
9. КА с градиентометром на борту может проводить измерения на одной и той же орбите, что и система «спутник-спутник», расширяя тем самым состав измерений в выделенной области пространства; однако более предпочтительной для градиентометрических измерений является более низкая орбита (≤ 300 км).
10. Необходимая точность локализации КА на орбите для решения гравиметрических задач должна составлять ≈ 1 см и может быть

достигнута только благодаря использованию сигналов ГНСС. Первые результаты по уточнению орбиты с помощью измерений ГНСС показали принципиальную возможность такого уточнения, однако величина уточнения будет зависеть от качества эфемерид КА.

Моделирование движения КА на высокой эллиптической орбите в рамках решения фундаментальных астрометрических задач на примере проекта «Радиоастрон» показало следующие результаты.

1. Улучшение результатов при корреляции впервые было обнаружено при наблюдениях в L-диапазоне, который накладывает не слишком строгие ограничения по скорости и местоположению аппарата на орбите. Обработка данных была проведена и в С-диапазоне с более существенными ограничениями на точность определения координат и компонент скорости КА. Показано, что алгоритм фильтрации Калмана дает положительный результат и в этом диапазоне. Практически во всех рассмотренных случаях (сеансах) улучшен показатель отношения сигнал/шум, с одновременным уменьшением задержки и остаточной частоты интерференции, что является уверенным подтверждением успешной работы алгоритма по уточнению орбиты КА.
2. Измерения дальности и радиальной скорости должны производиться минимум с трех наземных станций, для которых КА находится в зоне видимости. Измерения могут быть разных типов (радиодальномерные, лазерные, а также их комбинация). Необходимы отдельно дальномерные измерения для уточнения 3 координат и доплеровские – для уточнения 3 компонент скоростей.
3. Необходимо рассмотреть возможность одновременных измерений со станций «Медвежьи Озера» и «Уссурийск». Нужно по возможности их совмещать, так как раздельное использование неэкономично.

Если недоступны одновременные измерения, то будут полезны измерения с задержкой в несколько секунд между станциями

4. Период радиодальномерных измерений следует по возможности увеличить. В настоящий момент сеансы измерений занимают приблизительно 900 с, что может быть недостаточно для полноценного уточнения орбиты КА с помощью метода фильтрации типа Калмана. Для высокоапогейных КА это не представляет трудностей, поскольку они доступны для радиосвязи в течение достаточно большого промежутка времени.
5. Для уточнения орбиты на основе одних только радиодальномерных данных нужна дополнительная независимая информация о ее наклонении и долготе восходящего узла; для уточнения орбиты на основе двух комплектов радиодальномерных данных нужна дополнительная независимая информация либо о наклонении, либо о долготе восходящего узла. Источником такой дополнительной информации могут быть астрометрические наблюдения аппарата. Точность измерений в одну секунду дуги вместе с радиодальномерными данными будет достаточной для локализации аппарата в пространстве в пределах нескольких сот метров. Такая точность по местоположению на орбите вполне достаточна, например, для успешной корреляционной обработки данных наблюдений КА в радиодиапазоне.

В рамках моделирования движения КА на высокой круговой околоземной орбите в интересах решения задач фундаментальной гравитации были получены следующие результаты.

1. Измерительная система КА в составе орбитальной группировки по детектированию гравитационных волн должна быть способна

проводить измерения межспутникового расстояния с точностью ≈ 1 пм на фоне изменения длины базы $\approx 0,2$ м/с.

2. Для выявления эффектов прохождения гравитационной волны необходим, в том числе, учет атмосферы Земли, оказывающей ускорение $\approx 10^{-14}$ м/с² при требуемой чувствительности эксперимента $\approx 10^{-15}$ м/с².
3. Максимальная скорость коррекции угла при наведении луча лазера на другой КА в орбитальной группировке составляет $\approx 1,25 \times 10^{-4}$ "/с, при этом оценка сверху для точности упреждения луча $\approx 7,2 \times 10^{-5}$ ".
4. Навигация КА на планируемой высоте проведения эксперимента может быть обеспечена средствами дальней космической связи, а также использованием слабого сигнала ГНСС с применением специальной приемной аппаратуры.

Таким образом, в результате выполнения настоящей работы поставленные во введении цели достигнуты.

Список литературы

1. *G. Balmino* // Gravity field recovery from GRACE: Unique aspects of the high precision inter-satellite data and analysis methods // Space Science Reviews 108 (1-2): pp. 47-54, 2003.
2. *P. Bond* // Gravity map from GRACE // *Astronomy & Geophysics*, Volume 44, Issue 5, 1 October 2003, Pages 5.4. <https://doi.org/10.1093/astrog/44.5.5.4-a>.
3. *Zh. Kang et. al* // Precise orbit determination for the GRACE mission using only GPS data // Journal of Geodesy (2006) Vol 80, Issue 6, pp. 322-331. <https://doi.org/10.1007/s00190-006-0073-5>.
4. *R. Rummel, W. Yi, C. Stummer* // Goce gravitational gradiometry. // Geoid (2011) 85: 777-790, DOI 10.1007/s00190-011-0500-0.
5. *C. Reigber et. al.* // CHAMP Mission 5 Years in Orbit. In: Flury J., Rummel R., Reigber C., Rothacher M., Boedecker G., Schreiber U. (eds)

- Observation of the Earth System from Space. // Springer, Berlin, Heidelberg (2006), DOI 10.1007/3-540-29522-4_1
6. *N. Darbeheshti et al.* // Instrument data simulations for GRACE Follow-on: observation and noise models // *Earth System Science Data*, 9(2), pp. 833-848. <https://dx.doi.org/10.5194/essd-9-833-2017>.
 7. *F. Flechtner et al.* // *Status of the Grace Follow-on Mission* // In: Marti U. (eds) *Gravity, Geoid and Height Systems*. International Association of Geodesy Symposia, vol 141. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10837-7_15.
 8. *F. Flechtner et al.* // What Can be Expected from the GRACE-FO Laser Ranging Interferometer for Earth Science Applications? // In: Cazenave A., Champollion N., Benveniste J., Chen J. (eds) *Remote Sensing and Water Resources*. Space Sciences Series of ISSI, vol 55. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32449-4_11.
 9. *Авдеев В.Ю., Алакоз А.В., Александров Ю.А., Андреянов В.В. и др.* // Космическая миссия «Радиоастрон». Первые результаты. // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2012 том 3, №14, с. 4-21.
 10. *Кардашев Н.С., Хартов В.В., Абрамов В.В., Авдеев В.Ю. и др.* // «Радиоастрон» - телескоп размером 300000 км: основные параметры и первые результаты наблюдений. // *Астрономический журнал*, 2013, том 90, №3, с.179-222.
 11. *Кардашев Н.С., Алакоз А.В., Ковалев Ю.Ю., Попов М.В. и др.* // «Радиоастрон»: Итоги выполнения ранней научной программы исследований объектов Вселенной со сверхвысоким угловым разрешением. // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2014 том 3, №24, с 4-11.
 12. *Luo Jun, Chen Li-Sheng, Duan Hui-Zong et al* // TianQin: a space-borne gravitational wave detector. // *Class. Quantum Grav*, 33, 035010 (2016).