

ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертацию на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Запевалина Павла Романовича

на тему: «Определение орбит космических аппаратов по данным

глобальных навигационных спутниковых систем»,

по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия

Современные космические миссии требуют точного координатно-временного обеспечения. Последнее непосредственным образом связано с методами и способами по определению прецизионного положения космического аппарата (КА) в пространстве. Для этого используются как системы внешнего сканирования КА, так и всевозможные датчики для привязки космического аппарата к небесной системе координат. На основе всех этих систем уточняется орбита КА и создаются условия для использования спутниковой группировки, например, в ГНСС. Поэтому работы, направленные на увеличение точности всех систем по определению ориентации космического корабля в пространстве являются востребованными и актуальными. Диссертационное исследование Павла Романовича Запевалина как раз и направлено на решение задач по разработке новых теоретических моделей и подходов для получения точных параметров ориентации КА из наблюдений. В работе рассмотрена также возможность использования фазовых измерений, ошибка которых составляет всего несколько мм. Однако при их использовании возникают сложности, связанные с величиной псевдодальности в длинах волн (так называемая фазовая неоднозначность), а также скачки фазы. Универсального и достоверного метода, способного зафиксировать абсолютно все фазовые неоднозначности, не существует до сих пор. Поэтому, диссертационная работа П.Р. Запевалина является актуальной и в данной области, так как представляет оригинальное решение описанной задачи.

Новизна работы заключается в разработке программного комплекса, позволяющего построить высокоточную модель движения

КА на основе современных наблюдений ГНСС, показана возможность использования наблюдений ГНСС для высокоэллиптических и средних орбит КА, выполнено авторское исследование по уточнению определения центров звезд на астроснимках на основе нейронных сетей с целью точного определения ориентации КА.

Практическая значимость работы заключается в создании отечественного программного обеспечения, позволяющего работать с измерениями глобальных навигационных спутниковых систем с целью определения орбит искусственных спутников Земли для научных космических миссий, требующих высокоточное позиционирование данных спутников. Такой программный комплекс в перспективе позволит решать широкий спектр научно-прикладных задач и задач двойного назначения. Также является значимым, что алгоритмы и программное обеспечение, разработанные в диссертационной работе, непосредственно используются в настоящее время в нескольких научно-исследовательских работах по спутниковой градиентометрии и космической геодезии, проводимых ГАИШ МГУ для государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос».

Достоверность полученных результатов подтверждается предварительной апробацией разработанного программного обеспечения на синтетических модельных данных. Сравнение результатов проводилось с использованием другого, проверенного, программного обеспечения (комплексом Bernese). Также сравниваются статистические параметры обобщенного фильтра Калмана, разброс результата работы фильтра по компонентам вектора состояния и другие характеристики с результатами, полученными другими авторами.

Все представленные в диссертации результаты получены лично автором. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с научным руководителем. В автореферате указан вклад диссертанта в получение результатов, их анализ и публикацию.

Диссертация состоит из введения, четырёх Глав, заключения и одного приложения. Полный объём диссертации составляет 180 страниц,

работа содержит 53 рисунков и 5 таблиц. Список литературы содержит 178 наименований.

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, обосновываются научная новизна и практическая значимость работы, приводятся положения выносимые на защиту.

Первая Глава посвящена описанию разработанной в диссертационном исследовании модели движения космических аппаратов. В разделе 1.1 приводится модель сил, действующих на КА. В разделе 1.2 описаны используемые в работе системы шкал времени и координат. В разделе 1.3 описывается вычислительный алгоритм для возмущений из-за сил гравитационного воздействия. Потенциал Земли рассчитывается с помощью алгоритма Беликова и Тайбаторова. Для учета влияния третьих тел используется эфемериды DE403. При этом влияние твердых, океанических и полярных приливов учитывается согласно рекомендациям IERS2010. При вычислении релятивистских возмущений орбиты учитывается метрика Шварцшильда, эффект Линзе-Тиринга и прецессия де-Ситтера. В разделе 1.4 описаны негравитационные возмущения, влияющие на движение КА. Особое внимание уделяется учёту давления солнечного излучения.

Вторая Глава посвящена описанию модели наблюдений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). В начале главы, в разделе 2.1, приводится краткая информация по основным типам траекторных измерений. Одним из таких типов и являются измерения ГНСС. В разделе 2.2 представлена информация о видах систем измерений ГНСС. Подробно описаны системы GPS и ГЛОНАСС, структура кодовых и фазовых измерений, их преимущества и недостатки. В разделе 2.3 описана разработанная модель наблюдений ГНСС для кодовых и фазовых измерений. В разделах 2.4 и 2.5 приведены общие сведения о методах уточнения орбит, также приводится описание алгоритма обобщенного фильтра Калмана, который был использован при обработке ГНСС измерений в данной диссертационной работе.

Заключительный раздел 2.6 посвящен важной характеристике ГНСС - измерений – коэффициенту потери точности.

Третья Глава посвящена основным результатам диссертационной работы. В разделе 3.1 описана практическая реализация разработанной модели движения, модели наблюдений и алгоритмов уточнения орбит. В качестве такой реализации был спроектирован и создан программно-вычислительный комплекс LOIS (Low Orbit Improvement Software). Раздел 3.2 содержит результаты эксперимента по уточнению орбиты КА GRACE-A по модельным измерениям. Измерения и сопутствующие им данные моделировались в программном комплексе Vernese. Приводятся результаты моделирования: минимальная ошибка определения орбиты в 4 см по радиус-вектору была достигнута с использованием безионосферной комбинации фазовых измерений. В разделе 3.3 отражены основные результаты диссертационной работы по уточнению орбиты КА с помощью ГНСС. Средняя невязка трехмерного положения между истиной орбитой и оцененной в режиме нулевых разностей составила 72 мм. В режиме двойных разностей удалось уменьшить ошибку определения орбиты, а вместе с тем и повысить точность фиксации неоднозначностей. Итоговая средняя невязка трехмерного положения после фиксации неоднозначностей составила 23 мм. Интересные результаты получены в разделе 3.4. Показана возможность использования ГНСС для уточнения высокоэллиптических орбит. В работе был проведен анализ видимости навигационных спутников для высокоэллиптической орбиты по типу орбиты КА «Спектр-Р».

На основе результатов Главы 3 сформулировано первое и второе положения, выносимые на защиту.

Четвертая Глава посвящена уточнению определения ориентации космических аппаратов. Поскольку ориентация КА играет важную роль при проведении научных космических миссий, было выполнено исследование возможностей повышения точности определения ориентации КА с помощью нейронной сети. Идея заключается в том, чтобы использовать искусственный интеллект для высокоточного определения центра звезд на кадрах звездного датчика – прибора для измерения ориентации КА. Чем точнее определяется центр звезды, тем

точнее определяется центр кадра, и, следовательно, ориентация КА.

В разделе 4.1 описывается процесс сбора данных в виде изображений участков звездного неба. В разделе 4.2 описана архитектура разработанной нейронной сети, процесс загрузки данных, субпиксельное усовершенствование метода, аугментация данных и процесс обучения нейросети. В разделе 4.3 представлены результаты обучения нейросети и их сравнение с классическим методом. В разделе 4.4 описываются основные особенности и ограничения предложенного метода определения центра звезд, а также предлагаются дальнейшие направления для исследований в этой теме.

На основе результатов Главы 4 сформулировано третье положение, выносимое на защиту.

В Заключение приведены основные результаты работы, описаны перспективы дальнейших исследований по теме диссертационной работы и приведены организации, в которых полученные результаты могут использоваться.

Замечания по диссертационной работе

- 1) Стр. 5 и далее по тексту «...угловые координаты на небе и радиус-вектор (наклонная) КА» желательно было описать, о каких угловых координатах идет речь, так как существует большое количество видов систем угловых координат как в астрономии, так и в геодезии.
- 2) Стр. 5 В тексте «Задача состоит в том, чтобы найти приближенную оценку этих параметров с помощью теоретических моделей и практических измерений. Для этого необходимо как можно сильнее уменьшить влияние ошибок теории и наблюдений путем привлечения дополнительной информации о системе КА-наблюдатель» не понятно, почему производится приближенная оценка параметров, а не наиболее точное их определение.
- 3) Стр. 8 Относительно текста «В таких миссиях, как GRACE [23], GRAIL [24] и GRACE Follow On [25], точное знание ориентации космического аппарата играет чрезвычайно важную роль в

измерениях расстояний между двумя КА с помощью лазерного интерферометра [97], так как требуется сверхточное наведение луча на второй КА. Помимо этого, точное знание ориентации прямым образом влияет на точность определения орбит по данным ГНСС» следует сказать, что, несомненно, при выполнении описанных миссий старались определять координаты спутников с максимальной точностью. Измерения расстояний в миссиях GRACE, GRAIL выполнялись в сантиметровом радиодиапазоне, поэтому допуски в положениях космических аппаратов были 1-2 см, чтобы можно было перейти к измерениям относительной фазы радиосигналов. Это позволило измерить расстояние между КА с микронной точностью. Однако требования к ориентации для КА в миссиях GRACE, GRAIL не настолько строгие, как для GRACE Follow On, и утверждение «точное знание ориентации прямым образом влияет на точность определения орбит по данным ГНСС» не вполне корректно.

- 4) Стр. 9 В предложении «На основе местоположения объекта, на который ориентируется КА, можно вычислить ориентацию в инерциальной системе отсчета» более правильным было бы говорить не об ориентации на объект, а о привязке.
- 5) Во Введение в разделе актуальность основное внимание уделено современному состоянию исследований по определению координатных положений КА, но не совсем четко обозначена актуальность работы самого диссертанта. Также имеются повторения. Например, абзац «Задача уточнения орбиты состоит в том, чтобы найти приближенную оценку параметров орбиты с помощью теоретических моделей и практических измерений. Для этого необходимо как можно сильнее уменьшить влияние ошибок теории и наблюдений. Методы, позволяющие решить эту задачу, называются методами дифференциального уточнения орбиты. А сам алгоритм

решения такой задачи называется алгоритмом фильтрации» имеется и во Введение, и в Главе 2 на стр. 65.

- 6) Стр. 12 В предложении «7. Проведенная оценка видимости количества наблюдаемых навигационных спутников на высокоэллиптической орбите показала, что в среднем доступно 15 спутников на эпоху среди всех глобальных навигационных спутниковых систем» не понятно о какой эпохе идет речь.
- 7) Стр. 13 В предложении «Разработанный метод определения ориентации космических аппаратов с помощью собранной базы данных и методов машинного обучения, показал четырехкратное улучшение точности по средней невязке координат звезды по сравнению с традиционным (взвешенным) методом определения центра тяжести изображения» ошибка в слове «определения», вместо слова «собранной» лучше использовать «построенной», и что такое «центр тяжести изображения»?
- 8) Стр. 20 и далее по тексту. Название таблицы пишется над таблицей, а не под ней, в отличие от названия для рисунка.
- 9) На стр. 53 слишком обширное название для Рис. 2.5, описательный текст логичнее было бы поместить в основной текст диссертации со ссылкой на данный рисунок.
- 10) Стр. 62 В предложении «Поскольку передача и прием сигнала ГНСС ведутся на двух, трех частотах одновременно аппаратура передающего и принимающего спутников должна обеспечивать абсолютную синхронизацию в обработке этих сигналов» не понятно, на скольких же частотах ведутся измерения, также в тексте пропущена запятая.
- 11) На стр. 73 текст «Если спутники ГНСС расположены слишком близко друг к другу при взгляде с борта НКА...» правильнее было бы написать вместо «при взгляде с борта НКА» «при измерениях с борта НКА».

- 12) На стр. 76 «Для того чтобы объединить алгоритм фильтрации, данные наблюдений и эфемериды спутников в рамках данной работы был разработан программно-вычислительный комплекс LOIS» не согласованное предложение.
- 13) Стр. 76 В тексте «Объектно-ориентированный подход позволяет моделировать сложные процессы с помощью более понятной человеку логике», по-видимому, слово человек тут лишнее.
- 14) На стр. 87 Предложение «Таким образом, программа начинает уточнять скачок фазы, а вместе с ним и целочисленную неоднозначность, заново в совокупности. Это позволяет избежать процедуры определения величины скачка фазы отдельными алгоритмами» не согласовано, поэтому теряется его смысл.
- 15) На стр. 88 В предложении «Для получения наиболее надежной фиксации и соответственно высокоточного решения навигации обычно используют двойные разности ГНСС-измерений» пропущены две запятые и не совсем понятно сочетание «высокоточного решения навигации».
- 16) На стр. 93 В предложении «В качестве результатов определения орбит приводятся графики, построенные на основе выходных данных программного обеспечения LOIS», не понятно, где эти графики расположены.
- 17) На стр. 96 нужно было постараться разместить два рисунка 3.5 и 3.6, чтобы не было пустого пространства снизу страницы. Это касается и страниц 97 – 101, 106 – 107, 109 – 113, 118-121, 126-127, 129-130.
- 18) Стр 134 В выражении «Задача поиска центра звезды не всегда проста в решении, особенно, когда речь идет о субпиксельных координатах звезды», субпиксель – это сколько? Упоминается термин субпиксель и далее по тексту. Пиксель может быть и достаточно большой величиной, все зависит от конструкции матрицы.

- 19) Стр. 135 В предложении «На сегодня коммерческие звездные датчики способны обнаруживать звезды до $5m - 7.5m$ видимой звездной величины» смущает слово «коммерческие», то есть существуют «не коммерческие»?
- 20) Стр. 135 В предложении «Изображение звезд было обрезано путем совмещения координат звезд в звездном каталоге с их координатами на изображении. Обрезка изображения осуществлялась до размера 32×32 с центром в найденных координатах» не совсем понятное предложение, что такое образка звезд и к каким единицам относится размер 32×32 ?
- 21) Стр. 136 В предложении «Все это позволило создать набор данных, в котором ошибки в координатах звезд практически исключены» нужно уточнить «на данный момент времени», так как собственные движения звезд остаются нерешенной проблемой, в том числе и в звёздных каталогах миссии GAIA.
- 22). Стр. 141 В тексте «После обучения ИНС в течение 57 эпох...» не совсем понятно, что в данном случае подразумевается под словом «эпоха».
- 23) Стр. 143 В предложении «Помимо этого, разумным представляется провести анализ полученных результатов в зависимости от характеристик кадров звезд» более логичным было бы написать «изображений звезд» или «снимков звезд».
- 24) В Заключение говорится, что результаты работы используются в ГАИШ МГУ и государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос», но желательно было бы упомянуть и другие научные организации, в которых полученные в диссертационном исследовании данные могли бы найти свое применение.
- 25) К сожалению, Пункт «Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и одного приложения.

Полный объём диссертации составляет 180 страниц с 53 рисунками и 5 таблицами. Список литературы содержит 178 наименований» в диссертации имеется, а в автореферате не обнаружил.

Помимо замечаний 1-25 встречаются опечатки и другие технические ошибки. Например:

1. Стр. 5 В тексте «В последнее время популярностью пользуются ГНСС-приемники, проводящие измерения сразу на трех частотах» ошибка в слове приемники.
2. Стр.8 В предложении «Определение ориентации КА с высокой точностью – еще одна необходимость для современных научных космических миссий [26] наряду с определением положения и скорости КА» имеется смысловое повторение, так как «ориентация» и «положение» имеют одинаковый смысл.
3. Стр. 11 В предложении «Исследовать существующие и разработать новые алгоритмы определения и фиксации целочисленных неоднозначностей фазовых измерений глобальных навигационных спутниковых систем; реализовать данные алгоритмы» вместо «;» лучше было бы поставить просто запятую.
4. Стр. 11 В предложении «Исследовать существующие и разработать новые алгоритмы определения ориентации космических аппаратов в целях улучшения точности орбиты и качества научных результатов космических миссий; реализовать данные алгоритмы» вместо «;» также лучше было бы поставить просто запятую.
5. Стр. 14 В тексте «Так например, приведены статистические параметры обобщенного фильтра Калмана...» после «Так» нет запятой.
6. Стр. 21 В предложении «Это необходимо, для вычисления производной матрицы θ , которая участвует в преобразовании вектора скорости КА» лишняя запятая.

7. На стр. 84 Предложение «Матрица ковариаций ошибок измерений задается аналогично диагональными элементами" лучше было бы написать как «Аналогично ковариационная матрица ошибок измерений задается диагональными элементами».
8. На стр. 84 В предложении «Расчет матрицы шума состояния завязан на матрице перехода...» вместо «завязан на» лучше было бы написать «связан с».
9. На стр. 86 присутствует большое пустое место внизу страницы.
10. На стр. 88 В предложении «...видимость одного спутника составляет примерно 10 мин, вследствие чего приходится заново искать и фиксировать целочисленные неоднозначности на столь коротких дугах видимости» более логично было бы написать «на столь коротких временных интервалах».
11. На стр. 89 в выражении «... но на практике, точность кодовых измерений для предварительной обработки гораздо меньше» запятая лишняя.
12. Стр. 90 В предложении «Пользователь задет следующие входные параметры для данного...» написано неправильно слово «задает».
13. Стр. 91 В выражении «Классификатор обучался специальной на базе данных» пропущено слово.
14. Стр. 92 «Для определения наборов, не содержащих правильной неоднозначности был реализован» отсутствует запятая.
15. На стр. 105 Предложение «Для этого, помимо самих наблюдений в программу необходимо загружать файл навигационного сообщения, в котором приведено соответствие спутников и частотных каналов» не в полной мере понятно.
16. На стр. 122 В предложении «В заключении результатов приведен график на рис. 3.30, показывающий результат работы разработанного метода фиксации целочисленных неоднозначностей» не понятно, что такое «заклучение результатов».

17. Стр. 135 Предложение «Он состоит 50000 изображений ярких звезд» неправильное, наверно нужно написать «содержит».
18. Стр. 139 В предложении «Данные были разделены на пакеты (батчи) по 128 кадров в каждой», перепутаны женский и мужской рода

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о Совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Запевалин Павел Романович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент
профессор кафедры астрономии и космической геодезии Института физики
Федерального государственного автономного учреждения высшего
образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»
директор Астрономической обсерватории имени В. П. Энгельгардта
Института физики Федерального государственного автономного учреждения
высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

главный научный сотрудник Научно-исследовательского центра
превосходства киберфизических систем, IoT и IoE Института физики
Федерального государственного автономного учреждения высшего
образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

НЕФЕДЬЕВ Юрий Анатольевич

подпись

28.11.2023

Контактные данные:

тел.: +7 (843) 221 34 64 , e-mail: yuriy.nefedev@kpfu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.03.01 астрометрия и небесная механика

Адрес места работы:

420008, Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный
университет» (ФГАОУ ВО КФУ), Институт физики, Кафедра астрономии и
космической геодезии г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18

Тел.: +7 (843) 292-77-97; e-mail: phys.dep@kpfu.ru

Подпись сотрудника ФГАОУ ВО КФУ Ю. А. Нефедьева удостоверяю: