

**ОТЗЫВ официального оппонента  
на диссертацию на соискание учёной 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**

Диссертация Запевалина Павла Романовича посвящена разработке и апробации алгоритмов определения орбит космических аппаратов по данным глобальных навигационных спутников систем.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Во **введении** даётся общий обзор исследований по рассматриваемой проблеме, обосновывается актуальность, научная новизна и практическая значимость. Формулируются цели работы и выносимые на защиту положения.

В **первой главе** рассматривается описание разработанной модели движения космических аппаратов. Модель движения космического аппарата (КА) позволяет вычислять координаты и компоненты его скорости на любой заданный момент времени.

**Вторая глава** посвящена описанию модели наблюдений Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). В начале главы приводится краткая информация по основным типам траекторных измерений. В **разделе 2.3** описана разработанная модель наблюдений ГНСС для кодовых и фазовых измерений. В разделе 2.5 приводится описание алгоритма обобщённого фильтра Калмана, который был использован при обработке ГНСС измерений в диссертационной работе. **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. В главе также приводятся

невязки компонент вектора состояния спутника GRACE-A (рассмотренного в качестве прототипа), демонстрация алгоритма сглаживания кодовых измерений, различные статистические характеристики эксперимента, возможности использования дифференциального режима наблюдений и спутников группировки ГЛОНАСС. **Раздел 3.4** посвящён возможностям использования спутниковых навигационных систем для уточнения других типов орбит. В данной работе был проведён анализ видимости НС для высокоэллиптической орбиты по типу орбиты КА «Спектр-Р».

**Четвертая глава** диссертационной работы посвящена уточнению определения ориентации космических аппаратов. Поскольку ориентация КА играет важную роль в определении орбиты КА и результатах научных космических миссий, было проведено исследование возможностей улучшения алгоритмов её определения с помощью нейронной сети.

Тема диссертации безусловно **актуальна** – высокоточное определение орбит искусственных спутников Земли является важной практической задачей, необходимой для решения целого ряда научных и народно-хозяйственных прикладных задач. Особенно ценными данные результаты являются в рамках научных задач гравиметрии и астрометрии, а также безусловно могут найти применение при создании КА дистанционного зондирования Земли сверхвысокого разрешения, требующих высокую априорную точность знания параметров орбитального движения для обеспечения оперативной геопривязки получаемых изображений.

Среди **новых** результатов автора следует отметить:

- 1) исследование существующих и разработка новых алгоритмов определения и фиксации целочисленных неоднозначностей фазовых измерений глобальных навигационных спутниковых систем. Реализация данных алгоритмов.

- 2) Разработка, развитие и унификация программного комплекса, используемого для реализации алгоритмов определения орбит космических аппаратов по данным измерений ГНСС.

Результаты по различным аспектам работы были доложены на девяти научных конференциях, в том числе международных.

П. Р. Запевалин внёс основной вклад в получение выносимых на защиту результатов – автором опубликованы три научные публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК. Во всех случаях вклад диссертанта чётко обозначен.

В тоже время к работе есть ряд вопросов и замечаний:

- 1) в качестве способа подтверждения достоверности полученных результатов автор работы приводит их сравнение с результатами работы другого, проверенного программного обеспечения «Bernese». Таким образом, возникает вопрос о целесообразности разработки программного комплекса автора (LOIS), если существует уже проверенный и апробированный;
- 2) в тексте диссертационной работы указано, что для численного решения дифференциальных уравнений использован метод Рунге-Кутты 4-го порядка с постоянным шагом интегрирования. Обоснование применимости данного метода не приводится. В то время как существующие и применяемые на практике программные комплексы определения параметров движения КА используют методы более высокого порядка, такие как: конечноразностный многошаговый метод Адамса, метод Дорманда-Принца 8-го порядка и др. с автоматическим выбором шага интегрирования для обеспечения высокой точности вычислений (порядка  $10^{-15}$ ). Возможно полученное небольшое расхождение результатов работы алгоритмов связано с накапливающейся вычислительной ошибкой;
- 3) при обработке измерений ГНСС-приёмников, как правило, большое внимание уделяется селекции аномальных измерений, которые могут существенным образом повлиять на результат решения. В работе этот вопрос не рассматривается;

- 4) метод центра тяжести звезды, который был взят из открытого исходного кода для получения оценки точности, является довольно упрощённым вариантом. Следовало бы провести сравнение результатов с более распространёнными и апробированными программными пакетами, такими как «PSF Photometry»;
- 5) одной из важных характеристик звёздных датчиков является частота получения данных об ориентации. Современные приборы обеспечивают формирование измерений с частотой 10 Гц при субсекундной среднеквадратической ошибке определения ориентации (к примеру новый прибор БОКЗ-МФ от ИКИ РАН). В работе не представлен такой важный параметр как увеличение или уменьшение количества вычислительных операций разработанного метода по отношению к классическому.

Вместе с тем, указанные замечания ни в коей мере не умаляют значимости результатов диссертационной работы и являются рекомендациями к проведению дальнейших исследований. 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, определённым пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

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

Официальный оппонент:

кандидат технических наук,  
начальник сектора отдела динамики полёта космических аппаратов  
АО «НПО Лавочкина»,  
старший научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,  
доцент кафедры №604 «Системный анализ и управление»  
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт».

РОЗИН Пётр Евгеньевич

22 ноября 2023 г.

Контактные данные:

тел.: , e-mail:

Специальность, по которой официальным оппонентом

защищена диссертация:

05.07.09 – динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

Адрес места работы:

141402, Московская область, г. Химки, Ленинградская ул., д. 24,

АО «НПО Лавочкина»

Тел.: +7(495) 286-60-00; e-mail: npol@laspace.ru

Подпись сотрудника АО «НПО Лавочкина» П.Е. Розина удостоверяю:

Заместитель генерального директора по персоналу  
и общим вопросам

И. В. Шолохова

22.11.2023