

Отзыв научного консультанта

о диссертации Иванова Данила Сергеевича

«Определение углового и относительного поступательного движения малых космических аппаратов», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин

Задачи определения движения космических аппаратов решались в стенах ИПМ им. М.В. Келдыша РАН со времени начала космической эры и полётов первых спутников и продолжают решаться в настоящее время. Большая часть работ в Институте по этой теме относится к определению орбитального движения центра масс, а также к определению углового движения космических аппаратов с пассивными системами ориентации. В настоящее время, с развитием малых космических аппаратов с активной системой управления угловым движением, а также с появлением нового типа космических миссий на основе группового полёта стали актуальными задачи определения углового и относительного поступательного движения с использованием бортовых датчиков в реальном времени с учётом ограничений по вычислительной сложности алгоритмов. Работа соискателя, таким образом, является актуальной и новой, и в то же время лежит в русле одного из традиционных научных направлений Института, в стенах которого Д.С. Иванов работает с 2011 года. Кандидатская диссертация была защищена соискателем в 2013 году на тему «Определение углового движения микроспутника на лабораторном стенде и в орбитальном полете». Дальнейшая работа Д.С. Иванова была посвящена развитию этой области науки, что привело к появлению настоящей диссертации, где представлено как развитие теоретических методов определения движения, так и результаты решенных практических задач в рамках выполненных контрактов с ведущими частными и государственными отечественными организациями аэрокосмической промышленности: АО ИСС им. М.Ф. Решетнёва, АО РКС, ГК Геоскан, ООО Спутникс и другими. Разработанные в диссертации алгоритмы определения углового движения были реализованы на борту многих малых космических аппаратов: ТаблетСат-Аврора, Чибис-М, СириусСат-1, ТНС-0 №2, кубсаты компаний Спутникс и Геоскан. Теоретические аспекты возникающих задач определения движения и исследование характеристик алгоритмов проводилось в рамках государственного задания, соглашений с Минобрнаукой, соглашений с Отделением

Московского центра фундаментальной и прикладной математики в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, грантов РФФИ, РНФ, стипендий Совета Президента по грантам.

Диссертационная работа состоит из шести глав и имеет структуру, повторяющую основные этапы разработки алгоритмов определения движения. Сначала приводится теоретическое описание используемых методов и предлагаемых алгоритмов, далее метод применяется для решения конкретных задач и проводится исследование характеристик разработанных алгоритмов, и, наконец, проводятся лабораторные и лётные испытания бортовых алгоритмов определения движения. Первая глава посвящена теоретическим аспектам решения задач реконструкции движения и определения движения в реальном времени. Разработан метод оценки точности определения вектора состояния с помощью ковариационного анализа для случая квазистационарного движения, что позволяет проводить исследование влияния неучтённых в бортовых моделях факторов на характеристики алгоритмов.

Во второй главе с помощью разработанного метода оценки точности проводится исследование алгоритмов определения углового движения с использованием различных наборов типовых бортовых датчиков малых космических аппаратов. Уделяется внимание особенностям конкретных датчиков, которые учтены при построении алгоритмов. Так, при использовании измерений магнитометра, который помещается внутри тела малого космического аппарата, в вектор состояния углового движения наряду с кватернионом ориентации и вектором угловой скорости добавляется вектор смещения нуля измерений магнитометра, вызванный влиянием бортовых магнитных полей. Получена зависимость точности определения вектора состояния от угла между направлением на Солнце и вектором геомагнитного поля. Разработаны алгоритмы определения углового движения с использованием несинхронных измерений миниатюрного звездного датчика и датчика угловой скорости, подробно изучаются точностные характеристики алгоритмов в режиме слежения за точкой на поверхности Земли с учётом деградации шумов измерений звездного датчика с увеличением угловой скорости. Главу завершает раздел, посвященный оригинальному методу определения движения с использованием измерений токов в магнитной катушке при угловом движении в магнитном поле Земли.

В третьей главе рассматривается определение углового движения малого космического аппарата с нежесткими элементами в виде солнечной панели и гибкой антенны. В этом случае возникают задачи уточнения параметров модели, таких как собственные частоты и масс-инерционные характеристики, а также определения колебательных движений в реальном времени. В главе приведено описание разработанных

методов для решения этих задач и представлены результаты исследования характеристик алгоритмов с использованием измерений датчиков, установленных как на корпусе космического аппарата, так и на гибких элементах.

Четвёртая глава посвящена задаче определения относительного углового и поступательного движения малого космического аппарата в миссии группового полёта. Разработан двухэтапный алгоритм определения движения с использованием обработки видеоизображения, где на первом этапе проводится оценка положения реперных точек в системе координат космического аппарата, а на втором этапе в режиме реального времени проводится оценка кватерниона ориентации, угловой скорости, положения центра масс и поступательной скорости космического аппарата. Представлены результаты апробации алгоритма с использованием видео отделения микроспутника Чибис-М от корабля Прогресс-13М.

В пятой главе решаются задачи определения движения макетов малых спутников на специальных имитационных стендах с аэродинамическими подвесами. Особое внимание уделяется изучению возмущений, действующих на макеты в наземных условиях. Это позволяет проанализировать результаты лабораторных экспериментов и оценить работоспособность испытываемых алгоритмов определения движения.

В шестой главе представлены результаты определения углового движения малых космических аппаратов во время орбитального полёта. Для космических аппаратов с пассивной системой углового движения ТНС-0 №2 и Авион-Калуга-650 были получены оценки бортового магнитного диполя и проведена реконструкция углового движения, что позволило определить направление чувствительных осей полезной нагрузки. Представлены и проанализированы результаты работы бортовых алгоритмов определения углового движения малых спутников Чибис-М, СириусCat-1 и Vizard-ion. Проведено сравнение с результатами теоретических и лабораторных исследований.

Основные результаты диссертационной работы представлены в 51 статье в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, из них 37 в журналах WoS и Scopus, 12 в журналах Q1. Выпущено 3 монографии. Результаты были представлены на ведущих отечественных и международных конференциях, диссертационная работа была обсуждена на научных семинарах научных организаций и учебных заведений. Диссертант работает по совместительству в МФТИ, где передаёт накопленный опыт студентам и аспирантам. Под научным руководством Иванова Д.С. три кандидата наук успешно защитили свои диссертации. Диссертант активно участвует в организации научных мероприятий. Он является членом Программного комитета симпозиума по малым спутникам

в рамках Международного астронавтического конгресса. В 2025 году был избран действительным членом в Международную академию астронавтики (International Academy of Astronautics – IAA). С 2026 года назначен со-редактором в ведущем международном журнале Acta Astronautica.

Диссертационная работа Д.С. Иванова вносит существенных вклад в теорию определения движения космических аппаратов, содержит важные новые научные результаты, полученные им лично. Диссертация соответствует требованиям Положения ВАК о присуждении ученых степеней, а автор достоин присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин.

Отзыв составил научный консультант

Михаил Юрьевич Овчинников,

доктор физико-математических наук, профессор,

главный научный сотрудник, и.о. заведующего отделом № 7 Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им.

М.В. Келдыша Российской академии наук»,

почтовый адрес: 125047, Москва, Миусская пл. 4,

электронная почта: ovchinni@keldysh.ru, тел.: +7-903-192-96-53

«17» 08 2026 г.

 (М.Ю. Овчинников)

Подпись М.Ю. Овчинникова заверяю.

Учёный секретарь ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,

кандидат физико-математических наук

Александр Александрович Давыдов

« 17 » 08 2026 г.



(А.А. Давыдов)