

ОТЗЫВ
официального оппонента
Вячеслава Георгиевича Петухова
на диссертацию
Дениса Андреевича Тучина

на тему: «Математические модели и методы навигационного обеспечения и баллистического проектирования полётов космических аппаратов», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности: 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Актуальность темы диссертации

Реализация сложных отечественных проектов исследования ближнего космоса, Луны и Солнечной системы требует обеспечения высокой вероятности успеха. Численные методы, алгоритмы и реализующие их комплексы программ должны быть разработаны с учётом возможностей отечественной наземной и бортовой вычислительной техники. Перед реализацией любого космического проекта необходимо провести вычислительные эксперименты с применением методов математического моделирования для надёжного выполнения поставленных задач.

В представленной Д.А. Тучиным диссертационной работе решаются задачи создания моделей, методов, алгоритмов и комплексов программ для повышения вероятности успеха перспективных космических проектов. Поэтому диссертационная работа имеет большую научно-практическую значимость. Исследование охватывает широкий спектр проблем: от классических задач наземного навигационного обеспечения до создания полностью автономных бортовых навигационных систем для высокоэллиптических и геостационарных орбит, а также математического моделирования критических этапов перелёта к Луне и посадки на её поверхность. В диссертации рассмотрены также вопросы проектирования сложных межпланетных полётов для исследования Солнечной системы.

Научная новизна и значимость полученных результатов

Следует отметить ряд новых результатов, полученных в диссертации.

1. Разработан численный метод определения орбиты на борту космического аппарата, выходящего за пределы навигационного поля спутниковых навигационных систем. Новизна метода заключается в его трёхэтапной структуре (первоначальное определение, уточнение на короткой дуге на основе итерационного фильтра Калмана, финальная обработка нормальных мест методом наименьших квадратов). Реализован комплекс программ для отечественного бортового компьютера.

2. Предложена архитектура автономной навигационной системы (АНС), основанная на использовании двух независимых процессоров (сигнальном и навигационном). Это позволило разделить задачи поиска и слежения за сигналом с выполнением навигационных расчётов, и тем самым исключить контур обратной связи и обеспечить получение первичных измерений независимо от точности знания орбиты.

3. Создан комплекс математических моделей для имитации работы всех ключевых систем КА для исследования Луны и посадки на её поверхность. Новизна заключается в комплексности подхода, позволившего на едином стенде отработать алгоритмы управления, использованные в проекте «Луна-25».

4. Разработан инструментарий баллистического проектирования, объединяющий аналитические методы (интеграл Якоби, параметр Тиссерана, диаграммы Тиссерана-Пуанкаре, инвариантную сферу) с современными методами статистического моделирования пучков траекторий на основе ЛП-т последовательностей И.М. Соболя. Новизна подхода продемонстрирована при проектировании полётов для исследования полярных областей Солнца и галилеевых спутников Юпитера.

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в создании методов, обеспечивающих функционирование автономной навигационной системы на борту космического аппарата в разрывном навигационном поле на высоких эллиптических орбитах (типа Молния) и геостационарных орбитах. Большую теоретическую значимость имеет созданный инструмент баллистического проектирования, который позволяет рассчитывать и анализировать множество траекторий перелётов в Солнечной системе.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что

- разработанные методы, алгоритмы и программы используются в составе бортовой автономной навигационной системы шести космических аппаратов на орбитах с большим эксцентриситетом;
- разработаны комплексы программ управления движением космического аппарата для исследования Луны, включая посадку на её поверхность;
- разработанные методы и алгоритмы использовались в навигационном обеспечении полёта космических аппаратов научного назначения «МКА-ФКИ (ПН1) «Зонд-ПП», «МКА-ФКИ (ПН2) «Рэлек», «Спектр-РГ»;
- методы, алгоритмы и программы включены в бортовой программный комплекс управления режимами движения и в стенды аппаратно- программной отладки систем космического аппарата «Луна-25».

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность научных положений подтверждается успешной эксплуатацией разработанного ПО в системах управления реальных КА и при

контроле выведений КА, а также верификацией результатов моделирования по данным лётных испытаний. Основные результаты прошли широкую апробацию на всероссийских и академических семинарах и конференциях.

Оценка содержания работы и завершённости

Диссертация является завершённым научным трудом соответствующих специальности 1.2.2. В диссертации рассмотрены следующие аспекты этой специальности: создание математических моделей, разработка численных методов и их реализация в виде комплексов программ. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и шести приложений, изложена на 439 страницах, содержит 120 рисунков и 88 таблиц. Список литературы включает 274 наименования.

Во **введении** рассмотрена актуальность, цели, научная новизна и практическая значимость работы.

В **главе 1** рассматриваются классические и новые методы наземного навигационного обеспечения, обработки данных НАП, идентификации КА и реконструкции полёта. Особо следует отметить критерий отбраковки аномальных измерений.

Глава 2 содержит законченное описание АНС: от архитектуры и моделей коррелятора до трёхэтапного алгоритма определения орбиты. Представлены результаты моделирования и лётных испытаний на ВЭО.

В **главе 3** представлены математические модели сигналов ГЛОНАСС/GPS, необходимые для отработки АНС. Описан созданный имитационный комплекс.

Глава 4 посвящена комплексному моделированию задачи посадки на поверхность Луны. Представлены модели всех бортовых систем и алгоритм терминального управления. Все модели апробированы на стенде.

В **главе 5** рассмотрены вопросы баллистического проектирования межпланетных миссий. Эффективность предложенного инструментария продемонстрирована на задачах для проектов «Интергелиозонд», «Лаплас-П» и исследования Венеры.

Заключение подводит итоги и перечисляет основные научные результаты, соответствующие паспорту специальности.

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

Замечания по работе

1. На стр. 24 сказано, что «Впервые разработан численный метод определения орбиты на борту космического аппарата, выходящего за пределы навигационного поля спутниковых навигационных систем». Спорное утверждение, что впервые! Например, в 2005 году EADS Astrium предлагал на рынке GPS-приёмник MosaicGNSS для работы на низких, средних и геостационарной орбите с заявляемой точностью (3 сигма) на ГСО 150 м по положению и 2 см/с по скорости.

В монографии "Современные и перспективные информационные ГНСС-технологии в задачах высокоточной навигации" под ред. В.А. Бартенева (М.: Физматлит, 2014, 192 с., ISBN 978-5-9221-1577-3) на странице 89 указывается, что в ОАО ИСС им. академика М.Ф. Решетнева в 2008-2009 годах проводились эксперименты по применению ГНСС-приемников на геостационарной орбите. В частности, в 2009 году КА автоматически удерживался по долготе с ошибкой менее 0.1 градус без привлечения средств НКУ. В статье Д.И. Марарескул «Способ повышения доступности навигационного обеспечения высокоорбитальных космических аппаратов по ГЛОНАСС» (Вестник СибГАУ 6(52), 2013, с. 82-88) утверждается, что «Возможность использования ГЛОНАСС и GPS для навигации высокоорбитальных космических аппаратов на геостационарной орбите (ГСО) уже подтверждена успешным опытом эксплуатации на нескольких космических аппаратах на ГСО серии «Радуга М1»» (эти КА запускались в период 2009-2013 гг.).

2. В работе на стр. 269 сказано, что «При создании математических моделей навигационных приборов и двигательной установки на этапе посадки на поверхность Луны реализована модель движения центра масс КА, учитывающая силы центрального поля тяготения Луны, притяжения Земли и Солнца, нецентральности гравитационного поля Луны, а также двигательной установки КА». Не вполне понятна необходимость учета гравитационных возмущений от Земли и Солнца на этапе посадки на поверхность Луны?

3. В работе, на стр. 331 в краевых условиях задачи терминального управления не учитывается вращение Луны вокруг собственной оси, нулевая скорость в замороженной стартовой системе координат не будет соответствовать нулевой скорости относительно поверхности Луны. Необходимо было привести оценки величины конечной скорости КА относительно Луны, возникающей при использовании рассматриваемого терминального управления.

4. В работе, на стр. 356 сказано, что «В случае больших, околлогиперболических значений асимптотической скорости КА $v_{\infty} > 1$ реализуются, очевидно, любые наклонения орбиты КА на одном пролёте [241,

с. 16]. Действительно, в этом случае отсутствует ограничение на направление вектора скорости КА после ГМ. Поэтому возможны любые наклоны орбиты КА на одном пролёте». 1) Не окологиперболической асимптотической скорости, а асимптотической скорости, больше круговой гелиоцентрической скорости планеты. 2) Неточное утверждение. Ограничение в одном пролете существует, и довольно жесткое, это ограничение на угол поворота вектора асимптотической скорости, связанный с ограничением на минимальную высоту пролета планеты. С ростом модуля вектора асимптотической скорости допустимая величина угла его поворота уменьшается. Ограничение угла поворота асимптотической скорости ограничивает направление вектора скорости КА после ГМ.

5. В работе замечены опечатки, грамматические и стилистические ошибки, например на стр. 8, 9, 12, 13, 26, 182, 237, 263, 264, 272, 318, 323, 340, 342, 348, 360.

– На стр. 15 указывается посадка на неизвестные небесные тела Галилео и Кассини.

– На стр. 146. сказано, что «Приведём рекуррентные формулы для расчёта коэффициента b_n наклона линейной регрессии». Здесь b_n – не коэффициент наклона линейной регрессии, а аддитивный член.

– На стр. 263 сказано, что «Все ближайшие разрабатываемые проекты предполагают ... выполнение посадки в заданную точку поверхности одного из полюсов». Ближайший проект («Луна-26») посадку не предполагает.

– На стр. 279 сказано, что «Условия затенения цифровой телевизионной камеры БОКЗ-МФ Солнцем, Землёй и Луной ...». Вероятно, имеются ввиду условия его засветки Солнцем.

– На стр. 343 сказано, что «Изменив скорость при совершении ГМ можно изменить период орбиты вокруг Юпитера, тем самым выйти на его орбиту для осуществления посадки на его поверхность». Существование поверхности у Юпитера не доказано, поэтому вопрос посадки на неё обычно не рассматривается. Вероятно, подразумевается посадка на поверхность одного из спутников Юпитера.

– На стр. 379 в таблице 81 для безразмерной асимптотической скорости приведена размерность км/с.

Высказанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Заключение по диссертационной работе Тучина Дениса Андреевича

Представленная диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решены научные проблемы, имеющие важное социально-экономическое значение. Имеется соответствие всем требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842. Содержание работы и положения, выносимые на защиту, соответствуют паспорту специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Результаты работы прошли достаточную апробацию на научных семинарах и конференциях и были опубликованы в 70 печатных изданиях, 59 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 24 – в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 8 – в тезисах докладов, 2 – в монографиях. 5 работ опубликовано без соавторов. Зарегистрирована 1 программа для ЭВМ.

Учитывая всё изложенное, считаю, что представленная работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а её автор Тучин Денис Андреевич заслуживает присуждения ему искомой учёной степени.

Отзыв составил официальный оппонент

Петухов Вячеслав Георгиевич, доктор технических наук по научной специальности 05.07.09 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов», член-корреспондент РАН, директор «Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики МАИ».

125080, г. Москва, Ленинградское ш., д. 5, а/я 43, тел. +7 916 583 50 41, petukhovvg@mai.ru.



Петухов Вячеслав Георгиевич
27 февраля 2026 г.