

ОТЗЫВ

официального оппонента Сазонова Василия Викторовича
на диссертационную работу Жукова Бориса Сергеевича
на тему «Автономная оптическая навигация космических аппаратов при
полетах к Луне и малым телам Солнечной системы», представленную на
соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

В настоящей работе представлены разработанные методы и технические средства автономной оптической навигации космических аппаратов на околопланетных орбитах, на межпланетных трассах перелета и при посадке на поверхность тел Солнечной системы.

Во время межпланетных перелетов, выхода на околопланетную орбиту, коррекций этой орбиты важно уточнять параметры движения космического аппарата, причем в некоторых случаях, особенно при возникновении нештатных ситуаций, необходимо это делать автономно, с использованием соответствующих средств навигации.

Использование автономных средств навигации позволит существенно повысить точность вывода космического аппарата в желаемую точку посадки.

Безопасность самой посадки космического аппарата на поверхность небесного тела напрямую связана с отклонением в реальном времени от опасных неровностей рельефа, которые вследствие относительно малого размера могут не быть распознаны с орбиты по причине недостаточного разрешения орбитальных оптических систем. Кроме того, вследствие значительных размеров эллипса рассеяния точки выведения КА в район посадки в его пределах всегда будет иметься достаточное число участков поверхности, непригодных для посадки.

Таким образом, тема исследования данной диссертационной работы является безусловно **актуальной**.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения.

Во введении автор рассматривает актуальность темы исследования, степень ее разработанности, цели и задачи исследования, научную новизну работы, ее теоретическую и практическую значимость, методологию и методы исследования,

положения, выдвигаемые на защиту, степень достоверности и апробацию результатов, а также личный вклад автора.

В первой главе описываются общие принципы автономной оптической навигации КА. Приводится описание используемых систем координат и времени. Рассматриваются геометрические и отражательные характеристики тел Солнечной системы, на основе которых строятся методы автономной оптической навигации.

Во второй главе предложен метод автономной оптической навигации по горизонту для применения в реальном времени на борту КА и проведена оценка его точности. В настоящее время перед проведением коррекций орбиты положение КА обычно уточняется по центру яркости или по горизонту путем ТВ-съемки небесных тел с обработкой снимков на Земле в ручном режиме. Предлагаемый автором метод позволяет производить обработку на борту в автоматическом режиме, что позволяет решать навигационную задачу в реальном времени. При этом учитываются условия наблюдения, геометрических характеристик камеры, наличие терминатора, световых помех и др. Предложен эффективный вычислительный алгоритм определения положения КА по найденным точкам горизонта.

В третьей главе предложен метод автономной оптической навигации по контрольным точкам (КТ), т.е. ориентирам, привязанным к связанной планетоцентрической системе координат. Автономные навигационные измерения по контрольным точкам при полетах к планетам и телам Солнечной системы с обработкой информации на борту в реальном времени до сих пор не проводились. Для решения этой задачи автор разработал новый метод на основе известных фотограмметрических принципов, учитывающий условия космической съемки, характер изображения безатмосферных тел Солнечной системы и использующий экономичные вычислительные алгоритмы, допускающие реализацию данного метода на реальных космических процессорах. В частности, автор решил проблему зависимости изображений безатмосферных тел от направлений освещения и наблюдения. С этой целью в работе предложено характеризовать КТ многомасштабной пирамидой их трехмерных моделей, по которым в реальном

времени рассчитываются эталонные изображения КТ для конкретных условий наблюдения, что делает метод инвариантным к условиям наблюдения.

Для реализации метода навигации по контрольным точкам автором разработана новая методика построения каталогов КТ на поверхности безатмосферных тел для задач автономной оптической навигации. Имеющиеся каталоги кратеров на Луне и других телах Солнечной системы для этой цели не подходят из-за сложности их автоматического распознавания и схожей структуры кратеров. Разработанная автором методика, наоборот, ориентируется на уникальность контрольных точек и оптимизацию их чувствительности к смещениям по любому направлению. Для обеспечения инвариантности к условиям наблюдения контрольные точки характеризуются многомасштабными пирамидами их трехмерных моделей. Описывается созданный по данной методике новый глобальный каталог КТ на поверхности Луны для задач автономной оптической навигации. Подобных специализированных каталогов для Луны до настоящего времени не существовало.

В четвёртой главе анализируется проблема автономного выбора безопасного места посадки на поверхности тел Солнечной системы. Показано, что при посадке 'вслепую' на поверхность Луны на выбранной площадке в среднем может быть несколько опасных кратеров, а площадная доля опасных уклонов может достигать ~40 %. Для решения этой проблемы автор предлагает строить на борту КА в реальном времени фотометрическую карту риска на основе критериев относительной дисперсии яркости изображения, степени затенения и средней яркости площадки. Новыми являются результаты исследования автором связи указанных критериев с характеристиками опасных кратеров и камней и оптимизация разрешения для их распознавания. Этот метод был впервые реализован автором в программно-алгоритмическом обеспечении телевизионной системы навигации и наблюдения ТСНН на КА «Фобос-Грунт», запуск которой состоялся в 2011 г. В дальнейшем схожие методы построения карты риска применялись при посадке китайских и индийских КА на Луну в 2013–2024 гг.

В пятой главе описывается внедрение разработанных автором методов автономной оптической навигации на трассах перелета и околопланетных

орбитах в оптическую навигационную систему (ОНС) для пилотируемого транспортного корабля. ОНС основана на новом подходе к построению оптических навигационных систем, который состоит в сочетании измерений по горизонту с помощью широкоугольной навигационной камеры (ШНК), используемой для грубой оценки положения КА для определения области поиска контрольных точек, с дальнейшим уточнением положения КА по контрольным точкам с использованием узкоугольной навигационной камеры (УНК). Для измерений ориентации в состав ОНС также входят два звездных датчика. Таким образом, ОНС позволяет проводить навигационные измерения с высокой точностью в полностью автономном режиме.

Приводятся результаты стендовой отработки ОНС, тестирования по снимку Луны, полученному камерами СТС-Л на КА «Луна-25», а также систематического тестирования по изображениям, получаемым на околоземных орбитах комплексом многозональной спутниковой съемки КМСС-2 на КА «Метеор-М». Показано, что среднеквадратическая ошибка измерений горизонтальных координат КА на окололунных орбитах находится в пределах 50 м, по высоте может достигать нескольких сотен метров. На трассе перелета Земля–Луна при приближении к Луне точность оценки расстояния улучшается от ~10 % до ~0,1 %, точность оценки направления на центр Луны – от 10 угл. мин. до ~0,1 угл. мин. Таким образом, на трассах перелета ОНС хорошо дополняет наземные радиолокационные системы, имеющие высокую точность измерения расстояния, но относительно низкую точность угловых измерений. На околопланетных орбитах автономные навигационные измерения ОНС могут существенно повысить точность и оперативность определения орбиты ПТК.

В шестой главе рассматривается внедрение разработанных автором методов автономной оптической навигации при посадке на поверхность небесных тел в систему ТСНН на КА «Фобос-Грунт» и в систему ТСНН-2 для КА «Луна-27». Показано, что на этапе абсолютной навигации среднеквадратические ошибки (СКО) траекторных измерений при использовании имеющихся моделей Луны могут составлять 20 м, а абсолютная навигация может быть возможна до высоты ~6 км. При использовании топографических моделей Луны, которые должны

быть построены в миссии «Луна–26», СКО измерений положения КА может быть уменьшено до ~ 10 м, а абсолютная навигация будет возможна на всем участке основного торможения. При этом за счет использования фотометрической карты риска вероятность посадки на опасные уклоны может быть уменьшена до ~ 3 %. Таким образом, использование автономной оптической навигации при посадке на поверхность небесных тел позволяет радикально улучшить точность вывода аппарата в район посадки и повысить безопасность посадки.

В заключении автором сформулированы основные результаты работы, даются рекомендации по их практическому использованию и по дальнейшему развитию работ по автономной оптической навигации.

Таким образом, автором разработаны **новые методы** автономных навигационных оптических измерений для космических аппаратов и **новые подходы** к построению космических систем автономной оптической навигации. На их основе **созданы новые космические навигационные системы**: ТСНН на КА «Фобос-Грунт», ОНС на ПТК, ТСНН-2 для КА «Луна–27», в разработке которых автор играл ведущую роль. Результаты их стендовой отработки подтвердили **обоснованность и достоверность** внедренных в них методов и подходов. Подтверждена способность указанных систем решать поставленные перед ними задачи навигационных измерений в реальном времени с расчетной точностью.

Методы автономной оптической навигации и технические решения, предложенные автором, позволяют повысить надежность и безопасность космических полетов к Луне, Марсу, Венере и малым телам Солнечной системы, предусмотренных Федеральной космической программой, что определяет **практическую значимость** работы.

Комплексирование традиционных наземных радиотехнических измерений и автономных оптических измерений на трассах перелета и на околопланетных орбитах позволит улучшить точность и оперативность определения орбиты КА и оперативность принимаемых решений по управлению КА.

При посадке космических аппаратов, когда управление посадкой проводится на борту, автономные оптические навигационные измерения

позволяют на порядок улучшить точность определения траектории посадки и точность вывода КА в заданный район. Это даст возможность выбирать для посадки районы меньших размеров и в большей степени ориентироваться на научные задачи миссии, а не на наличие больших ровных площадей.

Автономные методы выбора безопасного места посадки по телевизионным изображениям позволяют дополнить и резервировать результаты сканирования рельефа поверхности лидарными и радиолокационными системами. Достоинствами телевизионных систем являются высокая степень отработки, небольшие вычислительные затраты, отсутствие необходимости в стабилизации КА, а также возможность идентификации затененных районов, которые следует избегать при посадке.

Основные результаты работы опубликованы в журналах из списка ВАК и в рецензированных зарубежных журналах, а также регулярно докладывались и обсуждались на научных конференциях и семинарах.

Актуальные и важные задачи, возникающие при создании межпланетных миссий, решены в работе на высоком научно-техническом уровне. Вместе с тем в ходе анализа текста диссертационной работы выявлены следующие недостатки:

1. Проведена стендовая отработка систем ТСНН на КА «Фобос-Грунт», ОНС на ПТК. Не ясно, в какой степени результаты стендовой отработки применимы к условиям реальных космических съемок.
2. Тематика диссертации несколько неоднородна. Наряду с вопросами навигационных измерений положения КА рассматривается также проблема выбора безопасного места посадки КА на поверхность тел Солнечной системы, для которой используются совершенно другие методы и подходы.
3. В работе ссылки на литературу и интернет-ресурсы оформлены не по ГОСТу.
4. Отсутствуют ссылки на литературу в автореферате диссертации.
5. На стр. 10 диссертации нет ссылки на описание метода TRN.
6. На стр. 13 автор указывает на «имеющиеся каталоги кратеров на поверхности Луну», но ссылки на эти каталоги в тексте диссертации обнаружить не удалось.

7. На стр. 33 есть утверждение: «Для Луны вариации высоты поверхности относительно референц-сферы достигают примерно ± 10 км». Схемы доказательства этого утверждения не приводятся.
8. На стр. 44 утверждается, что поправка навигационных измерений, зависящая от формы планеты и фазового угла наблюдения, может быть рассчитана априорно, но ни ссылок, ни схемы расчета не приводится.
9. На стр. 56 указано, что величина проекции вектора направления на Солнце находится при помощи численного дифференцирования функции, обратной к проекционной функции, но формула численного дифференцирования не приводится.
10. На стр. 56 приводится без доказательства следующее утверждение: «Для Луны ошибка δ помимо разрешения камеры зависит от рельефа поверхности. В линейной мере она может составлять несколько километров».
11. На стр. 76 фраза: «В отечественной литературе наряду с термином “контрольные точки”...» – не сопровождается ссылками на литературу.
12. На стр. 127 приводятся требования к месту посадки аппарата «Луна–27», однако ссылок на соответствующую документацию не приводится.
13. На стр. 135 приводится и далее используется термин «фотометрическая карта риска», но определения этого термина в тексте диссертации обнаружить не удалось.
14. На стр. 151 вывод 1 к главе 4 является просто техническим требованием к изделию «Луна–27» и не был получен в ходе диссертационного исследования.
15. На стр. 193 указано что, для отработки на стенде выбирались полярные орбиты высотой 70, 100, 200, 400 и 800 км, но чем продиктован выбор таких высот орбит, автор не указывает.
16. На стр. 272 вывод 1 к главе 6 является очевидным утверждением и не был получен в ходе диссертационного исследования.

Указанные недостатки не снижают общий высокий уровень работы.

Диссертационная работа соответствует специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия (технические науки)». Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертация Б. С. Жукова является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны, конкретно – в выполнение Федеральной космической программы. Диссертация соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» от 24 сентября 2013 г. № 842 к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор — Жуков Борис Сергеевич — заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия».

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук, доцент, декан факультета космических исследований Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Василий Викторович Сазонов



«06» сентября 2025 г.

119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 52, МГУ, факультет космических исследований

E-mail: sazonov@cosmos.msu.ru

Тел.: +7-495-939-2113