

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**
«Рязанский государственный радиотехнический университет
имени В.Ф. Уткина»
(ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет
им. В.Ф. Уткина»,
ФГБОУ ВО «РГРТУ», РГРТУ)

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Жукова Бориса Сергеевича
на тему «Автономная оптическая навигация космических аппаратов при
полетах к Луне и малым телам Солнечной системы», представленной
на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 1.3.1 - Физика космоса, астрономия

Актуальность. Рецензируемая работа посвящена разработке методов и телевизионных систем автономной оптической навигации космических аппаратов для применения на трассах перелета, на околопланетных орбитах и при посадке на тела Солнечной системы. Применение методов автономной оптической навигации особенно перспективно в дальнем космосе после коррекций орбиты космических аппаратов, при пролете малых тел Солнечной системы, орбиты которых недостаточно хорошо известны, при посадке на поверхность тел Солнечной системы, а также в нештатных ситуациях. В настоящее время подобные автономные оптические системы начинают применяться при посадке американских, китайских и индийских космических аппаратов.

Научная новизна. В работе развит новый подход к построению систем автономной оптической навигации, основанный на комплексировании бортовых навигационных измерений по горизонту и по контрольным точкам на поверхности тела, при дополнительном измерении ориентации космического аппарата. Данный подход позволяет обеспечить как

автономность, так и высокую точность навигационных измерений. Для его реализации автором разработаны новые методы бортовых навигационных измерений по горизонту и по контрольным точкам, учитывающие условия космических съемок и геометрические и отражательные характеристики тел Солнечной системы. При этом используются экономичные вычислительные алгоритмы, которые могут быть реализованы в реальном времени на существующих космических процессорах.

Для учета зависимости изображений безатмосферных тел (Луна, Фобос и др.) от направлений освещения и наблюдения используется новый подход, когда контрольные точки описываются многомасштабными пирамидами трехмерных моделей, по которым в реальном времени рассчитываются их эталонные изображения. Для реализации данного подхода автором разработана новая методика создания специализированных каталогов контрольных точек на основе принципов их оптимальной локализуемости, уникальности в потенциальной области, инвариантности к условиям наблюдения и независимости от объектов, не входящих в их область определения. По данной методике создан новый глобальный каталог контрольных точек на поверхности Луны для целей автономной навигации на окололунных орбитах, содержащий более 40 тыс. точек.

На основе данного подхода при ведущей роли автора создана новая Оптическая навигационная система (ОНС) для Пилотируемого транспортного корабля для работы на трассе перелета Земля-Луна и на окололунных орбитах. ОНС состоит из широкоугольной камеры для навигации по горизонту, узкоугольной камеры для навигации по контрольным точкам и двух звездных датчиков для измерения ориентации. Система прошла стендовую отработку. Систематическое тестирование ее программно-алгоритмического обеспечения проводится по изображениям, получаемым на околоземных орбитах системой КМСС-2 на КА серии «Метеор-М». На трассах перелета и на околопланетных орбитах автономные

оптические измерения путем бортовой обработки телевизионной информации в реальном времени до настоящего времени не проводились.

Важным направлением диссертационной работы является разработка методов и технических средств автономной оптической навигации при посадке на поверхность тел Солнечной системы. На этапе основного торможения также предлагается применять разработанный автором навигации по контрольным точкам (абсолютную навигацию), который имеет существенные преимущества по сравнению с методом относительной навигации, использовавшимся при посадке американских космических аппаратов Mars-2020 на Марс и IM-1 и IM-2 на Луну. Этими преимуществами являются инвариантность к условиям наблюдения, учет перспективных искажений (например, на участке основного торможения при посадке на Луну отклонение оптической оси камер от гравитационной вертикали может достигать $\pm 30^\circ$) и значительная экономия бортовой памяти. Показано, что при использовании каталогов контрольных точек, созданных на районы посадки по разработанной автором методике по результатам стереокартирования Луны с помощью камеры ЛСТК в проекте «Луна-26», абсолютная навигация будет возможна на всем этапе основного торможения со среднеквадратической ошибкой порядка 10 м.

На заключительном этапе посадки приоритетной задачей автономной оптической навигации является выбор наиболее безопасного места посадки. Показано, что при посадке ‘в слепую’ на поверхность Луны на выбранной площадке размером 20x20 м в среднем может быть несколько опасных кратеров, а площадная доля опасных уклонов может достигать ~40%. Для выбора места посадки автор разработал метод построения фотометрической карты риска по критериям относительной дисперсии яркости изображения и степени затенения. Исследована связь этих критериев с диаметром опасных кратеров и площадной долей крупных камней и выбрано оптимальное разрешение для их распознавания. Метод построения фотометрической карты риска впервые реализован автором в системе ТСНН на КА «Фобос-

Грунт» (2011 г.) В дальнейшем схожие методы построения карты риска применялись при посадке китайских и индийских аппаратов на Луну в 2013-2024 гг.

Показано, что вероятность посадки на опасные уклоны на Луне не будет превышать величины порядка 3% при условии: (1) выбора наиболее ровного района для посадки размером порядка 1x1 км, (2) вывода КА в выбранный район с использованием разработанного автором метода навигации по контрольным точкам и (3) выбора наиболее безопасного места посадки в процессе спуска по фотометрической карте риска. На основе указанных методов при ведущей роли автора создается новая телевизионная система навигации и наблюдения ТСНН-2 для проекта «Луна-27».

Практическая значимость. Методы автономной оптической навигации, разработанные автором, позволяют повысить надежность и безопасность космических полетов к Луне, Марсу, Венере и малым телам Солнечной системы, предусмотренных Федеральной космической программой.

Комплексирование традиционных наземных радиотехнических методов навигационных измерений и автономных оптических измерений на трассе перелета и на околопланетных орбитах позволит повысить точность и оперативность определения орбиты КА, что особенно важно в баллистически сложных миссиях. Кроме того, резервирование методов навигационных измерений необходимо для обеспечения безопасности пилотируемых полетов.

При посадке КА на поверхность тел Солнечной системы автономная оптическая навигация в дополнение к традиционным инерциальным и альтиметрическим методам позволит радикально повысить точность вывода КА к месту посадки, что даст возможность выбирать для посадки районы меньших размеров и в большей степени ориентироваться на научные задачи миссии, а не на наличие больших ровных площадей.

Безопасность посадки космических аппаратов на поверхность небесных тел напрямую связана с уклонением в реальном времени от опасных уклонов и камней, которые вследствие относительно малого размера могут не быть распознаны с орбиты вследствие недостаточного разрешения орбитальных съемочных систем. Кроме того, вследствие значительных размеров эллипса рассеяния точки выведения КА в район посадки в его пределах всегда будет иметься большое число опасных неровностей рельефа. Необходимость управляемой посадки с уклонением от опасных участков показывают недавние примеры посадки аппаратов ИМ-1 и ИМ-2 на опасные уклоны, что привело к их опрокидыванию.

Вместе с тем, к представленной работе необходимо сделать следующие замечания:

1. В диссертации недостаточно представлено взаимодействие разработанных автором методов автономных навигационных измерений с традиционными наземными методами траекторных измерений.

2. В главе 5 приводятся результаты систематической отработки методов автономных оптических навигационных измерений по данным, полученным на околоземных орбитах комплексом многозональной спутниковой съемки КМСС-2 на КА «Метеор-М». Очевидно, что в случае Земли необходима модификация методов автономной оптической навигации, разработанных для Луны и малых тел Солнечной системы, а также использование каталогов контрольных точек, созданных для Земли. В автореферате об этом не содержится никакой информации.

3. Вместо термина «контрольные точки» в отечественной литературе обычно используется термин «реперные точки».

Указанные недостатки однако не снижают общий высокий научно-технический уровень работы.

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 космических исследований тел Солнечной системы, предусмотренных Федеральной космической программой. Работа соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, а её автор заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия».

Проректор по научной работе и инновациям,
зав. кафедрой «Космические технологии»

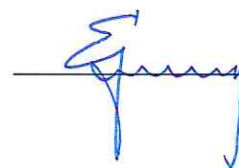
докт. техн. наук, доцент



 С.И. Гусев

«18» 04. 2025г.

Директор НИИ обработки аэрокосмических
изображений РГРТУ, докт. техн. наук,
профессор, Заслуженный деятель науки РФ,
Академик Российской академии
космонавтики им. К.Э. Циолковского



В.В. Еремеев

Контактные данные:

тел.: 8(4912)72-03-72,

e-mail: foton@rsreu.ru,

адрес места работы: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, РГРТУ.