

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Жукова Бориса Сергеевича

"Автономная оптическая навигация космических аппаратов при полетах к Луне и малым телам Солнечной системы" по специальности

1.3.1 – Физика космоса, астрономия, представленную на соискание
ученой степени доктора технических наук

Актуальность. Диссертационная работа посвящена исследованиям разработки и применения методов автономной оптической навигации космических аппаратов (КА) дальнего космоса. В настоящее время навигация космических аппаратов в дальнем космосе прежде всего осуществляется путем наземной обработки измерений наземных радиотехнических систем. При этом существенным недостатком является низкая оперативность решения навигационных задач из-за значительного времени распространения сигнала, а также ограниченная точность и устойчивость решений при измерениях движения КА "поперек" направления наблюдения. Последний отмеченный недостаток на практике парируется съемкой исследуемых тел Солнечной системы в ходе калибровочных сеансов и определением направления на них путем наземной обработки получаемых изображений. При снижении и посадке КА на поверхность небесных тел навигация осуществляется по информации бортовых инерциальных и альтиметрических систем. Разработка и использование методов автономной оптической навигации КА позволит путем бортовой обработки телевизионных изображений в реальном времени повысить оперативность, устойчивость и точность навигационных определений, что особенно критично после коррекций орбиты КА, при пролете малых тел Солнечной системы с недостаточно хорошо известной орбитой, и особенно при посадке КА, когда решения должны приниматься в реальном времени. Кроме того, автономная оптическая навигация может быть незаменима во внештатных ситуациях.

В связи с вышеизложенным, тема диссертационной работы Жукова Б.С. несомненно является актуальной и востребована перспективными космическими программами.

Содержание работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и условных обозначения, списка литературы.

Введение построено в соответствии с общими требованиями и включает обоснование актуальности темы диссертации, степень ее разработанности, цели и задачи исследования, научную новизну работы, ее теоретическую и практическую значимость, методологию и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробацию результатов, оценку личного вклада автора. Описаны объем и структура диссертации.

В первой главе рассмотрены общие принципы автономной оптической навигации КА и используемые при этом системы координат и времени, геометрические модели и отражательные характеристики безатмосферных тел Солнечной системы.

Во второй главе автор исследует методы автономной оптической навигации по горизонту. Рассмотрены особенности навигационных измерений по центру яркости тела, характер изображений дуги горизонта. Изложен предложенный автором метод навигационных измерений по горизонту на борту КА в реальном времени с учетом геометрии наблюдения, геометрических характеристик камеры, наличия терминатора, световых помех и др. Представлен эффективный вычислительный алгоритм определения положения КА по найденным точкам горизонта.

В третьей главе представлен и исследуется разработанный автором метод относительной автономной оптической навигации КА по контрольным точкам (КТ), т.е. ориентирам, привязанным к связанной планетоцентрической системе координат. Предложено характеризовать КТ многомасштабной пирамидой их трехмерных моделей, по которым рассчитываются эталонные изображения КТ в реальном времени для конкретных условий наблюдения, что делает метод инвариантным к условиям наблюдения.

Рассмотрены общие принципы формирования каталога КТ для реализации автономной оптической навигации, а также приведена, разработанная автором новая методика построения каталогов КТ на поверхности безатмосферных тел Солнечной системы, основанная на принципах оптимальной локализуемости КТ, их уникальности в области поиска, инвариантности к условиям наблюдения. Для решения задач автономной оптической навигации приведено описание созданного по данной методике специализированно глобального каталога КТ на поверхности Луны.

В четвёртой главе приведены результаты анализа проблемы методов автономной оптической навигации КА для выбора безопасного места посадки на поверхности небесных тел. Автором показано, что при посадке "в слепую" на поверхность Луны на выбранной площадке в среднем может быть несколько опасных кратеров, а доля опасных уклонов может достигать ~40%. Для решения этой проблемы автор предлагает строить на борту КА в реальном времени фотометрическую карту риска (ФКР), по которой в процессе посадки должна выбираться площадка с минимальным количеством опасных неровностей поверхности. Обоснована целесообразность комбинирования фотометрической карты риска с априорными картами наклонов поверхности.

В пятой главе рассмотрены технологии и средства автономной оптической навигации КА на этапах перелета и полета на околопланетных орбитах. Приведены разработанные автором методы автономной оптической навигации на трассах перелета и околопланетных орбитах, реализованные в единой бортовой оптической навигационной системе (ОНС) для пилотируемого транспортного корабля. Представлены результаты стендовой отработки ОНС и результаты тестирования разработанного автором программно-алгоритмического обеспечения ОНС по изображениям, получаемым комплексом многозональной спутниковой съемки КМСС-2 на КА "Метеор-М", а также по снимкам Луны камерами СТС-Л на КА "Луна-25."

В шестой главе рассмотрены проблемные вопросы автономной оптической навигации КА при посадке на поверхность тел Солнечной системы. Представлены, разработанные автором методы автономной оптической навигации при посадке на поверхность небесных тел и результаты их внедрения в телевизионную систему навигации и наблюдения (ТСНН) на КА "Фобос-Грунт" и в систему ТСНН-2 для КА "Луна-27". Показано, что при использовании имеющихся моделей Луны, абсолютная навигация может быть возможна до высоты ~6 км, а среднеквадратические ошибки (СКО) навигации будут составлять 20 м. При использовании топографических моделей Луны, которые должны быть построены в миссии "Луна-26", СКО оценки положения КА может быть уменьшено до ~10 м, а абсолютная навигация будет возможна на всем участке основного торможения. При этом значение вероятности посадки на опасные уклоны может быть уменьшена до ~3%.

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

Обоснованность и достоверность. Исследования, проведенные автором, выполнены на высоком методическом уровне, полученные результаты, выводы и рекомендации являются оригинальными. Обоснованность и достоверность разработанных автором методов и подходов к построению систем автономной оптической навигации подтверждаются результатами математического моделирования, стендовой обработки реальных космических съемок, отработки и тестирования ОНС, ТСНН, ТСНН-2, созданных при ведущей роли автора.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждена апробацией результатов исследований на всероссийских и международных конференциях и семинарах, полным отражением основных результатов диссертационной работы в опубликованных автором научных трудах.

Научная новизна. Системно вопросы разработки и внедрения методов автономных навигационных измерений по горизонту и по контрольным точкам на этапе перелета, на околопланетных орбитах и при посадке космических аппаратов на тела Солнечной системы с обработкой в реальном времени информации на борту КА до настоящего времени должного развития не получили. Для решения этой задачи автором предложены новые методы и вычислительные алгоритмы, учитывающие геометрические условия космической съемки, характер изображения безатмосферных тел Солнечной системы, а также ограничения по быстродействию и объему памяти бортовых вычислительных средств. В диссертационной работе предложено решение проблемы зависимости изображений безатмосферных тел Солнечной системы от направлений освещения и наблюдения, путем использования трехмерных моделей контрольных точек, по которым их эталонные изображения рассчитываются при актуальных условиях наблюдения в реальном времени.

Для реализации метода навигации по контрольным точкам автором разработана новая методика формирования каталогов контрольных точек тел Солнечной системы с предложенной уникальной структурой, а также построен специализированный глобальный каталог КТ для Луны. Разработанный каталог контрольных точек Луны позволил решить задачу автоматического распознавания и схожей структуры кратеров.

Для обеспечения автономности и высокой точности навигационных определений автором предложен новый подход, основанный на сочетании измерений по горизонту, используемых для грубого определения положения

КА при определении области поиска контрольных точек, с дальнейшим уточнением положения КА по контрольным точкам. На основе данного подхода создана единая ОНС для пилотируемого транспортного корабля.

Теоретическая и практическая значимость. Методы автономной оптической навигации, разработанные автором, являются существенным развитием технологий и средств решения задач навигационного обеспечения полетов КА дальнего космоса, их применение позволяет повысить надежность и безопасность предусмотренных Федеральной космической программой космических полетов к Луне, Марсу, Венере и к малым телам Солнечной системы.

На трассе перелета и на околопланетных орбитах автономное уточнение орбиты в реальном времени особенно важно при выведении КА на околопланетную орбиту и после коррекций орбиты, при пролете малых тел Солнечной системы с недостаточно хорошо известной орбитой, а также в нештатных ситуациях.

Автономная оптическая навигация на этапе основного торможения при посадке КА на поверхность небесных тел 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.

Разработанный автором фотометрический метод выбора места посадки впервые был реализован в системе ТСНН на КА "Фобос-Грунт", запуск которого состоялся в 2011 г. В дальнейшем аналогичные методы применялись при посадке китайских и индийских КА на Луну в 2013-2024 гг.

Безопасность посадки космических аппаратов на поверхность небесных тел напрямую связана с уклонением в реальном времени от опасных уклонов и камней, которые по причине 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 приведенные выше примеры нештатной посадки КА на поверхность Луны и других небесных тел.

Для повышения надежности и безопасности космических миссий автором рекомендуется применение автономной оптической навигации в качестве резервной по отношению к традиционным методам навигационных определений, что особенно важно при пилотируемых полетах в дальний космос.

В целом диссертация представляет собой завершенное научное исследование. Изложенные автором практические рекомендации и перспективы дальнейших исследований в направлении автономной оптической навигации вполне обоснованы, вытекают из логики работы и полученных результатов.

Вместе с тем представленная диссертационная работа не лишена недостатков. Необходимо отметить следующие **замечания**:

1. В диссертации не исследована задача прогнозирования движения КА по результатам автономных оптических навигационных определений при измерениях по горизонту и по контрольным точкам, что является принципиально важным при управлении полетом.

2. Термин "контрольные точки" не является общепринятым в отечественной научной литературе. Неясно почему автор отказался от используемых терминов "реперные" или "опорные" точки.

3. По тексту диссертации имеют место опечатки. Так, при написании формулы (3.13) в четвертом члене справа нужно заменить индекс "x" на "y", в формуле (5.7) после квадратного корня нужно убрать знак возведения в квадрат.

Однако указанные недостатки не снижают значимости и научной новизны работы.

Диссертация выполнена автором самостоятельно на высоком научном уровне. Полученные результаты достоверны, рекомендации, выводы и заключения обоснованы. Все основные результаты опубликованы. Диссертация представляет собой законченную работу. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Полученные автором научно обоснованные результаты соответствуют передовым позициям научных исследований в области автономной оптической навигации КА в дальнем космосе.

Диссертационная работа соответствует специальности 1.3.1 – "Физика космоса, астрономия (технические науки)".

Таким образом, можно заключить, что 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 учёных степеней" от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, а её автор заслуживает присуждения искомой учёной степени доктора технических наук по специальности 1.3.1 – "Физика космоса, астрономия (технические науки)".

Официальный оппонент

Руководитель направления проекта АО "ЦНИИМаш",

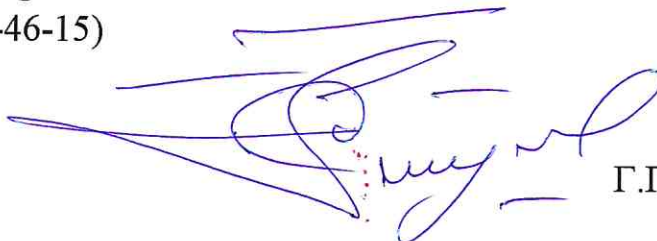
доктор технических наук, профессор

(141070, Московская область, г. Королёв,

ул. Пионерская, д. 4, АО "ЦНИИМаш",

E-mail: StupakGG@tsniimash.ru

Тел.: +7(495)513-46-15)



Г.Г.Ступак

Подпись официального оппонента Григория Григорьевича Ступака заверяю.

Главный ученый секретарь АО "ЦНИИМаш",

доктор технических наук



В.Ю.Клюшников