

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Жукова Бориса Сергеевича
«Автономная оптическая навигация космических аппаратов на околопланетных орбитах», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.2.1 – «Физика космоса, астрономия (технические науки)»

Диссертационная работа посвящена решению задач навигации космических аппаратов (КА), используя оптическое изображение с видеокамер, установленных на их борту. Целью диссертационной работы является комплексная разработка и внедрение методов автономной оптической навигации КА в практику космических полетов в дальний космос. Предложенные в работе подходы и методы предполагается использовать как для определения местоположения КА в процессе орбитального полета вокруг различных тел солнечной системы, так и при посадке на них.

Актуальность избранной темы.

Космические аппараты являются сложными роботизированными комплексами, ресурсы которых ограничены имеющимися на борту запасами топлива и возможностями системы электропитания. Трасса их полета может проходить вне зоны связи с наземными комплексами управления, это определяет необходимость реализовывать необходимые режимы полета КА непосредственно системой управления КА, без постоянного участия человека. Одними из основополагающих данных для системы управления КА, используемых в целях автоматического принятия решений при управлении движением, является знание положения КА в системе координат, связанной с центром планеты или другого небесного тела, вокруг которого происходит его орбитальное движение. Для Земли в настоящее время эта задача решается в основном при помощи методов спутниковой навигации. Однако в случае, если орбитальное движение происходит вокруг других небесных тел, где отсутствуют спутниковые навигационные системы, типа GPS/ГЛОНАСС/Beidou/Galileo, то такой способ определения координат КА

недоступен. В этом случае одним из способов определения местоположения КА на орбите является использование оптических изображений этих небесных тел. По таким изображениям возможно распознавать характерные участки поверхности планеты и тем самым определять положение КА относительно нее. Дополнительная информация об ориентации КА позволяет сузить область поиска таких характерных участков и ускорить решение задачи навигации.

Учитывая вышесказанное, методы оптической навигации космических аппаратов на околопланетных орбитах, крайне востребованы, что и объясняет актуальность диссертационной работы.

Научная методология исследования. В работе широко используется аппарат аналитической геометрии, линейной алгебры и математического анализа. Применяются методы обработки изображений в части выделения дескрипторов характерных областей изображений, а также детектирования наличия указанных областей в кадре, получаемом с оптической системы. Применяются методы фильтрации как точек изображений, так и данных, полученных в ходе обработки этих изображений. Для формирования баллистического прогноза предлагается использовать метод наименьших квадратов и методы динамической фильтрации данных. Для формирования карты риска автором разработаны оригинальные алгоритмы яркостной обработки изображений. Автор, применив вышеперечисленные методы, решает поставленные задачи, находя в итоге решение, удовлетворяющее заданным требованиям.

Для верификации автор использует методы математического моделирования. Причем, осуществляется несколько этапов данного моделирования. Первый проводится с использованием топографических и отражательных моделей небесных тел. Второй этап реализуется на наземных стендах, формирующих изображение небесного тела, попадающее в объектив оптических камер, а также на макетах поверхности безатмосферных тел. Третий этап отработки алгоритмов проводится уже на данных реальных космических съемок. В качестве таких данных для поверхности Земли использовались результаты съемок комплекса многозональной

спутниковой съемки КА «Метеор-М». Для Луны использовались открытые изображения, полученных камерами съемочной системы КА Lunar Reconnaissance Orbiter, а также результаты съемок камеры КА «Луна-25».

Основное содержание, результаты работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, а также списка литературы. Во введении приведена общая характеристика работы. Обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, приведен обзор основных достижений в области навигации космических аппаратов с использованием оптических съемочных систем. Обосновываются научная новизна и практическая значимость работы. Сформулированы результаты, выносимые на защиту. Приведены сведения о достоверности, об апробации работы и публикациях.

В первой главе диссертации Жукова Б.С. представлены используемые в работе системы координат и системы отсчета времени. Обосновывается выбор используемых геометрических моделей планет и прочих малых тел Солнечной системы, исследуются их отражательные характеристики. Также приводятся основные принципы автономной оптической навигации, которые далее используются в работе. Автором предлагается использовать два основных метода оптических навигационных измерений. Первый метод основан на детектировании дуги горизонта на изображении и определения по ней направления на центр тела и его углового размера. Показано, что такой подход позволяет грубо оценить положение КА на орбите для того чтобы ограничить объем вычислений для второго из предлагаемых подходов. Второй метод навигационных измерений основан на детектировании заранее известных контрольных точек на получаемых изображениях и определения направления на них методом обратной засечки. Такой подход является наиболее прецизионным методом оптической навигации и может применяться для решения задач, связанных с точным определением положения космического аппарата на орбите выбранного небесного тела, в том числе для осуществления посадки на это тело.

Во второй главе приводится методология оптической навигации по горизонту небесного тела. В частности, рассматриваются основы навигационных измерений по центру яркости тела и приводятся ограничения данного метода. Делается вывод, что при размере изображения небесного тела более ~ 10 пикселей целесообразно использовать навигационные измерения по горизонту тела и далее по контрольным точкам. Приводится постановка задачи навигации по детектированной линии горизонта. Иллюстрируются принципы формирования изображения горизонта на измерительной матрице камеры, делается вывод, что ввиду оптических искажений оценку углового размера тела и направления на его центр непосредственно по изображению проводить неудобно, гораздо более целесообразно находить параметры конуса, образуемого векторами направления на точки горизонта во внутренней системе координат камеры. Формулируются принципы аппроксимации таким конусом дуги горизонта для сферических и эллиптических тел. Демонстрируется метод, позволяющий отличить линию горизонта от линии терминатора. В конце главы приводится алгоритм навигационных измерений по горизонту, а также оценивается точность, которую возможно достичь с использованием данного метода. Для оценки точности применяются модельные изображения Луны. Делаются выводы что в диапазоне высот 50-200 км среднеквадратичные ошибки оценки координат подспутниковой точки описанным методом составляют 1-6 км, а высоты КА – 2-3 км.

В третьей главе рассматриваются алгоритмы, используемые при оптической навигации по контрольным точкам и относительным ориентирам. Приводятся математические основы данного метода, рассматриваются различные случаи: когда ориентация камеры измеряется независимо и когда эта ориентация измеряется совместно с оценкой положения космического аппарата. Делаются выводы что независимое измерение ориентации аппарата, например, с использованием звездных датчиков, существенно увеличивает точность измерений вектора его координат в планетоцентрической системе координат. Дополнительно рассматриваются также принципы навигации по относительным ориентирам, когда для определения координат используются не только заранее известные контрольные точки, а в том

числе контрастные объекты, автоматически детектированные на предыдущих изображениях с камеры. Анализируются критерии выбора контрольных точек и относительных ориентиров, а также их дескрипторов. Делается вывод о преимуществе использования дескриптора SURF-64. В конце главы приводятся алгоритмы навигации по контрольным точкам и относительным ориентирам и обсуждаются принципы формирования каталогов контрольных точек различных небесных тел для целей автономной оптической навигации.

В четвертой главе описывается фотометрический метод автономного выбора места посадки космических аппаратов. Для этого анализируются основные требования к месту посадки и делается вывод, что необходимо избегать уклонов выбранной площадки более 7° и выступов или камней высотой более 30 см. Для Луны анализируется распределение кратеров на ее поверхности и показывается, что ввиду ограниченности возможностей горизонтального маневра аппарата, необходимо по полученным с орбиты снимкам выбирать для посадки район без больших кратеров и других неровностей рельефа, а выбор конкретной площадки для посадки проводить автономно в процессе спуска. Выбор конкретной точки посадки происходит на основе построения карты риска, которая характеризует пригодность поверхности для посадки. По этой карте выбирается оптимальное место посадки. Рассматриваются различные подходы к выбору места посадки и принципы построения карты риска. Приводятся критерии определения неровностей рельефа по изображениям и рассматривается влияние теней на детектирование этих неровностей. В конце главы приводится, предлагаемый автором, алгоритм построения фотометрической карты риска и обсуждаются возможности комбинирования фотометрической карты риска с априорными картами наклонов поверхности.

В пятой главе описывается применение продемонстрированных ранее в 2 и 3 главах подходов в целях осуществления автономной оптической навигации на трассах перелета и околопланетных орбитах. Формулируются задачи и требования к оптической навигации на данных участках полета. Далее детально рассматривается оптическая навигационная система, которую предполагается использовать на

перспективном транспортном корабле. Рассматриваются характеристики камер, входящих в данную систему, отдельно уделяется внимание принципам тестирования и отработки данной системы на наземном стенде. Приводится методология наземной геометрической и радиометрической калибровки камер, рассматриваются режимы их работы, оцениваются предельные погрешности измерений координат космического аппарата с использованием данной системы. Делается вывод что по результатам отработки на стенде среднеквадратичные ошибки измерений на окололунной орбите при измерениях по горизонту не превышают 2-3 км, а при измерениях по контрольным точкам не более нескольких сотен метров, ошибки по высоте примерно в 2 раза больше. На трассе перелета Земля-Луна ошибки измерений также имеют приемлемую величину. Далее в главе рассматривается отработка оптической навигационной системы по реальным космическим снимкам, полученным со спутников «Метеор-М», делается вывод о работоспособности предложенных в работе алгоритмов. Для верификации предложенного подхода для окололунных орбит дополнительно проводилась проверка по изображению, полученному камерой из телевизионной системы КА «Луна-25».

Шестая глава посвящена автономной оптической навигации при посадке на поверхность тел солнечной системы. Рассматриваются задачи оптической навигации, отдельное внимание уделяется стенду натурного моделирования изображений шероховатых поверхностей. Рассматривается применение телевизионной системы навигации и наблюдения в проекте «Фобос-Грунт» для навигации при посадке космического аппарата на поверхность Фобоса. Показано, что на наземном стенде подтверждена точность стереоизмерения высоты не хуже ~ 1 м на высоте 100 м, далее ошибки измерений уменьшаются пропорционально квадрату высоты. Для миссии «Луна-27» определен состав и характеристики телевизионной системы навигации и наблюдения, используемой при посадке на поверхность Луны. Приводятся результаты моделирования работы предложенной системы на этапах основного и прецизионного торможений. По реальным и синтетическим изображениям поверхности Луны демонстрируется расчет карты риска и выбор предпочтительной площадки для посадки. Делается вывод, что

использование предложенного подхода позволяет уменьшить вероятность посадки на опасные уклоны до 3%.

Оценивая выполненную автором работу, можно сделать вывод, что она, безусловно, обладает **научной новизной**, а именно:

1. Автором предложен новый метод автономных навигационных измерений по горизонту планеты с помощью телевизионных систем. Метод учитывает все основные эффекты: геометрические свойства камеры, наличие терминатора, форму тела, наличие помех, ограничение поля зрения и др. Также новизной обладают предложенные автором принципы оценки точности этого метода, на окололунных орбитах и на трассе перелета Земля-Луна;
2. Метод навигации по контрольным точкам был оптимизирован автором и был впервые применен для проведения измерений в реальном времени на мощностях бортовых вычислителей КА. Автором было предложено использовать трехмерные модели контрольных точек, что обеспечивает автоматическую адаптацию к изменению структуры изображения контрольных точек в зависимости от условий освещения. Новизной обладают в том числе предложенные автором принципы оценки точности этого метода на окололунных орбитах;
3. Разработанный автором алгоритм построения специализированных каталогов контрольных точек на основе топографических моделей небесных тел позволил впервые сформировать такой каталог для Луны;
4. Предложенный автором метод комбинированной навигации по контрольным точкам и относительным ориентирам имеет ряд преимуществ по сравнению с методами, применяемыми в других космических миссиях. В частности, предложенный метод инвариантен к условиям освещения, учитывает высоту рельефа и перспективные искажения, помимо этого происходит значительная экономия памяти бортового вычислителя. Новизной обладают принципы оценки точности этого метода на траектории подлета к местам посадки на Луну;

5. Продемонстрированная автором методика комбинирования навигационных измерений по горизонту и по контрольным точкам также ранее нигде не применялась. Суть методики заключается в определении первоначального положения КА по линии горизонта, и дальнейшем уточнении по контрольным точкам. Новой является реализующая эту методику концепция полностью автономной оптической навигационной системы, состоящей из звездных датчиков, а также широкоугольной и узкоугольной камер;
6. В методе построения фотометрической карты риска с целью выбора наиболее ровной площадки для посадки КА новыми являются результаты исследования автора связи относительной дисперсии яркости площадки с характеристиками кратеров, а также оптимизация разрешения съемочной системы для использования этой характеристики.

Достоверность полученных результатов обеспечивается проведенным автором математическим моделированием и результатами стендовой отработки реальных приборов космических систем, предназначенных для перспективного транспортного корабля, КА «Фобос-Грунт», КА «Луна-27». Также достоверность результатов подтверждается путем обработки данных реальных космических съемок.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов заключается в их потенциальном использовании на разрабатываемом перспективном транспортном корабле и планируемой миссии «Луна-27». Описанные автором методы оптической навигации позволяют повысить надежность и безопасность полетов к Луне, Марсу, Венере, а также другим планетам и малым телам Солнечной системы, предусмотренных Федеральной космической программой. За счет использования предложенных автором алгоритмов повышается надежность и безопасность космических миссий, так как резервируются традиционные наземные радиотехнические измерения и измерения аппаратуры спутниковой навигации. Использование предложенных автором алгоритмов для

выбора площадки для посадки позволяет значительно повысить вероятность успешной посадки и реализации миссии в целом. Алгоритмы, разработанные автором, являются универсальными с точки зрения их использования на различных космических аппаратах. В частности, ряд описанных в работе алгоритмов были применены при обработке результатов реальных космических съемок, полученных со спутников «Метеор-М», а также камерой телевизионной системы КА «Луна-25».

Замечания к работе:

1. В диссертации на стр. 30 представлено не совсем удачное определение орбитальной системы координат, в котором ось В, являющаяся перпендикуляром к плоскости орбиты дополняет систему RNB до правой тройки. Лучше при определении этой системы совместно с осью, направленной по радиус вектору, использовать направление противоположное вектору угловой скорости орбитального движения (кинетического момента) как вторую из осей, а ось, направленную в сторону вектора скорости движения определять, как дополнение до правой тройки, так как данная формулировка однозначно задает положение всех трех осей;
2. На стр. 32 указано что для крупных небесных тел (например, Луны) более детальная модель, учитывающая рельеф поверхности, могла бы повысить точность навигационных измерений по горизонту, однако это было бы связано со слишком большими вычислительными затратами и по точности не превзойдет точность навигационных измерений по контрольным точкам. Однако не дает ли такая модель преимуществ при проведении оптических измерений в тени?;
3. На стр. 105 в формуле (3.19) в знаменателе должно присутствовать выражение $(1+k e_z^2)$;
4. На стр. 128 имеется формула (4.1) для радиального профиля кратера. Для упрощения понимания данной формулы необходимо было далее по тексту привести график данной функции;

5. На стр.191 рис. 5.14 не в полной мере иллюстрирует расчет пересечения луча наблюдения с поверхностью небесного тела, в частности на рисунке не указаны точки L_1 , L_2 интервал L_0 ;
6. В работе имеется значительное количество опечаток, несогласованных фраз и неверных окончаний, в частности на стр. 40 имеется фраза «угловая зависимость функции (1.2) близка в функции (1.1)», должно быть «угловая зависимость функции (1.2) близка к функции (1.1)»; на стр. 43 имеется фраза «перехода из ВСК в инерционную систему координат (ИСК)», должно быть «перехода из ВСК в инерциальную систему координат (ИСК)»; на стр. 104 присутствует фраза «имеется достаточной количество КТ», а должно быть «достаточное количество КТ», там же фраза «подлете к району посадки к на Луну», должно быть «подлете к району посадки на Луну» и др.

Указанные недостатки не влияют на общую положительную оценку работы. Автор при выполнении диссертационного исследования показал глубокие знания в вопросах цифровой обработки изображений и навигации космических аппаратов, а также проявил высокий уровень математической культуры.

Заключение.

Автореферат соответствует диссертации.

Диссертация Жукова Бориса Сергеевича «Автономная оптическая навигация космических аппаратов на околопланетных орбитах», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук является научно-квалификационной работой, в которой сформулирована и решена научная проблема, имеющая важное значение для развития теоретических и практических методов проектирования систем управления КА. Внедрение полученных результатов позволит значительно расширить возможности указанных систем, что имеет важное хозяйственное значение при создании современных КА различного назначения, в том числе для исследования дальнего космоса.

Считаю, что диссертационная работа Б.С. Жукова «Автономная оптическая навигация космических аппаратов на околопланетных орбитах» удовлетворяет требованиям Положения ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.2.1 – «Физика космоса, астрономия (технические науки)», а ее автор – Жуков Борис Сергеевич – заслуживает присуждения ему искомой степени.

Сумароков Антон Владимирович

Адрес: Публичное акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва» (ПАО «РКК «Энергия»)
141070, г. Королёв, Московская обл., ул. Ленина, д. 4А, официальный сайт:
<https://www.energia.ru/ru/>, тел.: 8 (495) 513-86-55, post@rsce.ru.

Ученый секретарь
ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва»
доктор физико-математических наук

/ Хатунцева О.Н./