

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Чебакова Евгения Владимировича

на тему: «Разработка метода определения углового положения космического аппарата на основе анализа внешних тепловых потоков»

по специальности: 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

на соискание ученой степени кандидата технических наук

В представленной для отзыва диссертационной работе рассматривается возможность определения угловой ориентации космического аппарата (КА) либо по уровню тепловых потоков, падающих на фрагменты внешней поверхности аппарата, либо по значениям температуры этих фрагментов. Первый случай основан на решении обратной задачи по восстановлению направлений на внешние источники тепла – Солнце и ближайшую планету по уровню тепловых потоков на разно ориентированные плоские поверхности. Во втором случае дополнительно должны быть восстановлены тепловые потоки по значениям температуры этих поверхностей.

Корректная ориентация космического аппарата является необходимым условием функционирования таких критически важных его систем как система обеспечения теплового режима, система энергоснабжения, система радиосвязи. Таким образом, от знания ориентации зависит сама возможность реализации космической миссии.

За время космической эры был создан целый набор приборов и систем ориентации – звездные и солнечные датчики, инфракрасные вертикали, радио- и оптические средства траекторных измерений, адаптированные для космоса приборы GPS и ГЛОНАСС навигации. Не смотря на это проблему определения ориентации КА нельзя считать окончательно решенной. Это подтверждают известные аварии знаковых космических миссий, связанные с потерей ориентации. Последней подобной аварией была утрата уникального японского космического телескопа HITOMI (Astro-H) в 2016 г.

Каждое из вышеперечисленных устройств ориентации обладает своими недостатками. Так, наиболее универсальный прибор – звездный датчик имеет достаточно низкую радиационную стойкость, и его сложно адаптировать для мини- и микроспутников из-за существенных габаритов и электропотребления. Поэтому решаемая соискателем задача, направленная на создание системы определения ориентации, обладающей абсолютной радиационной стойкостью, малыми массогабаритными характеристиками и незначительным энергопотреблением, безусловно, является **актуальной**. Несмотря на небольшую точность, тепловая система определения ориентации может дополнять звездные датчики в качестве аварийной или резервной системы или выполнять роль основной системы для малогабаритных спутников, не требующих точного знания ориентации.

Проблематика тепловой системы ориентации является достаточно необычной. Если при реализации большинства новых идей сначала решаются теоретические проблемы, а потом, с

большим отставанием создаются технологии для аппаратной реализации идеи, то для тепловой системы ориентации, напротив, практически все аппаратные проблемы решены, но при этом отсутствуют алгоритмы, которые позволяют предельно достоверно, быстро и однозначно восстановить направления из значений температуры тепловых датчиков. То есть в этой задаче баланс исследований в значительной мере смещен в теоретическую область.

Соответственно, представленная работа имеет явно выраженную теоретическую направленность. При этом для создания искомого алгоритма необходимо привлечение знаний из разных областей науки – термодинамики, небесной механики, планетологии, физики космоса. Поэтому в первой главе, наряду с формулировками задач работы, автор собрал исходные математические модели – тепловые, баллистические и адаптированные для планет Солнечной системы радиационно-геометрические. Кроме этого, в данной главе приведены основные характеристики естественных тепловых потоков в космическом пространстве.

Наибольшую ценность работы и ее **новизну** составляет вторая глава. В ней представлен новый математический алгоритм восстановления направлений на источники тепла путем решения обратной тепловой задачи. Для этого алгоритма автор впервые использовал сочетание двух методов – метода сопряженных направлений и метода случайных рестартов. Первый обеспечивает высокую устойчивость и производительность расчетов, второй – однозначность результатов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов в работе подтверждается результатами исследований разработанного алгоритма, тестирующих его с разных точек зрения. Данные исследования включают описанные в третьей главе численные эксперименты с генерацией данных, имитирующих измерения; исследования возмущений параметров математических моделей. Результаты физического эксперимента, подтверждающего функциональность разработанного алгоритма, представлены в четвертой главе. Кроме того, в четвертой главе сделан обзор возможных средств измерения теплового потока и анализ их применимости для тепловой системы определения ориентации, что является важным для практической реализации результатов работы.

Большой объем проведенного в работе моделирования разной направленности позволил автору осуществить ряд базовых калибровок алгоритма. В частности было определено минимальное количество рестартов, позволяющее гарантированно получить единственное решение задачи. Результаты моделирования также позволили поставить общие ограничения на максимально достижимую точность метода определения ориентации по потокам.

Значимость полученных автором результатов в значительной мере определяется актуальностью разрабатываемой темы. **С точки зрения теории** наибольшую значимость имеет алгоритм восстановления направлений. Как продемонстрировали исследования соискателя, используемая в данном алгоритме совокупность двух взаимно дополняющих друг друга методов представляется наиболее подходящей для решения поставленной радиационно-геометрической обратной задачи.

Практическая значимость определяется тем, что проведенные исследования представляют со-

бой необходимый и один из самых важных этапов на пути реальной реализации тепловой системы определения ориентации.

Все вышеизложенное относится к явно выраженным **достоинствам работы**. Кроме этого, в качестве положительной черты диссертации можно отметить ясный, последовательный и не перегруженный избыточными рассуждениями стиль изложения.

Однако работа не лишена **недостатков**. В качестве таковых можно выделить следующие составляющие диссертации.

Для исследования алгоритма восстановления углов соискателем проведен численный эксперимент, в котором используется квазиэкспериментальные данные, полученные на основании математического моделирования. Однако при этом и для имитации эксперимента, и для алгоритма восстановления используются одни и те же простые математические тепловые модели датчиков. При таком подходе вероятность заведомо успешного результата численного эксперимента чрезвычайно высока. Для достижения независимости «экспериментальной» и математической составляющих целесообразно для этих составляющих применять разные типы математических моделей. Например, для генерации данных, имитирующих измерения при эксперименте, могут быть использованы конечно-элементные модели.

Автор применяет достаточно прогрессивную модель для расчета отраженного от планеты лучистого потока. В отличие от большинства подобных моделей в ней, кроме диффузной учитывается зеркальная составляющая. В качестве критерия перехода от одной составляющей к другой автор выбрал граничное значение угла между направлениями на Солнце и на точку наблюдения из центра планеты равное 60-ти угловых градусов. Качественное рассмотрение процесса отражения показывает, что возможно это заниженная оценка, по крайней мере она требует дополнительного обоснования.

Для демонстрации работы предложенных алгоритмов восстановления углового положения космического аппарата соискатель вполне оправдано применяет простейшие математические модели тепловых датчиков ориентации, поскольку любое их усложнение сделает математическую интерпретацию этих алгоритмов трудно воспринимаемой. Затем автор исследует влияние погрешностей параметров модели на точность определения углов ориентации. Однако такая последовательность является не достаточной для оценки значимости каждой погрешности в реальных условиях возможного применения тепловых датчиков ориентации. По моему мнению, целесообразно добавить еще одну процедуру, в которой должна быть использована совместная модель системы датчиков с космическим аппаратом, имеющим разные варианты геометрии и термооптических характеристик. Это позволило бы оценить реальные значимости погрешностей, вносимых в определение углового положения различными конфигурациями аппаратов.

Не вполне удачно представлена методика, используемая в экспериментальной части работы. Из ее описания можно понять, как изменялась ориентация датчиков в вакуумной камере, как измерялась их температура и рассчитывался тепловой поток на их поверхность. Однако не совсем

ясно как восстанавливалось их угловое положение, поскольку не приведены данные об источнике излучения, позволяющие определить угловой коэффициент датчика по отношению к источнику, а также не описано как учитывалась погрешность, вносимая тепловым потоком от неохлаждаемых стенок вакуумной камеры.

Однако все эти замечания носят частный характер, не снижают общего высокого уровня представленной работы и являются скорее пожеланиями соискателю по дальнейшим направлениям исследований.

Таким образом, диссертация Чебакова Евгения Владимировича является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи по разработке и исследованию алгоритма для метода определения ориентации космического аппарата по плотности потока излучения, падающего на его внешнюю поверхность. Полученные результаты являются актуальными, новыми, научно обоснованными, имеют высокую теоретическую и практическую значимость. Автореферат диссертации соответствует содержанию диссертационной работы.

В целом диссертационная работа Чебакова Евгения Владимировича соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент,

заведующий лабораторией Астрофизических рентгеновских детекторов и телескопов,
доктор технических наук



Николай Петрович Семена

Подпись Семены Н.П. удостоверяю,

заместитель директора, доктор физико-математических наук, профессор РАН



Александр Анатольевич Лутовинов

27 ноября 2020 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН); адрес: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32; тел.: +7(495) 333-52-12, факс: +7(495) 333-12-48; e-mail: iki@cosmos.ru; сайт: www.iki.rssi.ru

С отз. о работе ознакомлен
В. Чебаков
11.12.2020