

Ученому секретарю диссертационного  
совета Д 002.024.01

доктору физико-математических наук  
Т.А. Полиловой

125047, г. Москва, Миусская пл., 4

### О Т З Ы В

официального оппонента Лемака Степана Степановича о диссертации Панкратова Владимира Александровича «Применение фильтрации Калмана в задачах определения вращательного движения спутников», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика

Диссертация В. А. Панкратова посвящена актуальной проблеме механики космического полета – реконструкции вращательного движения космических аппаратов (КА) по данным измерений бортовых датчиков.

Знание фактического вращательного движения КА необходимо для решения очень большого числа задач, в частности поведение квазистатических микроускорений определяющим образом влияет на космические эксперименты с гравитационно-чувствительными процессами, например, на выращивание полупроводниковых кристаллов из расплава.

На достаточно жестком КА квазистатические микроускорения наиболее точно определяются расчетным путем по реконструкции фактического движения этого КА, полученной результате обработки показаний его бортовых датчиков. К числу таких КА относятся и научные спутники серии «Фотон», движение одного из которых автор реконструирует в своей диссертации.

Поскольку космические эксперименты с гравитационно-чувствительными системами и процессами выполняются в течение продолжительного времени, необходимо иметь методы, позволяющие строить непрерывную реконструкцию вращательного движения спутника на промежутках времени в несколько десятков часов. В диссертации предлагаются математические модели и алгоритмы, которые позволяют решить эту задачу, как для управляемого, так и неуправляемого режимов полета. В свете сказанного тема диссертации В. А. Панкратова представляется актуальной.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 53 наименований. Общий объем диссертации составляет 125 страниц. Диссертация качественно оформлена, снабжена достаточным количеством иллюстраций. Структура работы логична и отвечает задачам исследований.

В первой главе сравниваются два подхода к реконструкции неуправляемого вращательного движения низкоорбитального КА на

продолжительном отрезке времени. Оба подхода основаны на обработке данных измерений напряженности магнитного поля Земли (МПЗ). Первый подход – традиционный. Он заключается в реконструкции движения на сравнительно коротких – продолжительностью несколько часов – отрезках времени с помощью метода наименьших квадратов. В рамках предложенной методики данные магнитных измерений, полученные на некотором отрезке времени, обрабатываются совместно с помощью интегрирования полных (динамических и кинематических) уравнений вращательного движения спутника. Реконструкцией движения КА на обрабатываемом отрезке считается решение уравнений движения, наилучшим образом, согласующее данные измерений с их расчетными аналогами в рамках принятой математической модели. Реконструкция движения на продолжительном временном отрезке получается сшивкой реконструкций на нескольких коротких отрезках, причем соседние отрезки должны иметь пересечение не менее 10 мин, чтобы проконтролировать точность сшивки.

Следует отметить, что автор несколько модифицировал традиционный подход. В частности, он отказался от предварительного сжатия данных измерений. Он включает в обработку все измерения, интегрирование уравнений движения выполняет с оптимальным шагом, а расчетные аналоги измерений вычисляет в точках их выполнения с помощью полиномов, интерполирующих вычисляемое решение внутри шага интегрирования. Второй подход предложен диссертантом. Он основан на применении дискретного фильтра Калмана и так называемом RTS-сглаживании, обеспечивающем дополнительное сглаживание найденных оценок.

Применению фильтра Калмана в задачах реконструкции движения КА по данным магнитных измерений посвящено большое число работ. Однако В. А. Панкратов сумел здесь найти свою нишу. Новизна предложенной им методики заключается в оригинальном учете нелинейности модели объекта и алгоритме вычисления расчетных аналогов измерений с помощью интерполяционного полинома. Платой за произвольность длины вектора измерений состоит в решении на каждой итерации алгоритма системы нормальных уравнений, порядок которой равен размерности вектора состояния. Заметный выигрыш, который дает применение фильтрации Калмана по сравнению с первым подходом, – возможность использования более простых уравнений движения. В фильтре Калмана допускается и учитывается неточность используемой математической модели объекта. Точность реконструкции движения при этом практически не ухудшается. Автор проиллюстрировал разработанные им алгоритмы обработкой реальных магнитных измерений, выполненных на «Фотоне М-3».

Во второй главе аналогичным образом сравниваются два подхода к реконструкции управляемого вращательного движения низкоорбитального КА. В данном случае реконструкция основана на измерениях двух видов – измерениях вектора угловой скорости КА и измерениях напряженности МПЗ.

Измерения каждой компоненты угловой скорости сглаживаются тригонометрическим полиномом и используются для решения кинематических

вращательного движения КА. Аппроксимация фактического движения КА находится из условия наилучшего (в рамках метода наименьших квадратов) согласования данных измерений вектора напряженности МПЗ с их расчетными аналогами.

Второй подход использует фильтрацию Калмана. Автором предложена оригинальная реализация фильтра, связанная со специальными методами пересчета вектора состояния на этапе прогноза.

Методы второй главы, в особенности первый подход, позволяют решить важную задачу верификации полных уравнений вращательного движения КА и основанных на них методик первой главы.

В третьей главе описана методика проверки согласованности показаний двух трехкомпонентных магнитометров, установленных на борту КА. Перед обработкой магнитных измерений с помощью сложных алгоритмов желательно провести предварительную оценку их точности простыми средствами. Для этого существует несколько методик, в диссертации рассматривается реализация одной из них. На КА серии «Фотон» использовались системы из нескольких магнитометров, установленных внутри спускаемой капсулы. Поскольку эти КА содержали большое количество электрических цепей, магнитометры могли измерять МПЗ с большой ошибкой. Предлагаемая методика предназначена для обнаружения этого обстоятельства.

Сама по себе методика стандартна, но факт ее реализации и успешного применения (на упомянутых КА не все магнитометры измеряли МПЗ с одинаковой точностью, измерения неточных магнитометров не использовались) – заслуга диссертанта.

Полученные в диссертационной работе результаты - методики применения нелинейной калмановской фильтрации к задачам реконструкции вращательного движения КА - являются новыми и отвечают целям и задачам, поставленным в работе.

Практическая ценность работы подтверждена внедрением полученных в ней результатов в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, МГТУ им. Баумана, ФГУП «ЦСКБ- Прогресс». На основе разработанных автором методик построена непрерывная реконструкция фактического вращательного движения КА «Фотон М-3».

Вместе с тем по тексту диссертации необходимо сделать следующие замечания:

1. В работе отсутствует строгое описание постановки задачи метода наименьших квадратов в задаче реконструкции неуправляемого движения. В частности не приведены предположения об инструментальных погрешностях измерительных приборов, позволяющие использовать предложенный автором функционал качества.

2. Приведенный в работе вывод уравнений фильтра Калмана дан при менее общих предположениях, чем те, которые известны в литературе. При выводе соотношений этапа коррекции не указаны критерии качества, из которых можно получить коэффициенты обратной связи фильтра.

3. Не исследуется вопрос об условиях принципиальной возможности оценки фазовых координат по магнитным измерениям в исследуемой задаче, т.е. не проводится анализ наблюдаемости.

4. В работе отсутствует обсуждение численных аспектов реализации фильтра Калмана, в частности применение известного подход, основанного на использовании «квадратного корня» из матрицы ковариации ошибки оценки.

Однако перечисленные замечания не снижают положительной оценки диссертации.

По теме диссертационной работы опубликовано 10 работ, среди которых имеется 3 статьи, опубликованных в журналах перечня ВАК. Основные положения диссертации докладывались и получили одобрение на научно-практических семинарах и конференциях. Широкая апробация полученных результатов не подлежит сомнению.

Автореферат полно передает основное содержание диссертационной работы и оформлен в соответствии с требованиями ВАК.

Диссертация В. А Панкратова представляет собой законченную научно-квалификационную работу высокого уровня. В ней удачно сочетаются интересные практические результаты с оригинальными методическими приемами при реализации нелинейного фильтра Калмана и других статистических методик, применяемых в прикладной небесной механике. Диссертант В. А Панкратов зарекомендовал себя квалифицированным научным работником, способным решать сложные задачи теоретической механики. Диссертация В. А Панкратова может послужить стартовой точкой для дальнейших исследований.

На основании изложенного считаю, что диссертация «Применение фильтрации Калмана в задачах определения вращательного движения спутников» удовлетворяет требованиям Положения ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика, а ее автор – Панкратов Владимир Александрович – заслуживает присуждения ему искомой степени.

Официальный оппонент  
Доктор физико-математических наук

  
С.С. Лемак

"\_5\_" июня 2014 г.

Подпись Лемака С.С. заверяю:

И.о.декана механико-математического ф-та МГУ  
Проф. В.Н. Чубариков

