

## ОТЗЫВ

научного руководителя о диссертации В. А. Панкратова «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 задачам реконструкции фактического вращательного движения искусственных спутников Земли (ИСЗ) научного назначения по данным измерений бортовых датчиков. Такая реконструкция необходима, в частности, для анализа квазистатических остаточных микроускорений, имевших место во время проведения космических экспериментов с гравитационно-чувствительными процессами. Специфика экспериментов требует построения непрерывной реконструкции вращательного движения спутника на продолжительных интервалах времени, что предъявляет особые требования к применяемым методам. В диссертации рассмотрены три задачи.

Первая задача связана с мониторингом микрогравитационной обстановки на спутниках, совершающих неуправляемый полет. В качестве объекта выбраны спутники серии «Фотон». Мониторинг квазистатических микроускорений на последних спутниках этой серии выполнялся следующим образом. Сначала по измерениям бортовых датчиков, главным образом магнитометров, полученным на некотором отрезке времени, строилась реконструкция вращательного движения спутника на этом отрезке. Затем вдоль найденного движения микроускорение в заданной точке борта рассчитывалось по известной формуле в функции времени. Реконструкция движения строилась методом наименьших квадратов с использованием решений полных уравнений вращательного движения спутника. Отрезки времени, на которых эти уравнения позволяли построить адекватную реконструкцию, имели длину от одного до пяти орбитальных витков. Эта длина возрастала вместе с модулем угловой скорости спутника. Чтобы получить представление о микроускорениях и движении спутника в течение всего полета, движение реконструировалось на нескольких десятках таких отрезков. В данной работе предлагается методика реконструкции движения, пригодная для отрезка произвольной длины. Методика построена на основе фильтра Калмана, применение которого позволило, помимо всего прочего, воспользоваться и более простыми уравнениями движения. Предварительно описан новый вариант методики реконструкции неуправляемого вращательного движения спутника по магнитным измерениям методом наименьших квадратов, который существенно использован при построении фильтра Калмана. Приводятся результаты сравнения обеих методик на данных, полученных в полете ИСЗ «Фотон-М3».

Вторая задача связана верификацией математических моделей движения, используемых при решении первой задачи. Чтобы проверить эти модели, рекон-

струкция движения выполнялась с помощью методики, основанной только лишь на кинематических уравнениях вращательного движения твердого тела. Для применения этой методики необходимы два вида измерений – измерения угловой скорости и измерения какого-либо датчика ориентации. В диссертации в качестве второго вида измерений использованы показания магнитометров. В рамках этой методики данные измерений обоих видов, собранные на некотором отрезке времени, обрабатываются совместно. Измерения угловой скорости сглаживаются тригонометрическими полиномами, которые подставляются в кинематические уравнения – уравнения Пуассона для элементов матрицы перехода от системы координат, связанной со спутником, к гринвичской системе координат или уравнения для компонент соответствующего кватерниона. Полученные таким образом уравнения представляют собой кинематическую модель вращательного движения спутника. Решение этих уравнений, реконструирующее фактическое движение, находится из условия наилучшего в смысле метода наименьших квадратов согласования данных измерений вектора напряженности магнитного поля Земли с его расчетными значениями. Реконструкция, выполненная для спутников «Фотон-12», «Фотон-М2» и «Фотон-М3», показала приемлемую точность моделей, использованных при решении первой задачи.

Поскольку в дальнейшем полет спутников научного назначения будет ориентированным (ориентация спутников солнечными батареями на Солнце будет поддерживаться двигателями маховиками или гироскопами), методика мониторинга, основанная на кинематических уравнениях, станет основной. Для нее возникнет ситуация, упомянутая при описании первой задачи. В связи с этим в диссертации рассматривается применение фильтра Калмана для кинематической модели с двумя видами измерений – угловой скорости и магнитных.

Третья задача связана с проверкой точности бортовых магнитометров. Обработка данных измерений магнитного поля Земли, полученных на борту ИСЗ, обычно выполняется с использованием достаточно сложных математических моделей. Предварительно желательно провести проверку имеющихся данных простыми средствами. Если измерения проводились одновременно несколькими магнитометрами, то в качестве такой проверки можно использовать проверку геометрической согласованности их показаний. Если проверка оказывается успешной, то в результате удастся оценить постоянные смещения в измерениях и матрицы перехода между собственными системами координат магнитометров. В данной работе описана методика проверки согласованности измерений двух магнитометров. Приведены примеры ее применения при обработке данных, полученных аппаратурой «Мираж», на спутниках «Фотон М-2» и «Фотон М-3».

Диссертация выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу. Ее новизна обусловлена уникальностью решаемых задач, что потребовало разработки и исследования ряда математических моделей вращательного движения искусственных спутников,

развития новых приемов определения такого движения по данным измерений и адаптации известных методов к новым ситуациям. Достоверность результатов подтверждена методами теоретической механики, математической статистики и вычислительной математики. Диссертант зарекомендовал себя научным работником, способным решать сложные практические задачи.

По-моему, 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 искомой степени.

Научный руководитель  
д. ф.-м. н., проф., чл.-корр. РАН



А. П. Крищенко

Подпись Крищенко А.П.



Зам. начальника Управления кадров



А. А. Федотов