

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию 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

Рассматриваемые в диссертации задачи реконструкции фактического вращательного движения искусственных спутников Земли (ИСЗ) по данным измерений бортовых датчиков являются актуальными. Они имеют множество приложений. В диссертации их решение нацелено на получение исходной информации для расчета квазистатических микроускорений на борту ИСЗ, имевших место при проведении некоторых космических экспериментов.

В диссертации – три главы. В первой главе диссертант рассматривает реконструкцию полета спутника в неуправляемом режиме по данным бортовых измерений магнитного поля Земли (МПЗ). Существует ряд подходов к решению данной задачи. Решения, предложенные в диссертации, позволяют получить непрерывную реконструкцию вращательного движения ИСЗ на продолжительных временных отрезках. Ранее подобные задачи решались при помощи алгоритмов, основанных на методе наименьших квадратов (МНК), в частности, так были получены реконструкции фактического движения ИСЗ «Фотон-12», «Фотон М-2» и «Фотон М-3».

В методиках, основанных на МНК, применялись сложные динамические уравнения движения ИСЗ, но даже с использованием таких уравнений достаточно точная реконструкция была возможна на сравнительно коротких (несколько орбитальных витков) отрезках времени. Чтобы получить представление о микроускорениях и движении спутника на длительных промежутках времени, движение реконструировалось на нескольких десятках таких отрезков, причем соседние отрезки имели пересечение около 10 мин. Сравнение смежных реконструкций на пересекающихся частях соседних отрезков позволяло контролировать их точность. В первой главе приведены примеры таких реконструкций для «Фотона М-3». Их назначение – описать в простых ситуациях некоторые математические модели и вычислительные приемы, используемые в алгоритмах фильтрации Калмана и дать материал для сравнения с реконструкциями, построенными по этим алгоритмам.

Для построения непрерывной реконструкции движения на продолжительном отрезке времени диссертант предложил оригинальные варианты нелинейного дискретного фильтра Калмана и последующего RTS-сглаживания. Используемая в них математическая модель вращательного движения спутника основана на полных уравнениях движения, в которых учитываются гравитационный и восстанавливающий аэродинамический моменты, а также гиросtatический момент внутренних устройств спутника (вентиляторов, роторов и т. п.). Фильтр реализован в двух вариантах. Значения вектора состояния вычисляются на временной сетке, которая имеет либо постоянный шаг, либо ее узлы разграничивают оптимальные по точности шаги

численного интегрирования уравнений движения спутника. Переход от одного узла сетки к следующему выполняется посредством интегрирования уравнений движения. При этом методом наименьших квадратов обрабатываются измерения, попавшие внутрь промежутка между узлами. Переход заключается в последовательности итераций, которые прекращаются после достижения наилучшей согласованности обрабатываемых измерений.

В качестве процедуры численного интегрирования в рассматриваемой реализации фильтра применяется DOP853. Она реализует явный метод типа Рунге-Кутты 8-го порядка с автоматическим контролем точности и с возможностью построить интерполяционный полином вычисляемого решения внутри шага интегрирования. Этот полином используется для вычисления расчетных аналогов данных измерений. Такой способ вычисления – один из элементов новизны разработанного алгоритма фильтрации. Он дает возможность с малыми затратами процессорного времени включить в обработку все измерения без их предварительного сжатия. Другой элемент новизны – использование векторов измерений разной длины на разных отрезках между узлами сетки. RTS-сглаживание реализовано аналогично. Автор применил разработанные им алгоритмы для обработки реальных магнитных измерений, полученных на «Фотоне М-3».

Как отмечает диссертант, положительное обстоятельство применения фильтрации Калмана заключается еще и в возможности использования более простых уравнений движения спутника по сравнению с методикой реконструкции, в которой сшиваются решения уравнений движения, найденные по коротким отрезкам измерений.

Вторая глава диссертации по замыслу ее автора выполняет две функции. Во-первых, она позволяет осуществить верификацию методик, предложенных в первой главе. Во-вторых, она распространяет эти методики на случай произвольного – управляемого или неуправляемого – движения спутника. Применяемые в первой главе полные уравнения вращательного движения спутника содержат в своей динамической подсистеме явные выражения для моментов, приложенных к спутнику внешних сил. Эти выражения могут оказаться недостаточно точными. Проверить адекватность реконструкций первой главы можно, сравнив их с реконструкциями фактического движения, построенными с помощью методик, основанных только на кинематических уравнениях вращательного движения твердого тела. В диссертации такие методики используют данные измерений двух видов: измерения вектора угловой скорости спутника и вектора напряженности МПЗ. Как и в первой главе, диссертант реализует два подхода к их разработке. Первый основан на методе наименьших квадратов, второй – на фильтрации Калмана. В рамках первой методики данные измерений угловой скорости сглаживаются дискретными рядами Фурье, и эти ряды подставляются в кинематические уравнения вращательного движения твердого тела. Полученные таким образом уравнения представляют собой кинематическую модель движения спутника. Решение этих уравнений, аппроксимирующее фактическое движение

спутника, находится из условия наилучшего в смысле МНК согласования данных измерений вектора напряженности МПЗ с их расчетными аналогами. Поскольку в дальнейшем полет российских ИСЗ научного назначения будет ориентированным (ориентация спутников солнечными батареями на Солнце будет поддерживаться двигателями маховиками или гиродинами), методика мониторинга, основанная на кинематических уравнениях, станет основной. Для нее возникнет ситуация, упомянутая при описании первой задачи. В связи с этим в диссертации также предложена методика, основанная на фильтре Калмана для кинематической модели с двумя видами измерений – векторов напряженности угловой скорости и МПЗ. Новизна этой методики заключается в использовании оригинальной разностной схемы интегрирования кинематических уравнений в кватернионной форме, в переменной размерности вектора измерений и в способе вычисления расчетных аналогов данных измерений.

В третьей главе диссертации рассматривается задача проверки согласованности показаний различных магнитометров, измеряющих магнитное поле внутри ИСЗ. Обработка магнитных измерений, выполненных на борту спутника, обычно выполняется с использованием достаточно сложных математических моделей. Предварительно желательно провести проверку имеющихся данных простыми средствами, чтобы установить, можно ли использовать показания того или иного магнитометра для корректной реконструкции вращательного движения спутника. Если измерения проводились одновременно несколькими магнитометрами, то в качестве такой проверки можно использовать проверку геометрической согласованности их показаний. Методика проверки согласованности показаний двух трехкомпонентных магнитометров реализована в диссертации. Если проверка обнаруживает согласованность, то удастся найти постоянные смещения в измерениях компонент поля и матрицу перехода между собственными системами координат магнитометров. Методика проиллюстрирована примерами проверки магнитных измерений, выполненных на «Фотоне М-3».

Оценивая диссертацию В. А. Панкратова в целом, хочу отметить ее большую практическую значимость. Программное обеспечение, разработанное при подготовке данной диссертации, использовалось для реконструкции вращательного движения трех летавших спутников: «Фотона-12», «Фотона М-2» и «Фотона М-3». Разработанное программное обеспечение может использоваться для построения аппроксимаций вращательного движения перспективных ИСЗ, оснащенных магнитометрами и датчиками угловой скорости.

Хотя применению фильтрации Калмана в задачах реконструкции вращательного движения спутников посвящено огромное число работ, диссертация В. А. Панкратова не теряется на их фоне. Во-первых, все предложенные в ней алгоритмы реализованы в программном обеспечении, которое использовалось в деле. Во-вторых, им предложена оригинальная модификация фильтра Калмана и RTS-сглаживания с переменной


размерностью вектора измерений. В-третьих, предложены оригинальные решения при разработке численных процедур.

Замечания по диссертации. На стр. 53 указано, что микроускорения для реконструкций вращательного движения с помощью двух различных способов сглаживания «оказываются практически одинаковыми». Однако результаты вычисления микроускорений при помощи этих алгоритмов не приведены. Хотелось бы видеть результаты применения разностной схемы из п. 2.6 для интегрирования уравнений вращательного движения в интегрально-статистической методике п. 2.4. Однако отмеченные замечания не снижают в целом высокий уровень представленной работы.

Диссертация В. А. Панкратова является законченной научно-квалификационной работой, посвященной разработке новых методик реконструкции вращательного движения КА. Тематика диссертации относится к прикладной небесной механике. По теме диссертации опубликованы 10 работ из них три в рецензируемых журналах из списка ВАК. Наиболее существенные результаты, выносимые на защиту, получены лично соискателем. Автореферат и публикации автора полностью отражают содержание диссертационной работы.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению диссертационная работа соответствует требованиям Положения ВАК, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Автор диссертации – Панкратов Владимир Александрович – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика.

Ведущий научный сотрудник РКК «Энергия», к.т.н.

 – Тимаков С.Н.

Личную подпись официального оппонента Тимакова С.Н. удостоверяю.

Главный ученый секретарь
НТС ОАО РКК «Энергия», к.т.н.



 Лукьяшко А.В.

05.06.2014