МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА Механико-математический факультет

На правах рукописи

Глотов Юрий Николаевич

Определение движения механических объектов по данным измерений

01.02.01 – Теоретическая механика

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Работа выполнена на кафедре теоретической механики и мехатроники механико-математического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель : доктор физико-математических наук, профессор В.В. Сазонов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор С.А. Мирер кандидат технических наук Р.В. Бессонов

Ведущая организация:

Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

Защита состоится 18 февраля 2011 года в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 501.001.22 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, Главное Здание МГУ, механико-математический факультет, ауд. 16-10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке механико-математического факультета МГУ (Главное здание МГУ, 14 этаж).

Автореферат разослан 18 января 2011 года.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат физико-математических наук, доцент

В.А. Прошкин

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Диссертация посвящена задачам теоретической механики, связанным с определением фактического движения конкретных механических объектов по данным измерений, получаемых от систем технического зрения и бортовых датчиков. Автором разработаны математические модели, алгоритмы и программное обеспечение, позволяющие выполнять такое определение как оперативно в контуре управления объектом, так и при апостериорной обработке результатов экспериментов или при анализе разного рода проектов.

Постановки задач. Дистанционное управление роботами в среде Интернет — перспективное направление научных исследований. При разработке методов удаленного управления роботами необходимо учитывать наличие неопределенных временных задержек в канале связи. Временные задержки наиболее остро проявляются при взаимодействии робота с подвижным объектом. Управление таким взаимодействием целесообразно осуществлять с применением динамической модели объекта, позволяющей прогнозировать его движение. Примером такого взаимодействия может служить задача захвата стержня, качающегося на бифилярном подвесе, роботом-манипулятором, управляемым через Интернет. Колебания стержня регистрируются ТВ-камерой, которая поставляет необходимые для выполнения прогноза измерения и обеспечивает удаленному оператору обзор рабочего пространства робота. Разработанная ранее методика автоматизированного захвата стержня позволяла спрогнозировать его движение на несколько секунд вперед, вывести манипулятор в точку захвата и выполнить захват. Однако данная методика не обеспечивает необходимой точности прогноза на более продолжительные интервалы времени, что в задаче управления роботом через Интернет является

критическим. Одним из возможных способов успешного решения данной задачи является построение более точной математической модели, основанной на нелинейных уравнениях движения стержня.

Систему технического зрения, выполняющую функцию измерительного прибора, можно также использовать для измерения остаточных микроускорений на борту космических аппаратов. В сентябре 2007 г. на борту спутника Фотон М-3 был произведен эксперимент по определению квазистатических (низкочастотных) микроускорений посредством обработки последовательности видеокадров пробного тела, совершающего свободное движение. В перспективе такая установка может быть использована для проверки бортовых акселерометров в области низких частот. В связи с этим необходимо детальное изучение точностных возможностей и способов автоматизации процесса обработки видеоизмерений для дальнейшего совершенствования использованной установки.

Определение низкочастотных микроускорений на борту космических аппаратов необходимо проводить для обработки результатов экспериментов с гравитационно–чувствительными системами. На спутниках серии *Фотон* такие эксперименты проводились только во время неуправляемого полета. Полет перспективных спутников будет проходить в ориентированном состоянии, их ориентация будет поддерживаться с помощью гироскопических устройств — гиродинов или двигателей-маховиков. В таком случае для реконструкции их вращательного движения необходимо использовать более сложную математическую модель. Эта модель должна включать как уравнения движения собственно спутника, так и уравнения, описывающие функционирование системы управления ориентацией. Детальные уравнения управляемого вращательного движения спутника обычно сложны, и их практически невозможно использовать для реконструкции этого движения. Если ограничиться расчетом ква-

4

зистатических микроускорений, то можно воспользоваться упрощенными уравнениями. Чтобы как-то компенсировать сделанные упрощения, в уравнения следует ввести малые случайные возмущения и для отыскания их решений использовать сглаживающий фильтр Калмана. Для проверки работоспособности данной методики необходимо ее тестирование на известных неуправляемых и управляемых движениях космических аппаратов, например, движениях спутника Фотона M-3.

Научная новизна работы обусловлена тем, что стенд, состоящий из робота-манипулятора, снабженного системой технического зрения, и космические аппараты серии *Фотон* являются уникальными объектами, работа с которыми потребовала разработки новых и адаптации существующих методов решения ряда механических задач: приемлемого прогноза движения стержня, качающегося на бифилярном подвесе, на длительных интервалах времени; реконструкции управляемого вращательного движения спутников в результате обработки данных измерений бортовых датчиков; определения остаточных микроускорений на борту спутников.

Работа имеет прикладной характер, полученные результаты могут быть использованы в исследованиях, проводимых в МГУ имени М.В. Ломоносова, Институте проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, Вычислительном центре имени А.А. Дородницына РАН, Институте прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН и других научно-исследовательских центрах.

Апробация работы Результаты, представленные в диссертации, докладывались автором и обсуждались на следующих научных семинарах:

 Семинар «Теория управления и динамика систем» Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН под руководством академика РАН Ф.Л. Черноусько, 2010 г.

- Семинар им. В.А. Егорова по механике космического полета под руководством чл.-корр. РАН В.В. Белецкого, проф. М.П. Заплетина и проф. В.В. Сазонова, 2010 г.
- Семинар по динамике относительного движения под руководством чл.-корр. РАН В.В. Белецкого и проф. Ю.Ф. Голубева, 2010 г.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в пяти печатных работах, одна из которых опубликована в журнале, входящем в перечень ВАК. Список работ приведен в конце автореферата.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 22 наименований. Общий объем диссертации – 125 страниц.

Содержание работы

Во введении сформулирована цель диссертации и приведено краткое содержание работы.

В первой главе рассматривается задача определения движения стержня, качающегося на бифилярном подвесе, по данным видеоизмерений. Исходной информацией служат координаты концевых точек изображения стержня на ПЗС-матрице ТВ-камеры.

В основе методики определения движения стержня лежит математическая модель движения, основанная на нелинейных уравнениях. При выводе уравнений считается, что стержень абсолютно жесткий и представляет собой отрезок однородной материальной прямой; нити подвеса нерастяжимы, невесомы и имеют одинаковую длину; точки крепления нитей к неподвижной балке лежат в одной горизонтальной плоскости. Из активных сил, приложенных к стержню, учитываются сила тяжести и линейного вязкого трения о воздух. На координаты концов стержня наложены три связи, выражающие неизменность длин стержня и нитей подвеса. Уравнения движения стержня представляют собой уравнения Лагранжа 2-го рода со связями.

Данные измерений, получаемые в результате обработки телевизионного изображения стержня, представляют собой последовательности координат точек, являющихся изображениями концов стержня на ПЗСматрице, и моменты времени, к которым эти координаты относятся. Время отсчитывается от момента запуска программы обработки изображения. Получаемая последовательность измерений накапливается на некотором отрезке времени и затем обрабатывается методом наименьших квадратов с помощью интегрирования нелинейных уравнений движения стержня. Уточняемыми параметрами служат начальные условия решений уравнений движения стержня, коэффициенты вязкого трения и параметры видеосистемы — всего 16 величин.

В работе приводятся примеры обработки реальных данных измерений и экспериментальные оценки точности определения движения стержня. На рис. 1 представлен один из таких примеров прогнозирования движения стержня. Обработка данных измерений производилась на первых 30 сек. движения стержня, интервал времени прогноза составлял также 30 сек. В левой части рисунка сплошной линией изображены графики функций $x_i(t)$ (i = 1, 2, 3) — координат одного из концов стержня, рассчитанные описанным выше способом. Маркерами указаны псевдоизмерения $\tilde{x}_i(t_n)$, n = 1, ..., N, которые представляют собой координаты того же конца стержня и находятся в каждый момент времени по данным видеоизмерений с использованием уравнений связи и уравнений, описывающих математическую модель оптической системы. В правой части изображены ломаные, абсциссы вершин которых — моменты измерений t_n , а ординаты — разности $\Delta x_i(t_n) = x_i(t_n) - \tilde{x}_i(t_n)$. Смысл имеют только



одного из концов стержня на интервале $0 \le t \le 60$ с.

Рис. 1. Ошибка между псевдоизмерениями и расчетными значениями координат

вершины ломаных, а их звенья служат лишь для удобства визуализации. Из рисунка видно, что с увеличением длины интервала прогноза систематическая составляющая в остатках $\Delta x_i(t_n)$ возрастает. Это объясняется некоторой неадекватностью модели. Однако величина остатков остается приемлемой — менее 1 см по каждой координате обоих концов стержня.

Разработанное программное обеспечение может быть использовано для управления через Интернет роботом-манипулятором, захватывающим подвижный объект. Использование полных нелинейных уравнений движения объекта позволяет прогнозировать его движение на несколько десятков секунд вперед с ошибкой расчета координат точки захвата менее 1 см и компенсировать временные задержки Интернета.

Во второй главе диссертации описывается методика расчета реальной квазистатической составляющей микроускорения на борту космического аппарата по видеоизображению движущихся объектов, и приводятся результаты такого расчета для спутника Фотон M-3.

Микроускорением точки, закрепленной на корпусе космического аппарата, называется разность между напряженностью гравитационного поля в этой точке и абсолютным ускорением последней. Возникновение остаточных микроускорений на борту искусственного спутника Земли в неуправляемом полете обусловлено несколькими причинами. Главные из них: 1) движение спутника относительно центра масс, 2) градиент гравитационного поля, 3) аэродинамическое сопротивление, 4) упругие колебания конструкции. Микроускорения измеряются акселерометрами, их показания на крупногабаритных спутниках типа Фотон разбиваются на две составляющие — высокочастотную и квазистатическую (низкочастотную). Квазистатическая составляющая имеет спектр в диапазоне от нуля до нескольких тысячных долей герца и обусловлена первыми тремя указанными выше причинами, которые могут реализоваться для спутни-

9

ка — твердого тела. Высокочастотная составляющая имеет спектр в диапазоне нескольких сотых долей герца и вызвана упругими колебаниями конструкции спутника и функционированием его бортовых устройств.

Заметим, что при анализе микрогравитационной обстановки на борту спутника основное внимание уделяется именно квазистатической компоненте микроускорения. Она представляет интерес, по крайней мере, по трем причинам. Во-первых, именно эта компонента определяет течение технологических процессов в условиях невесомости. Во-вторых, она представляет собой оценку снизу (по абсолютной величине) реального микроускорения на борту спутника, причем знак равенства в этой оценке может достигаться. В-третьих, результаты расчета квазистатической компоненты микроускорения по данным косвенных измерений могут быть использованы для проверки правильности показаний акселерометров.

Для расчета таких микроускорений существует простая формула: квазистатическое микроускорение **b** в заданной точке борта P, жестко связанной с корпусом спутника, имеет вид¹

$$\mathbf{b} = \mathbf{r} \times \dot{\boldsymbol{\omega}} + (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \times \boldsymbol{\omega} + \frac{\mu_E}{|\mathbf{R}|^3} \left[\frac{3 \left(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r} \right) \mathbf{R}}{|\mathbf{R}|^2} - \mathbf{r} \right] + c\rho_a |\mathbf{v}| \mathbf{v}.$$
(1)

Здесь **r** — радиус-вектор точки P относительно центра масс спутника — точки O, ω — абсолютная угловая скорость спутника, точка над символом означает дифференцирование по времени t, μ_E — гравитационный параметр Земли, **R** — геоцентрический радиус-вектор точки O, c — баллистический коэффициент спутника, ρ_a — плотность атмосферы в точке O, \mathbf{v} — скорость этой точки относительно поверхности Земли.

Вектор **b** играет роль ускорения силы тяжести Земли в орбитальных экспериментах. В частности, если в точке P закрепить пробное тело с

¹ Сазонов В.В., Комаров М.М., Полежаев В.И. и др. Микроускорения на орбитальной станции *Мир* и оперативный анализ гравитационной чувствительности конвективных процессов тепломассопереноса // Космические исследования. 1999. Т. 37. № 1. С. 86-101.

исчезающе малой массой *m*, то сила реакции, действующая на это тело со стороны спутника, будет равна $-m\mathbf{b}$.

Восстановив по какой-либо информации фактическое движение спутника, можно затем по формуле (1) рассчитать реальное квазистатическое микроускорение в любой заданной точке борта в функции времени. Расчеты такого рода можно использовались для проверки правильности измерения бортовыми акселерометрами низкочастотной составляющей микроускорения. С этой целью слудет выбрать подходящие акселерометр и отрезок времени, рассчитать на выбранном отрезке микроускорение в точке расположения акселерометра и подготовить надлежащим образом относящиеся к этому отрезку данные измерений. Примеры указанного сравнения приведены в работах^{2,3}, причем надлежащая подготовка данных измерений акселерометра оказалась трудоемкой. Она включала выделение из этих данных низкочастотной составляющей, коррекцию составляющей с очень низкими частотами, внесение поправки за влияние магнитного поля Земли и уточнение положения акселерометра на борту спутника. В результате квазистатические микроускорения, полученные разными способами, удалось согласовать со среднеквадратичной ошибкой менее 10^{-6} м/с². Описанное сравнение можно считать оценкой точности акселерометра в области низких частот. К сожалению, эта оценка является опосредованной. Хотелось бы иметь прямой способ такой оцен-КИ.

В работе рассматривается возможный подход к разработке прямого способа проверки низкочастотных акселерометров. В его основе лежит

² Абрашкин В.И., Богоявленский Н.Л., Воронов К.Е. и др. Неуправляемое вращательное движение спутника *Фотон М-2* и квазистатические микроускорения на его борту // Космические исследования. 2007. Т. 45. № 5. С. 450–470.

³ Beuselinck T., Van Bavinchove C., Sazonov V.V., Chebukov S.Yu. Analysis of quasi-steady component in acceleration measurement data obtained onboard *Foton M-2* // Препринт ИПМ им. М.В.Келдыша РАН. 2008. № 8.



Рис. 2. Общий вид установки для измерения микроускорений.

эксперимент "Динамика-М", проведенный на спутнике Фотон М-3. Эксперимент состоял в определении микроускорений посредством обработки последовательности видеокадров объектов, совершающих свободное движение. На корпусе спутника была закреплена кубическая коробка, имеющая две прозрачные соседние стенки. В коробке двигались дробинки — они вбрасывались в нее с интервалом в несколько минут. Всего в эксперименте, продолжавшемся 40 мин, были использованы четыре дробинки. Движение дробинок снималось цифровой видеокамерой. Видеокамера располагалась напротив одной из прозрачных стенок, под углом к другой прозрачной стенке было установлено зеркало (рис. 2). Такая оптическая система позволяла в одном кадре получать изображение дробинок с двух точек зрения (рис. 3).

Математическая модель оптической системы представляет собой соотношение вида $\xi = f(x, p)$, выражающее связь между координатами $x = (x_1, x_2, x_3)$ произвольной точки в системе координат коробки и координатами ξ_1, ξ_2 и ξ_3, ξ_4 ее изображений в картинной плоскости каме-



Рис. 3. Изображение дробинок в кадре ТВ камеры.

ры. Для удобства записи координаты ξ_1, \ldots, ξ_4 объединим в один вектор $\xi = (\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4)$. Эта модель содержит 6 скалярных параметров, объединенных в вектор *p*. Некоторые из этих параметров довольно трудно точно измерить даже в лабораторных условиях. Однако в этом нет необходимости. Значения параметров оптической системы можно определить в процессе ее калибровки посредством измерения координат изображения вершин коробки A_i (i = 1, ..., 8). Измерение этих координат осуществляется с помощью программы Paint (стандартное средство Windows) путем подведения стрелки мыши к нужной точке и считывания значений координат с экрана монитора. Затем для каждой точки А_i записывается соотношение $\xi = f(x, p)$. Эти соотношения в совокупности рассматриваются как переопределенная система из 32 уравнений относительно 6 неизвестных параметров оптической системы. Эта система решается численно методом наименьших квадратов, причем все уравнения берутся с одинаковыми весами. Поиск решения выполняется по схеме Гаусса-Ньютона.

После калибровки оптической системы соотношение $\xi = f(x, p)$ можно использовать для определения координат x точки по координатам ξ ее

изображений в картинной плоскости камеры. В этом случае соотношение $\xi = f(x, p)$ рассматривается как переопределенная система уравнений относительно величин x. Здесь имеется 4 скалярных уравнения относительно 3 скалярных неизвестных. Эта система также решается численно методом наименьших квадратов с использованием схемы Гаусса-Ньютона.

Съемка движения дробинок производилась на отрезках времени продолжительностью по 96 с. Паузы между этими отрезками также были равны 96 с. Каждый кадр привязан ко времени. Описанная выше цифровая обработка каждого кадра позволила определить координаты центров дробинок в системе координат коробки. Для каждой дробинки выделялись последовательности кадров, изображающие ее движение между столкновениями со стенками коробки и другими дробинками. Поскольку время между соударениями невелико, функции $x_i(t)$ (i = 1, 2, 3)аппроксимировались полиномами невысокой степени. Рассматривались только линейные и квадратичные полиномы. Линейный полином $x_i^{(1)}(t)$ соответствует равномерному и прямолинейному движению дробинки относительно стенок коробки, квадратичный $x_i^{(2)}(t)$ — равноускоренному движению. Указанные аппроксимации строились методом наименьших квадратов независимо для каждой координаты. Коэффициент при квадрате времени равен половине значения соответствующей компоненты *w_i* микроускорения. Это микроускорение считалось относящимся к середине последовательности. Точность этих аппроксимаций и найденных оценок микроускорений w_i характеризовалась соответствующими стандартными отклонениями. Стандартное отклонение ошибок аппроксимации функции $x_i(t)$ выражениями $x_i^{(1)}(t)$ и $x_i^{(2)}(t)$ обозначим соответственно $\sigma_i^{(1)}$ и $\sigma_i^{(2)}$. Стандартные отклонения оценок параметров w_i обозначим σ_{wi} .

Пример построения линейных и квадратичных аппроксимаций функций $x_i(t)$ приведен на рис. 4. Верхние графики этого рисунка суть ломаные $x_i(t)$ и их линейные аппроксимации $x_i^{(1)}(t)$; звенья этих ломаных последовательно соединяют точки, абсциссы которых — моменты захвата кадров, а ординаты — соответствующие величины x_i и $x_i^{(1)}(t)$. Вторые сверху графики — графики разностей $\delta x_i^{(1)}(t) = x_i(t) - x_i^{(1)}(t)$. Они представляют собой ломаные того же вида, что и функции $x_i(t)$. Пары нижних графиков на рис. 4 аналогичны верхним парам, только вместо функций $x_i^{(1)}(t)$ при их построении использованы квадратичные аппроксимации $x_i^{(2)}(t)$. В примере на рис. 4

$$t_0 = 229.9$$
,

$$\sigma_1^{(1)} = 0.133, \quad \sigma_1^{(2)} = 0.086, \quad w_1 = -1.725, \quad \sigma_{w_1} = 0.046,$$

$$\sigma_2^{(1)} = 0.281, \quad \sigma_2^{(2)} = 0.094, \quad w_2 = -4.495, \quad \sigma_{w_2} = 0.051,$$

$$\sigma_3^{(1)} = 0.172, \quad \sigma_3^{(2)} = 0.099, \quad w_3 = -2.384, \quad \sigma_{w_3} = 0.053.$$

Здесь $\sigma_i^{(1)}$ и $\sigma_i^{(2)}$ выражены в мм, w_i и σ_{wi} — в 10⁻⁶ м/с². Графики ошибок линейной аппроксимации $\delta x_i^{(1)}(t)$ свидетельствуют о наличии в функциях $x_i(t)$ квадратически зависящих от времени составляющих. Графики функций $\delta x_i^{(2)}(t)$ и меньшее значение стандартных отклонений $\sigma_i^{(2)}$ по сравнению с $\sigma_i^{(1)}$ показывают, что эти составляющие удалось включить в $x_i^{(2)}(t)$. Отметим также, что точность определения микроускорений w_i является высокой: отношения σ_{wi}/w_i не превышают 0.03.

Микроускорения, найденные описанным способом сравнивались с микроускорениями, рассчитанными по формуле (1). Очень хорошего совпадения достичь не удалось, но значения микроускорений, найденных разными способами, оказались одного порядка и в общем-то близкими.

В работе приводится детальный анализ возможностей установки, использованной в эксперименте "Динамика-М", оцениваются ее точност-





ные характеристики, предлагаются способы автоматизации обработки измерений.

В третей главе описан подход, позволяющий определять квазистатические микроускорения на борту космического аппарата во время ориентированного полета.

Определение квазистатических микроускорений, имевших место на космических аппаратах серии Фотон, выполнялся следующим образом. Данные измерений бортовых датчиков, выполненные на временном интервале длиной несколько часов, обрабатывались совместно методом наименьших квадратов с помощью интегрирования уравнений движения КА относительно центра масс. На решениях уравнений движения станции задавался функционал, который представлял собой сумму квадратов разностей между данными измерений и расчетными аналогами этих данных, вычисляемыми вдоль решения уравнений движения. Минималь такого функционала считалась реконструкцией фактического движения станции на обрабатываемом интервале. Минимизация функционала выполнялась методом Гаусса-Ньютона по начальным условиям движения станции и параметрам математической модели. Затем вдоль найденного движения микроускорение в заданной точке борта рассчитывалось по формуле (1) в функции времени.

Конкретные реализации описанного метода определения квазистатической компоненты микроускорения отличаются способами аппроксимации вращательного движения спутника. Если спутник не управляем, т.е. испытывает действия естественных внешних сил и моментов, то для аппроксимации можно использовать решения полной системы уравнений его вращательного движения. Эта система включает динамические уравнения Эйлера для компонент угловой скорости и кинематические уравнения Пуассона для элементов первых двух строк матрицы перехода от си-

17

стемы координат, образованной главными центральными осями инерции спутника, к гринвичской системе координат. В уравнениях Эйлера учитываются гравитационный и восстанавливающий аэродинамический моменты, а также гиростатический момент внутренних устройств спутника (вентиляторов, роторов и т.п.), компоненты которого считаются постоянными. Используя полную систему уравнений движения спутника, можно реконструировать его вращательного движение по косвенной информации, например, по данным бортовых измерений магнитного поля Земли (МПЗ). Главной задачей здесь является отыскание решения указанной системы уравнений движения, согласующегося с исходной информацией на некотором промежутке времени. Эта задача решалась методом наименьших квадратов⁴. Уточняемыми параметрами служили параметры аэродинамического, компоненты гиростатического момента внутренних устройств спутника и постоянные смещения в данных измерений МПЗ. В работе приведены результаты применения такого подхода для определения реального движения спутника Фотон М-3 на двух интервалах неуправляемого движения.

Для определения квазистатических микроускорений на разрабатываемых космических аппаратах, в частности, новых *Фотонах*, описанная расчетная схема должна быть модифицирована. Полет новых спутников будет проходить в ориентированном состоянии и, следовательно, будет управляемым. В таком случае для реконструкции их вращательного движения необходимо использовать, вообще говоря, более сложную систему уравнений движения. Эта система должна включать как уравнения движения собственно спутника — уравнения, о которых говорилось выше и в которых дополнительно учитываются управляющие воздействия,

⁴ Абрашкин В.И., Бойзелинк Т., Ван Бавинхов К. и др. Определение вращательного движения спутника *Фотон М-3* по данным бортовых измерений магнитного поля Земли // Космические исследования. 2010. Т. 48. № 3. С. 252-265.

так и уравнения, описывающие функционирование системы управления ориентацией⁵. Кроме того, следует уточнить формулу (1). Если система управления ориентацией спутника создает силу, то отвечающее этой силе ускорение необходимо вычесть из правой части (1). В важном частном случае, когда для управления ориентацией спутника используются гироскопические устройства — гиродины или двигатели-маховики, формула (1) остается справедливой, по крайней мере, на участках полета между разгрузками гиросистемы. Этот случай, основной для новых спутников, рассматривается в данной работе. Заметим, что если разгрузки выполняются с помощью магнитного момента, то формула (1) остается справедливой и на участках разгрузки.

Детальные уравнения управляемого вращательного движения спутника обычно сложны, и их практически невозможно использовать для реконструкции этого движения. Если ограничиться расчетом квазистатических микроускорений, то можно воспользоваться упрощенными уравнениями. Чтобы как-то компенсировать сделанные упрощения, в уравнения следует ввести малые случайные возмущения и для отыскания решений, аппроксимирующих измерения, вместо обычного метода наименьших квадратов использовать сглаживающий фильтр Калмана. Построенное таким образом аппроксимирующее решение — не гладкое, в частности, угловое ускорение $\dot{\omega}$ — разрывная функция. Это обстоятельство может потребовать применения специальных сглаживающих процедур при расчете вдоль такого решения квазистатических микроускорений по формуле (1). При удачном выборе упрощенных уравнений скачки функции $\dot{\omega}$ будут невелики. В ряде случаев наличие такой компоненты можно считать допустимым и обойтись без дополнительного сглаживания.

⁵ Игнатов А.И., Сазонов В.В. Оценка остаточных микроускорений на борту ИСЗ в режиме одноосной солнечной ориентации // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2009. № 65.

В работе предложен подход, использующий редуцированную модель ориентированного движения КА. В этой модели учитываются гравитационный и управляющий моменты. Представление управляющего момента выбирается в зависимости от типа управляемого движения и обрабатываемой информации. Модель предназначена для реконструкции движения сглаживающим фильтром Калмана и расчета микроускорений в области низких частот.

Реконструкция движения КА выполнялась следующим образом: сначала последовательность измерений обрабатывалась в прямом направлении с использованием рекуррентных соотношений фильтра Калмана. Фазовый вектор системы, уточняемый на каждом шаге, зависит от типа реконструируемого движения. В случае неуправляемого движения это углы, задающие ориентацию КА относительно гринвичской системы координат, компоненты угловой скорости спутника, параметры аэродинамического момента КА и смещения в измерениях. В случае управляемого движения вместо параметров аэродинамического момента уточняются компоненты управляющего углового ускорения спутника. После завершения обработки последовательности измерений в прямом направлении эта последовательность обрабатывалась в обратном направлении⁶. Здесь использовались ранее вычисленные величины оценок фазового вектора и ковариационная матрица этих оценок.

На рис. 5 представлены результаты применения предлагаемого подхода при реконструкции орбитальной ориентации *Фотона М-3* на первом витке полета. В номинальной орбитальной ориентации главные центральные оси инерции спутника направлены вдоль осей орбитальной системы координат. Фактическое ориентированное движение спутника пред-

⁶ Rauch H.E., Tung F., Striebel C.T. Maximum likelihood estimates of linear dynamic systems // AIAA Journal. 1965. Vol. 3. No. 8, Pp. 1445-1450.





ставляло собой малые колебания в окрестности указанного положения. Гладкость и малые значения функций $\dot{\omega}_i(t)$ и $b_i(t)$, представленных на рис. 5, не должны вводить в заблуждение. Это — результат использованной методики расчета. На самом деле пиковые значения этих функций в режиме орбитальной ориентации были очень большие. Но эти большие значения имели место на очень коротких временных интервалах длиной, как правило, несколько десятых долей секунды, на которых работали реактивные двигатели системы ориентации спутника. Такие короткие интервалы разделялись участками медленного и плавного движения (как на рис. 5) длиной несколько десятков секунд. Если на отрезке времени порядка витка вырезать интервалы включения двигателей ориентации, разложить получившиеся угловые скорости спутника, микроускорение и т. п. функции в ряд Фурье и в этих разложениях сохранить первые несколько гармоник, то получим результат, представленный на рис. 5. Он отличается от реальной квазистатической компоненты на вклад от указанных импульсных включений двигателей (двигатели могут создавать еще и ускорение, которое надо учитывать в формуле (1)). Однако, если бы ориентация спутника поддерживалась гиросистемой, то этот результат был бы правильным.

Адекватность предлагаемого подхода проверена также при реконструкции движения по данным магнитных измерений на еще одном участке управляемого полета КА *Фотон М-3* и на модельной информации, полученной для одного из разрабатываемых КА.

В заключении сформулированы положения, выносимые на защиту:

• Предложен алгоритм определения движения стержня, качающегося на бифилярном подвесе, по данным видеоизмерений. Математическая модель движения, использованная в данном подходе, основана на нелинейных уравнениях и позволяет прогнозировать движение стержня на несколько десятков секунд вперед с ошибкой расчета координат концов стержня менее 1 см. Разработанное программное обеспечение может быть использовано для управления роботом-манипулятором через Интернет.

- Обработаны результаты космического эксперимента по определению квазистатических (низкочастотных) микроускорений на борту искусственного спутника Земли по видеоизображению объектов, совершающих свободное движение. Эксперимент проводился на КА Фотон М-3 в сентябре 2007 г. Движение объектов снималось цифровой видеокамерой. Специальная обработка видеокадров позволила определить координаты центров дробинок, по которым затем находились компоненты квазистатичского микроускорения в центре коробки. Как показала проведенная обработка, предложенный способ определения микроускорений оказался достаточно чувствительным и точным. При необходимой доработке установки ее можно использовать для тестирования в космических условиях акселерометров, измеряющих остаточные микроускорения на борту КА порядка 10⁻⁶ м/с² в частотном диапазоне 0 0.01 Гц.
- Описан подход, позволяющий определять квазистатические микроускорения на борту ориентированного космического аппарата, ориентация которого поддерживается с помощью гироскопических устройств — гиродинов или двигателей-маховиков. Предложенная математическая модель управляемого вращательного движения спутника, основанная на упрощенных уравнениях движения, предназначена для реконструкции движения сглаживающим фильтром Калмана и расчета микроускорений в области низких частот. Адек-

ватность предлагаемого подхода проверена посредством реконструкции по данным магнитных измерений участков управляемого полета КА Фотон М-3 и на модельной информации, полученной для одного из разрабатываемых КА.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

- Глотов Ю. Н., Емельянов С. Н., Сазонов В. В. Определение движения механических объектов по данным видеоизмерений в задачах робототехники // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2007. № 88.
- Богуславский А. А., Глотов Ю. Н., Левтов В. Л., Романов В. В., Сазонов В. В., Соколов С. М. Математическая обработка результатов эксперимента "Динамика-М", проведенного на борту КА Фотон М-3 // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2008. № 65.
- Богуславский А. А., Глотов Ю. Н., Левтов В. Л., Романов В. В., Сазонов В. В., Соколов С. М. Определение квазистатических микроускорений на борту искусственного спутника по видеоизображению подвижных объектов // Космические исследования. 2009. Т. 47. № 6. С. 513–524.
- Богуславский А. А., Глотов Ю. Н., Левтов В. Л., Романов В. В., Сазонов В. В., Соколов С. М. Исследование точности системы компьютерного зрения для тестирования низкочастотных акселерометров на борту космического аппарата // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2009. № 66.
- Глотов Ю. Н., Сазонов В. В. Мониторинг микроускорений на борту ориентированного космического аппарата // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2010. № 63.