

На правах рукописи

Захваткин Михаил Витальевич

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С УЧЕТОМ
ВОЗМУЩЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ РАБОТОЙ
БОРТОВЫХ СИСТЕМ**

Специальность 01.02.01 — Теоретическая механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук.

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., профессор
Сазонов Виктор Васильевич

Официальные оппоненты:

д.т.н., Хуторовский Захарий Наумович,
начальник сектора
ОАО «МАК ВЫМПЕЛ»

д.т.н., Назиров Равиль Равильевич,
зам. директора ФБГУН ИКИ РАН

Ведущая организация:

Федеральное государственное
унитарное предприятие «Центральный
научно-исследовательский институт
машиностроения» (ФГУП ЦНИИмаш)

Защита состоится 25 марта 2014 года в 11⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 002.024.01, созданного на базе Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, расположенного по адресу: 125047, Москва, Миусская пл., 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН.

Автореферат разослан 11 февраля 2014 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

д.ф.-м.н.

Полилова Т.А.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Фундаментальные космические исследования являются приоритетным направлением Федеральной космической программы России до 2030 г. В настоящее время на рабочей орбите находится космический аппарат (КА) «Спектр-Р». В текущем десятилетии планируется развертывание внеатмосферных обсерваторий «Спектр-РГ», «Спектр-УФ», «Гамма-400», «Спектр-М», а также запуск орбитальных зондов и посадочных аппаратов для исследования Луны по проекту «Луна-Глоб». Задачи управления движением и навигационной привязки проводимых научных экспериментов предъявляют высокие требования к точности определения и прогнозирования параметров движения этих КА.

Современные модели гравитационного поля Земли и модели движения планет Солнечной системы позволяют с высокой точностью учитывать влияние гравитационных сил, действующих на искусственный спутник Земли. В то же время для функционирующих КА ошибки определения и прогнозирования параметров движения возникают, как правило, из-за неадекватного учета возмущающих факторов негравитационной природы, связанных с конструктивными и функциональными особенностями аппарата.

Конструкция большинства вышеперечисленных КА построена на базе платформы «Навигатор», разработанной в НПО им. С.А. Лавочкина. В состав модуля входит система ориентации и стабилизации, реализованная с использованием электромеханических исполнительных органов (ЭМИО). Разгрузка кинетического момента, накопленного ЭМИО, происходит при помощи реактивных двигателей системы стабилизации, реализованной по неомментной схеме, что приводит к возмущению движения центра масс КА. Другим источником негравитационных возмущений является давление солнечной радиации, зависящее от изменяющейся ориентации КА и отражающих свойств его поверхности. Оба упомянутых источника возмущений существенно осложняют построение достаточно точной модели движения КА, необходимой для решения задач управления полетом и привязки результатов научных экспериментов.

Из сказанного выше следует, что тема данной работы, посвященной проблеме навигации космических аппаратов, определению и прогнозированию параметров их движения с учетом как внешних возмущений, так и возмущений, обусловленных работой бортовых систем аппарата, является весьма актуальной. Актуальность темы подтверждена двухлетним опытом работ по баллистико-навигационному обеспечению полета и навигационной привязки научных экспериментов космического аппарата «Спектр-Р», запущенно-

го в июле 2011 г. в соответствии с проектом создания высокоорбитального наземно-космического радиоинтерферометра «Радиоастрон». Большое удаление КА от Земли обеспечивает более высокое разрешения по сравнению с наземными интерферометрами и космическими интерферометрами на низких орбитах. Реализовать это преимущество можно только при условии высокоточного определения параметров базы интерферометра, а следовательно, параметров движения КА. Основные требования к точности определения параметров движения КА составляют по положению ± 600 м, по скорости ± 2 см/с, по ускорению $\pm 10^{-8}$ м/с². Выполнить эти требования невозможно без учета возмущений, обусловленных работой бортовых систем аппарата. Возникла необходимость разработки параметризованной модели давления солнечной радиации, учитывающей ориентацию аппарата и свойства его поверхности, а также методики определения параметров движения аппарата путем совместной обработки внешнетраекторных и телеметрических данных [1].

Цель данной работы состоит в разработке методов, обеспечивающих существенное повышение точности определения и прогнозирования параметров движения современных отечественных КА за счет учета возмущающих факторов негравитационной природы, связанных с конструктивными и функциональными особенностями аппарата.

Для этого были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработка параметризованной модели силы и момента светового давления, учитывающей ориентацию аппарата в пространстве, форму и отражающие характеристики его поверхности на примере КА «Спектр-Р».
2. Разработка метода совместного уточнения элементов орбиты, а также параметров, характеризующих возмущающее влияние на движение КА работы двигателей стабилизации и светового давления, по совокупности внешнетраекторных измерений и телеметрических данных. Применение разработанного метода для уточнения параметров движения КА «Спектр-Р» по реальной траекторной и телеметрической информации.
3. Разработка метода прогнозирования движения КА с учетом возмущений от разгрузок ЭМИО и светового давления с использованием программы будущей ориентации аппарата. Построение модели, характеризующей связь между кинетическим моментом, накапливаемым ЭМИО, и возмущением от разгрузки двигателей-маховиков (ДМ). Применение метода для предсказания движения КА «Спектр-Р» и сравнение расчетного и фактического движения аппарата на участке прогнозирования.

4. Разработка метода расчета потока отраженного от КА света в произвольном направлении на основе модели, используемой для расчета светового давления.

Научную новизну работы составляют:

- Параметризованная модель силы и момента светового давления, использованная для повышения точности определения параметров орбиты КА «Спектр-Р».
- Метод использования измеренных скоростей вращения маховиков и разгрузок ЭМИО при уточнении параметров движения КА.
- Метод долгосрочного прогнозирования движения КА с учетом прогноза изменения кинетического момента и разгрузок ЭМИО.
- Математическая модель видимого блеска КА «Спектр-Р», согласующаяся с моделью влияния светового давления на движение аппарата.

Разработанная параметризованная модель сил и моментов светового давления имеет ряд преимуществ перед моделями, основанными на априорных оценках формы и поверхности КА. Она позволяет избавиться от ошибок, связанных с априорным представлением о влиянии светового давления на элементы поверхности КА и в ходе полета учесть эффекты, обусловленные старением материалов поверхности.

В рамках диссертационной работы разработана методика уточнения орбиты КА, использующая телеметрические данные в качестве независимого источника информации о возмущениях негравитационной природы. Данные о включениях двигателей стабилизации позволяют оценивать импульсы разгрузок, а данные о скоростях вращения маховиков дают информацию о параметрах светового давления через оценку возмущающего момента. Определенные таким образом параметры светового давления позволяют прогнозировать изменение кинетического момента ДМ, которое, в свою очередь, позволяет предсказывать возмущения от разгрузок, тем самым повышая точность прогноза движения КА.

Практическая значимость

Модели и методики, разработанные в диссертации, использованы в рамках баллистико-навигационного обеспечения КА «Спектр-Р» — основного элемента международного проекта «Радиоастрон». Результаты, полученные в работе, позволили решить ряд важных прикладных задач, среди которых:

1. Апостериорное определение параметров (реконструкция) движения КА «Спектр-Р», обеспечивающее высокоточную навигационную привязку научных измерений. Точность полученных реконструированных орбит позволила осуществить корреляцию интерферометрических измерений наземно-космического интерферометра.
2. Долгосрочное прогнозирование движения КА «Спектр-Р», позволяющее избежать больших продольных ошибок в расчетном движении КА и соответствующих им временных ошибок при планировании работы наземно-космического интерферометра.
3. Прогнозирование видимого блеска КА «Спектр-Р» в зависимости от его ориентации в пространстве и положения относительно наблюдателя. Использование данной информации для планирования работы оптических наблюдательных средств позволяет расширить набор телескопов, способных наблюдать КА, а также предсказывать моменты времени, неблагоприятные для проведения наблюдений.

Результаты, изложенные в диссертации, могут быть использованы в будущих проектах.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Параметризованная модель силы и момента светового давления, действующего на КА «Спектр-Р». Модель учитывает форму поверхности аппарата, его ориентацию относительно Солнца, а также возникновение тени на поверхности КА. Параметры модели характеризуют отражающую способность панелей солнечных батарей, а также отражающую способность и зеркальность других элементов КА.
2. Метод использования скоростей вращения маховиков ЭМИО в качестве измерений внешнего возмущающего момента при уточнении параметров движения КА. Расчетная величина возмущающего момента зависит от уточняемых параметров модели светового давления.
3. Метод долгосрочного прогнозирования движения КА с учетом разгрузок ЭМИО. Прогноз изменения кинетического момента, накапливаемого ДМ, рассчитывается при заданных параметрах светового давления и программе ориентации аппарата. Расчет возмущений от будущих разгрузок строится на основании прогноза накопления ДМ кинетического момента.
4. Математическая модель видимого блеска КА «Спектр-Р», которая согласуется с моделью влияния светового давления на движение аппарата.

Апробация работы и публикации

Результаты работы изложены в 5 печатных работах в изданиях, рекомендованных ВАК [1–5].

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих семинарах и конференциях:

- V Международная научная конференция «Наблюдение околоземных космических объектов». Исследования первых оптических наблюдений КА «Спектр-Р», 9–12 ноября 2011 г., Москва, Россия.
- Математические модели и моделирование в лазерно-плазменных процессах и передовых научных технологиях LPrM3. Высокоточное определение орбиты КРТ миссии «Радиоастрон», 28 мая – 2 июня 2012 г., Петровац, Черногория.
- Radioastron International Science Council 2012. Possibility of determination of Earth's and Moon's gravitational fields from Radioastron orbital data, 18–20 июня 2012 г., Пушино, Россия.
- Radioastron International Science Council 2013. Orbit determination of the Radioastron mission, 20–21 июня 2013 г., Москва, Россия.
- Семинар сектора № 2 отдела № 5 Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. Руководитель: д.ф.-м.н. А.Г. Тучин, 19 июня, 2 ноября 2013 г., Москва, Россия.
- Расширенный семинар отдела № 5 «Механика космического полета и управление движением» Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. Руководитель: проф. Ю.Ф. Голубев, 5 декабря 2013 г., Москва, Россия.
- НТС подсекции № 4 секции № 4 НТС ФГУП ЦНИИмаш. Руководитель: И.И. Олейников, 10 декабря 2013 г., Королев, Россия.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации составляет 120 страниц, из них 115 страниц текста, включая 46 рисунков и 13 таблиц. Библиография включает 44 наименования на 5 страницах.

Содержание работы по главам

Введение

Обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту положения. Также приводится список печатных работ диссертанта и список конференций, на которых докладывались основные результаты работы.

Глава 1. Модель движения

Движение центра масс рассчитывается в инерциальной системе координат, связанной с геоцентром для околоземных КА и барицентром солнечной системы для КА, удаляющихся на расстояния, превышающие лунные. В координатной части системы совпадают с международной небесной системой координат (ICRS), в качестве временной шкалы используется земное время ТТ и барицентрическое время TDB, в зависимости от принятого начала координат. Подробное описание используемых систем дается в разделе 1.1.

В разделе 1.2 описывается используемая в работе модель движения центра масс КА. Штатный полет происходит по пассивной траектории, прерывающейся сеансами проведения разгрузок ЭМИО, сопровождающихся включением двигателей стабилизации (ДС). Разгрузки происходят несколько раз за сутки и представляют собой попеременное включение ДС с целью погасить суммарный кинетический момент аппарата вместе с маховиками. Процесс длится 1–3 минуты, за которые происходит несколько десятков включений ДС. Работа двигателей телеметрируется, для каждого включения во время i -й разгрузки известно время $t_i^{(j)}$, длительность работы $\tau_i^{(j)}$ и расход топлива $\Delta m_i^{(j)}$. Номинальная тяга ДС определяется длительностью включения, поэтому приращение скорости КА в результате одного включения ДС является известной функцией длительности включения и расхода топлива $\Delta v_i^{(j)} = \Delta v_i^{(j)}(\Delta m_i^{(j)}, \tau_i^{(j)})$. Суммарное приращение скорости КА в результате i -й разгрузки представляется в виде одного вектора $\Delta \mathbf{v}_i$, обозначаемого импульсом разгрузки. Средневзвешенный момент времени приложения импульса и его измеренное значение определяются выражениями

$$t_i = \frac{\sum_{j=1}^N \Delta v_i^{(j)} t_i^{(j)}}{\sum_{j=1}^N \Delta v_i^{(j)}}, \quad \Delta \mathbf{v}_i^0 = \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^{(j)} \Delta v_i^{(j)}, \quad (1)$$

где $\mathbf{e}_i^{(j)}$ — направляющие косинусы тяги двигателя, соответствующего j -му включению ДС, получаемые из известной ориентации КА в пространстве.

На пассивных участках траектории учитываются следующие силы, действующие на движение КА: гравитация Земли, содержащая центральную и нецентральную части геопотенциала, гравитация Луны, Солнца и планет; изменение гравитационного поля вследствие деформации Земли под действием притяжения Луны и Солнца (т.н. «твердые приливы»); давление солнечного излучения; атмосферное торможение (на участках ниже 1.5 тыс. км над поверхностью Земли); влияние альбедо Земли, а также дополнительное возмущающее ускорение, обеспечивающее учет эффектов общей теории относительности. Гравитационное поле Земли представлено разложением геопотенциала по сферическим функциям в соответствии с моделью EGM-96 до гармоник 75×75 . Для получения координат Луны, Солнца и планет используются таблицы, основанные на теории движения DE421. Для описания влияния приливных сил используется модель, учитывающая деформацию Земли в направлении возмущающего тела (Луны или Солнца) в форме гармоник второго порядка. Расчет плотности атмосферы осуществляется на основе модели, рекомендованной ГОСТ Р 25645.166-2004. Учет переизлученного от Земли света производится согласно модели разбиения поверхности планеты на 160 участков с постоянными коэффициентами альбедо. Поправки для учета эффектов общей теории относительности вычислялись с использованием модели движения в центральном невращающемся гравитационном поле Земли.

Из-за сложной формы поверхности аппаратов и их непостоянной ориентации относительно Солнца особое внимание уделяется модели действующего на КА давления солнечного излучения. Давление света на поверхность представляется в виде суперпозиции давления поглощенного света, зеркально отраженного света и диффузно отраженного света. Соотношение между поглощенным и отраженным двумя способами излучением описывается коэффициентом отражения α и коэффициентом зеркальности μ . Действующая на поверхность сила рассчитывается исходя из изменения импульса падающего светового потока. Совокупная сила светового давления определяется суммированием по всем освещенным элементам поверхности КА.

Таким образом была построена модель силы и момента светового давления, действующих на КА «Спектр-Р». Для этого поверхность аппарата разбита на три части: космический радиотелескоп (КРТ), центральный блок и панели солнечных батарей [2]. Описание модели поверхности КА дается в разделе 1.3. Для описания свойств поверхности КРТ и центрального блока используются коэффициенты α_1 и μ_1 , поскольку эти элементы КА покрыты одинаковой многослойной изоляцией. Отражающая способность панелей солнечных батарей задается коэффициентом α_2 , второй коэффициент не вводится. Из-за того, что панели всегда ориентированы практически нормально

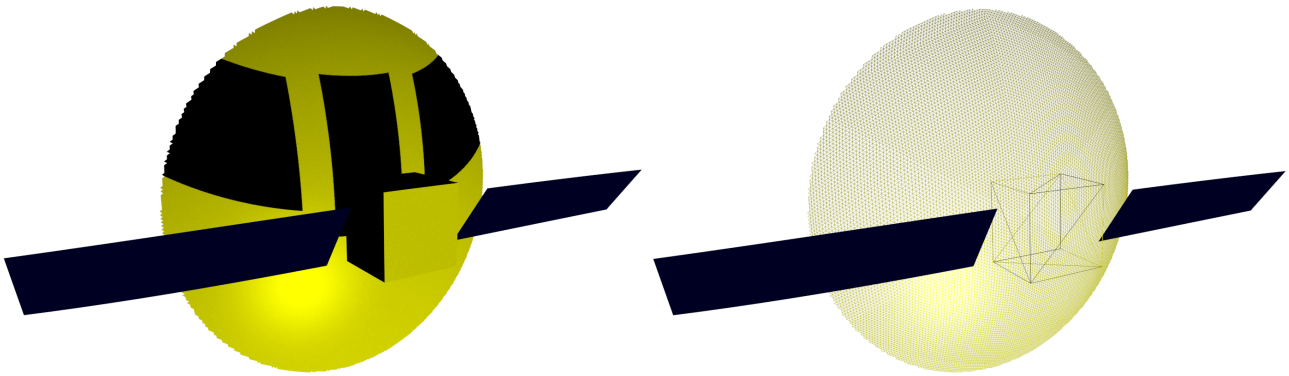


Рис. 1. Модель поверхности КА «Спектр-Р», пример возникающей тени и конечноэлементное представление поверхности КРТ

по отношению к солнечному потоку, направление действующей силы определено с достаточной точностью, а параметры светового давления скоррелированы. Для определенности полагается $\mu_2 = 0$. Для учета тени, возникающей на КРТ, поверхность антенны разбивается на множество элементов (рис. 1), центр каждого из которых проверялся на затенение от центрального блока и панелей солнечных батарей. Разработанная модель описывает силу светового давления, действующую на КА «Спектр-Р», при помощи трех параметров α_1 , μ_1 и α_2 .

Раздел 1.4 посвящен вопросам движения КА на платформе «Навигатор» вокруг центра масс. Из-за особенностей платформы движение центра масс КА частично зависит от движения вокруг центра масс. Эта зависимость связана с совместной работой систем ориентации и стабилизации аппарата. Системы включают в себя комплекс управления двигателями-маховиками (КУДМ), обеспечивающий переориентацию аппарата и компенсацию внешних возмущающих моментов во время высокоточного поддержания ориентации, и набор двигателей стабилизации (ДС), роль которых в данной работе ограничивается разгрузками ДМ. В разделе 1.4 дается описание расчета действующего на КА гравитационного момента и момента сил светового давления в рамках принятой модели. Момент сил светового давления зависит от ориентации аппарата относительно Солнца и введенных неизвестных коэффициентов α и μ различных элементов поверхности КА.

По известному движению аппарата вокруг центра масс и скоростям вращения ДМ из уравнений движения получается оценка возмущающего момента, зависящего, в том числе, от неизвестных коэффициентов светового давления. Рассматривается случай поддержания аппаратом постоянной ориентации в инерциальном пространстве, преобладающий в движении КА «Спектр-Р» и актуальный для будущих космических обсерваторий. Если на интервале (t_1, t_2) движение происходит вдали от гравитирующих тел, накап-

ливаемый двигателями-маховиками кинетический момент связан с моментом сил светового давления следующим образом:

$$\frac{\sum_{i=1}^N \mathbf{a}_i I_i [\Omega_i(t_2) - \Omega_i(t_1)]}{t_2 - t_1} = \mathbf{M}_{sp}(\mathbf{s}, \alpha_1, \dots, \alpha_m, \mu_1, \dots, \mu_m), \quad (2)$$

где $\mathbf{a}_i$, I_i , $\Omega_i(t)$ — соответственно направляющие косинусы оси вращения, момент инерции, скорость вращения i -го ДМ, $\mathbf{M}_{sp}$ — момент сил светового давления, $\mathbf{s}$ — единичный вектор направления солнечных лучей в связанной с аппаратом системе координат.

В заключительной части раздела описывается модель проведения разгрузки ДМ, с помощью которой связываются импульсы p_j отработанного топлива и разгружаемый кинетический момент ДМ

$$\sum_{i=1}^N \mathbf{a}_i I_i \Omega_i \approx \sum_{j=1}^{N_{\text{ДС}}} \mathbf{r}_j \times \mathbf{e}_j p_j, \quad p_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, N_{\text{ДС}}, \quad (3)$$

где $\mathbf{r}_j$ — радиус вектор центра сопла ДС в связанной с аппаратом системе, $\mathbf{e}_j$ — направление истечения рабочего тела ДС. В общем случае выражение (3) без введения дополнительных условий не обеспечивает однозначности перевода накопленного кинетического момента в импульс разгрузки. Эти дополнительные условия рассмотрены в главе 4.

Глава 2. Моделирование траекторных измерений

В данной главе формулируются правила, по которым формируются расчетные значения наблюдаемых величин, используемые при уточнении параметров движения. Отдельно рассматриваются внешнетраекторные измерения и бортовые измерения, получаемые по телеметрическому каналу. В числе внешнетраекторных измерений рассматриваются штатные запросные радиотехнические измерения наклонной дальности и радиальной скорости, беззапросные доплеровские измерения, лазерные измерения дальности и оптические измерения положения КА на небесной сфере. К бортовым измерениям отнесены импульсы разгрузок ДМ и накопленный ими кинетический момент.

В разделе 2.1 описывается алгоритм решения светового уравнения, связывающего моменты излучения, переизлучения и регистрации сигнала, которые определяют положение и скорости КА и измерительного пункта, необходимые для формирования расчетных значений траекторных измерений. В разделе 2.2 дается описание используемых моделей поправок к расчетным значениям наблюдаемых величин, которые учитывают особенности распространения сигналов в тропосфере и ионосфере.

Разделы с 2.3 по 2.7 посвящены построению расчетных значений траекторных измерений штатной радиотехнической системы, беззапросных до-

плеровских измерений, лазерных измерений дальности и оптических астрометрических измерений. В разделах также описывается алгоритм расчета частных производных расчетных значений наблюдаемых величин по вектору состояния аппарата, используемых при уточнении параметров движения.

В разделе 2.8 описываются измерения импульсов разгрузок $\Delta \mathbf{v}_i^0$, получаемые из телеметрической информации. Данные о длительности работы и расходе топлива одиночного включения ДС позволяют определить тягу и приращение скорости аппарата. Ориентация КА в момент разгрузки задает направление тяги двигателей. Измеренный импульс разгрузки определяется суммированием приращений скорости от отдельных включений ДС. Большая часть ошибки такого измерения сосредоточена в определении величины вектора $\Delta \mathbf{v}_i$, поскольку ориентация КА во время разгрузки поддерживается достаточно точно. В этом случае ковариационная матрица $\Delta \mathbf{v}_i^{(j)}$ представляется в виде

$$\mathbf{K} = \sigma_d^2(\mathbf{E} - \mathbf{e} \cdot \mathbf{e}^T) + \sigma_v^2 \mathbf{e} \cdot \mathbf{e}^T, \quad (4)$$

где $\mathbf{E}$ — единичная матрица, $\mathbf{e}$ — направление тяги двигателя, σ_v — ошибка определения величины вектора, σ_d — ошибка в направлениях, ортогональных $\mathbf{e}$. В случае если направления всех $\Delta \mathbf{v}_i^{(j)}$ совпадают, ковариационная матрица импульса разгрузки $\Delta \mathbf{v}_i$ представляется в более простом виде. Такая ситуация имеет место в случае КА «Спектр-Р», который компенсирует накопленный кинетический момент вдоль одной из осей связанной системы координат моментным образом, а в плоскости двух других осей — силовым образом при помощи ДС с одинаковым направлением тяги.

Раздел 2.9 содержит описание измерений внешнего возмущающего момента и соответствующих им ковариационных матриц. Скорость изменения кинетического момента системы ДМ равна внешнему возмущающему моменту, если КА не вращается (рис. 2). Вдали от Земли и других гравитирующих тел основным источником возмущающего момента является световое давление. Измеренное значение момента в этом случае соответствует левой части выражения (2), расчетное значение в правой части зависит от коэффициентов светового давления.

Глава 3. Определение орбиты

В третьей главе формулируется задача определения орбиты КА, движение которого подвергается возмущениям от разгрузок маховиков и изменяющегося светового давления, по набору траекторных измерений и телеметрической информации об ориентации аппарата, скоростях вращения ДМ и работе двигателей стабилизации. Описывается алгоритм решения и вычисления всех вспомогательных величин. Приводится пример решения задачи для

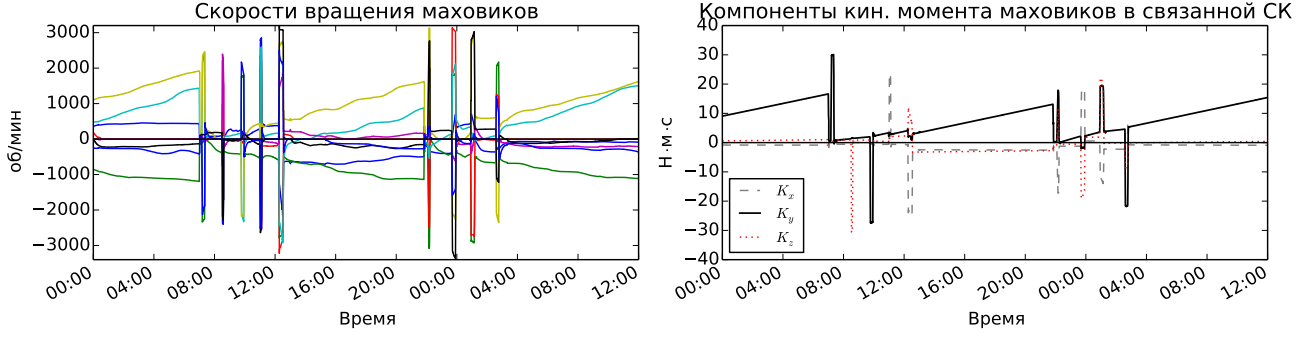


Рис. 2. Телеметрия КУДМ КА «Спектр-Р». Кинетический момент ДМ линейно возрастает на интервалах поддержания аппаратом постоянной ориентации.

КА «Спектр-Р», построенный по реальным траекторным и телеметрическим данным.

Постановка задачи определения параметров движения дается в разделе 3.1. В условии задачи световое давление, действующее на КА, зависит от неизвестных параметров $\{\alpha_i, \mu_i\}_{i=1}^m$. На интервале уточнения движение аппарата возмущено импульсами разгрузок ДМ $\{t_i, \Delta \mathbf{v}_i\}_{i=1}^n$, помимо этого в течение интервала аппарат N раз находился в неизменной ориентации в инерциальной СК вдали от притягивающих тел. Набор уточняемых параметров включает в себя вектор состояния КА в начальный момент времени внутри интервала уточнения, $2m$ параметров светового давления и векторы импульсов разгрузок

$$\mathbf{Q} = \{\mathbf{X}_0(t_0), \alpha_1, \dots, \alpha_m, \mu_1, \dots, \mu_m, \Delta \mathbf{v}_1, \dots, \Delta \mathbf{v}_n\}.$$

Уточнение параметров производится при помощи траекторных измерений Ψ и данных, полученных в результате обработки телеметрической информации, включающих измерения импульсов разгрузок $\{\Delta \mathbf{v}_i^0\}_{i=1}^n$ и рассогласования измеренных и расчетных величин возмущающего момента $\{\xi_j\}_{j=1}^N$, полученные из (2). Определяется вектор параметров $\mathbf{Q}$, минимизирующий функционал [3; 4]

$$\begin{aligned} \Phi = & (\Psi_o - \Psi_c)^T \mathbf{P} (\Psi_o - \Psi_c) + \sum_{j=1}^N \xi_j^T \mathbf{P}_j^{sp} \xi_j + \\ & + \sum_{i=1}^n (\Delta \mathbf{v}_i^0 - \Delta \mathbf{v}_i)^T \mathbf{P}_i (\Delta \mathbf{v}_i^0 - \Delta \mathbf{v}_i), \end{aligned} \quad (5)$$

где индексы o и c вектора траекторных измерений обозначают измеренные и расчетные значения соответственно, $\mathbf{P}$ — весовая матрица траекторных измерений, $\mathbf{P}_i$ и $\mathbf{P}_j^{sp}$ — весовые матрицы измерений импульсов разгрузок и возмущающих моментов, полученные в разделах 2.8 и 2.9.

В разделе 3.2 описывается алгоритм поиска неизвестного вектора $\mathbf{Q}$. Определение параметров осуществляется при помощи последовательных приближений, полученных методом обобщенных касательных Ньютона. Поправки к приближению вектора параметров $\mathbf{Q}$ на каждом шаге определяются решением системы нормальных уравнений

$$\mathbf{A} \cdot \Delta \mathbf{Q} = \mathbf{B}, \quad (6)$$

матрица $\mathbf{A}$ и правые части $\mathbf{B}$ которой выражаются через входящие в (5) рассогласования, весовые матрицы и частные производные $\partial \Psi_c / \partial \mathbf{Q}$, $\partial \xi_j / \partial \mathbf{Q}$ и $\partial \Delta \mathbf{v}_i / \partial \mathbf{Q}$.

Частные производные траекторных измерений Ψ_c рассчитываются при помощи производных измерений по текущему вектору состояния, описанных во второй главе, и производных текущего вектора состояния по уточняемым параметрам $\partial \Psi_c / \partial \mathbf{Q} = \partial \Psi_c / \partial \mathbf{X} \cdot \partial \mathbf{X} / \partial \mathbf{Q}$. Последние получаются интегрированием дополнительных $36 + 12m$ уравнений в вариациях для определения производных по $\mathbf{X}_0$ и параметрам светового давления. Производные по импульсам разгрузки рассчитываются следующим образом [3]:

$$\frac{\partial \mathbf{X}(t)}{\partial \Delta \mathbf{v}_i} = \begin{cases} \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{X}_0} \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{X}_0} \Big|_{t_i} \right)^{-1} \cdot \bar{\mathbf{E}} & , t \geq t_i, \\ 0 & , t < t_i. \end{cases} \quad (7)$$

где $\bar{\mathbf{E}}$ — последние 3 столбца единичной матрицы 6×6 .

При расчете частных производных измерений возмущающего момента по уточняемым параметрам ненулевыми предполагаются только производные по параметрам светового давления. Производные импульсов разгрузок рассчитываются тривиально, поскольку импульсы входят в число уточняемых параметров.

В разделе 3.3 разработанная методика используется для уточнения параметров движения КА «Спектр-Р» на двух интервалах: с 20.02.2013 по 10.04.2013 и с 10.04.2013 по 30.05.2013. Для оценки эффективности разработанного метода орбита аппарата на выбранных интервалах уточняется четырьмя способами, различающимися моделями движения КА и набором уточняемых параметров.

1. В первом варианте возмущение от светового давления рассчитывается по упрощенной модели и зависит только от одного уточняемого параметра κ . Разгрузки ДМ не учитываются.
2. Во втором варианте возмущение от светового давления также рассчитывается по упрощенной модели с одним уточняемым параметром. Разгрузки ДМ учитываются, но не уточняются, а используются измеренные значения.

№	Световое давление	Разгрузки	σ_1	σ_2	Δr , км	Δv , мм/с
1	Упрощенное, $\propto$	Не учитываются	12.43677	9.18588	71.71	288.1
2	Упрощенное, $\propto$	Учитываются	4.72914	6.78832	36.76	113.3
3	Сложное, $\alpha_1, \mu_1, \alpha_2$	Учитываются	1.20896	0.63767	7.57	8.9
4	Сложное, $\alpha_1, \mu_1, \alpha_2$	Уточняются	0.36210	0.31607	0.21	2.3

Таблица 1. Безразмерные СКО траекторных измерений, полученные в результате уточнения орбиты КА «Спектр-Р» на интервалах 20.02.2013–10.04.2013 (σ_1) и 10.04.2013–30.05.2013 (σ_2). Рассогласование полученных решений в момент времени 10.04.13 00:00:00 UT по положению (Δr) и по скорости (Δv).

3. В третьем варианте возмущение от светового давления учитывается согласно разработанной модели, зависящей от трех уточняемых параметров α_1 , μ_1 и α_2 . Модель учитывает ориентацию аппарата в пространстве. Разгрузки ДМ учитываются, но не уточняются.
4. Четвертый вариант является основным. Он включает сложную модель светового давления, зависящую от трех уточняемых параметров и учитывающую ориентацию КА. Импульсы разгрузок уточняются.

При уточнении ошибка измерения дальности полагалась равной 100 м, ошибка запросных измерений радиальной скорости была установлена на уровне 10 мм/с, беззапросных измерений — 5 мм/с. Предполагалось, что ошибки оптических измерений прямого восхождения и склонения равны одной угловой секунде и не имеют между собой корреляции. Результаты согласования траекторных измерений приведены в таблице 1. Как видно из таблицы, постепенное улучшение модели движения приводит к улучшению согласования измерений; учет сложного светового давления и уточнение импульсов разгрузок улучшает согласование измерений в 29–34 раза на выбранных интервалах уточнения. Рассогласования измеренных и расчетных величин траекторных измерений, полученные с использованием сложной модели светового давления и уточнением импульсов разгрузок, приведены на рисунке 3.

Решения, полученные на разных интервалах при помощи одной и той же модели и методики уточнения, сравнивались в промежуточной точке для дополнительной проверки точности. Результаты сравнения приведены в двух последних столбцах таблицы 1.

Для каждого из способов уточнения полученные на двух интервалах параметры светового давления согласуются между собой. В случае использования сложной модели светового давления и уточнении импульсов разгрузок коэффициенты светового давления уточнились в следующих интервалах: $\alpha_1 = 0.86 - 0.87$, $\mu_1 = 0.08 - 0.13$, $\alpha_2 = 0.07 - 0.09$, что хорошо соотносится со

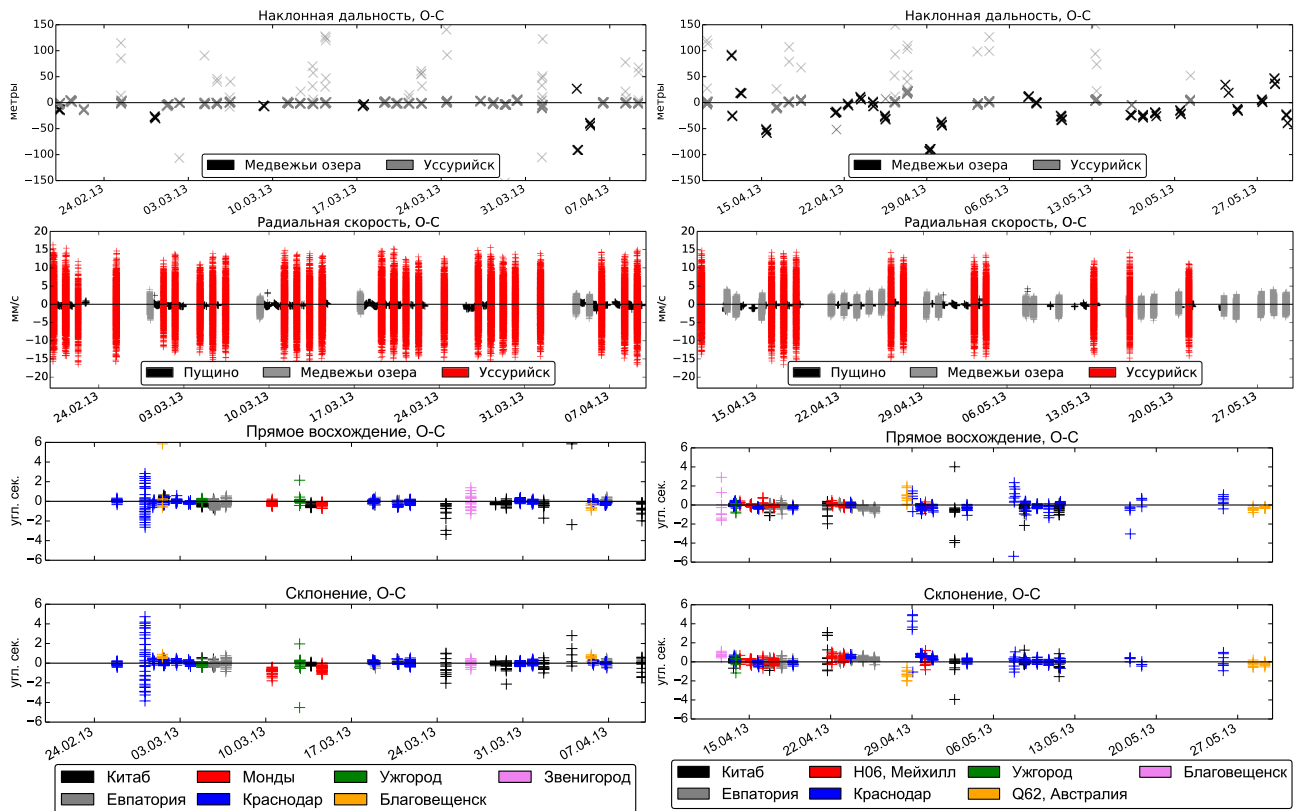


Рис. 3. Рассогласования траекторных измерений КА «Спектр-Р»

свойствами материалов поверхностей, которым соответствуют эти коэффициенты. Результаты согласования траекторных измерений и решений, полученных на соседних интервалах, подтверждают эффективность предложенной модели светового давления и методики определения параметров движения.

Глава 4. Прогнозирование параметров движения

В четвертой главе рассматривается задача прогнозирования движения КА на базе модуля «Навигатор», подверженного возмущениям со стороны работы бортовых систем. Исследуется связь действующего светового давления с разгрузками маховиков на примере фактических данных КА «Спектр-Р». Предлагается методика прогнозирования движения с учетом указанных возмущающих факторов, а также исследуется ее эффективность на примере движения КА «Спектр-Р».

Раздел 4.1 посвящен расчету будущих возмущений движения аппарата, наибольшая неопределенность которых обусловлена разгрузками. Для учета будущих разгрузок прогнозируются времена их проведения и величины соответствующих импульсов. Из накопленного ДМ кинетического момента при помощи (3) и дополнительного условия $\sum_{i=1}^{N_{\text{ДС}}} p_i \rightarrow \min$ рассчитывается величина импульса оптимальной разгрузки. Рассчитанные таким образом

импульсы хорошо согласуются с измеренными значениями, полученными из телеметрии ДС (см. рис. 4).

Время проведения разгрузки определяется рядом правил. Согласно основному из них, разгрузка производится, если скорость вращения одного или нескольких маховиков достигает предельного значения, т.е. кинетический момент ДМ выходит за границы определенного множества U . Набор остальных правил может варьироваться в зависимости от способа управления ориентацией КА.

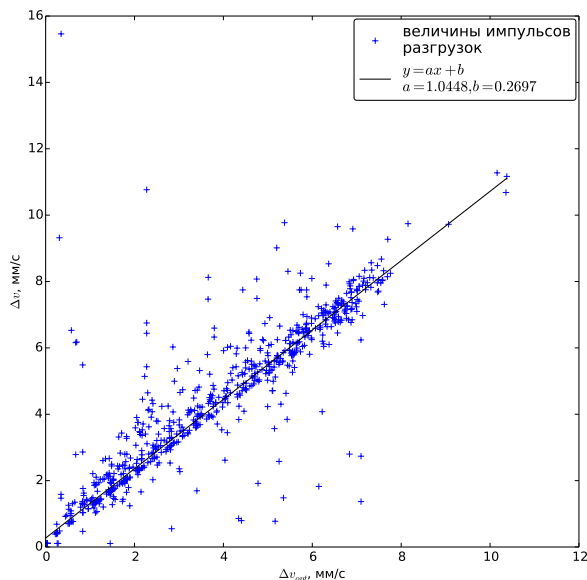


Рис. 4. Соотношение величин импульсов оптимальных и фактических разгрузок 08.2011–09.2013

зировались регулярные разгрузки, проводимые раз в сутки в фиксированное время¹, соответствующее технологическому времени КА.

Построено три варианта прогноза. Первый рассчитывался без учета разгрузок и сложного светового давления. Второй и третий — с использованием вынужденных и регулярных разгрузок соответственно. На рисунке 5 изображено отклонение прогнозного положения КА от фактического в продольном направлении, составляющее основную часть ошибки. Максимальное отклонение прогноза, рассчитанного по упрощенной модели, не использующей результаты этой работы, составило 387 км, прогноза с использованием вынужденных разгрузок — 93 км, с использованием регулярных разгрузок — 52 км. Таким образом, предложенная методика позволила улучшить точность прогноза положения КА более чем в 7 раз на исследуемом интервале.

¹Условие проведения разгрузки при достижении критического кин. момента также имело место, но на практике не достигалось.

Проверка описанной методики прогноза с учетом возмущений от разгрузок ДМ проводится на КА «Спектр-Р» и описывается в разделе 4.2. Прогноз движения осуществляется на временной интервал с 10.04.2013 по 30.05.2013. При этом используются параметры, полученные в результате уточнения на интервале с 20.02.2013 по 10.04.2013 (см. главу 3). По известным параметрам светового давления и ориентации КА на интервале прогнозирования было рассчитано накопление кинетического момента ДМ и будущие разгрузки. В одном случае прогнозировались вынужденные разгрузки, возникающие при выходе кинетического момента из множества U . В другом случае прогно-

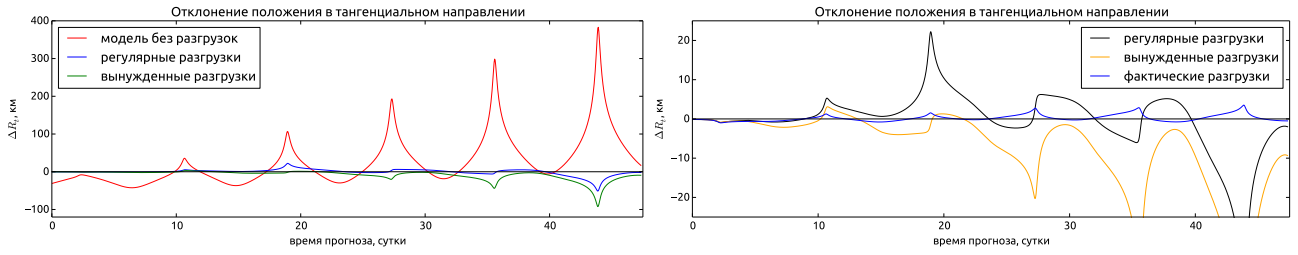


Рис. 5. Отличие рассчитанных прогнозов от фактического положения в тангенциальном направлении. На правом графике добавлен прогноз, рассчитанный с использованием фактических разгрузок, проведенных на интервале прогнозирования.

Раздел 4.3 посвящен прогнозированию видимого блеска КА, для которого построена модель светового давления, описанная в главе 1. Знание видимого блеска аппарата необходимо для эффективного планирования работы оптических наблюдательных средств, чьи измерения оказываются особо полезными в случае аппаратов со сложной динамикой. Проблема актуальна для удаленных КА, наблюдаемых на границе проникания телескопа, поскольку в зависимости от ориентации КА, видимый блеск для наблюдателя может изменяться на несколько величин.

Видимый блеск определяется плотностью светового потока, отраженного от поверхности КА в сторону наблюдателя. Подход, используемый в динамической модели, недостаточно точно описывает распределение зеркально отраженного света. В разработанной модели блеска интенсивность зеркально отраженного света пропорциональна $\cos^k \theta'$, где θ' — угол между направлением на наблюдателя и направлением зеркального отражения [5]. Отражение также разделяется на зеркальное и диффузное, их долевое соотношение описывается коэффициентами α и μ поверхности.

Модель видимого блеска построена для КА «Спектр-Р». Разработанная модель обеспечивает в 1.5 раз лучшее согласование попутных фотометрических измерений, чем упрощенная модель сферы, не учитывающая ориентацию аппарата. Такое согласование достигается с использованием коэффициентов α и μ , полученных в ходе уточнения орбиты. При использовании уточненных значений $\alpha_1 = 0.57219$, $\mu_1 = 0.17931$ согласование измерений улучшается в 1.9 раз по сравнению с простой моделью.

Заключение

Отмечается:

На основе разработанной модели силы и момента светового давления, учитывающей форму и характеристики поверхности КА, была решена задача определения орбиты КА «Спектр-Р» и навигационной привязки интерферометрических измерений с ошибками в 20–30 раз меньшими, чем при исполь-

зовании стандартных моделей. Примененный метод использует как траекторную, так и телеметрическую информацию.

Учет ориентации КА на интервале прогнозирования и предстоящих разгрузок ДМ позволяет существенно повысить точность прогноза движения аппарата. В приведенном в качестве примера случае ошибка прогнозирования положения КА «Спектр-Р» на 50 суток вперед уменьшилась в 7 раз (с 387 км до 52 км).

Разработанная математическая модель видимого блеска позволяет в полтора–два раза уменьшить ошибку прогноза блеска КА «Спектр-Р» по сравнению с моделью, не учитывающей форму и ориентацию аппарата. Построенная модель согласуется с динамической моделью влияния светового давления.

Список литературы

1. Кардашев Н., Хартов В., ..., Захваткин М. [и др.] Космическая миссия «Радиоастрон». Первые результаты // Вестник НПО им. С.А.Лавочкина. — 2012. — Т. 3, № 14. — С. 4–21. — ISSN 2075-6941.
2. Кардашев Н., Хартов В., ..., Захваткин М. [и др.] “Радиоастрон” – телескоп размером 300 000 км: основные параметры и первые результаты наблюдений // Астрономический Журнал. — 2013. — Т. 90, № 3. — С. 179–222. — DOI: 10.7868/S000462991303002X.
3. Боровин Г., Захваткин М., Степаньянц В., Тучин А. [и др.] Определение параметров орбиты и маневра космического аппарата при заданном времени приложения импульса // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. — 2012. — Спец. выпуск № 4 «Математическое моделирование». — С. 76–86.
4. Боровин Г., Захваткин М., Степаньянц В., Тучин А. [и др.] Идентификация маневров, выполненных двигателями малой тяги космического аппарата // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. — 2012. — Спец. выпуск № 3 «Математическое моделирование». — С. 27–36.
5. Захваткин М. Моделирование видимого блеска космического аппарата «Спектр-Р» для планирования астрометрических наблюдений // Наука и образование. — 2013. — Май. — № 3. — С. 10. — DOI: 10.7463/0513.0571011.

Подписано в печать 16.01.2014. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,3. Тираж 100 экз. Заказ П-60.

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 125047, Москва, Миусская пл., 4