



КОСМОНАВТИКА И РАКЕТОСТРОЕНИЕ

1(74)

2014

БАЛЛИСТИКО-НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОЛЁТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «СПЕКТР Р»

Канд. физ.-мат. наук *Г.С. Заславский*, *М.В. Захваткин*, *И.С. Ильин*,
канд. физ.-мат. наук *В.В. Корянов*, канд. физ.-мат. наук *А.С. Самотехин*,
канд. физ.-мат. наук *В.А. Степаньянц*, докт. физ.-мат. наук *А.Г. Тучин*,
канд. физ.-мат. наук *Д.А. Тучин*, канд. физ.-мат. наук *В.А. Шишов*,
канд. физ.-мат. наук *В.С. Ярошевский* (ФГБУН Институт прикладной
математики им. М.В. Келдыша РАН)

Рассматриваются в рамках проекта «Радиоастрон» вопросы баллистико-навигационного обеспечения (БНО) полёта космического аппарата (КА) «Спектр Р», выведенного на рабочую орбиту 18 июля 2011 г., а также указывается основная задача проекта. Представляются методы организации работ; проведения измерений текущих навигационных параметров, оперативного определения орбиты и расчёта баллистических параметров коррекций траектории движения КА. Особое внимание уделяется проблеме реконструкции орбиты для обработки данных наземно-космического интерферометра. Описывается специальная модель давления солнечной радиации, позволяющая учесть особенности конструкции КА.

Ключевые слова: «Радиоастрон», «Спектр Р», Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (АКЦ ФИАН).

Ballistic-Navigation Support for Spectrum P Spacecraft Mission. G.S. Zaslavsky, M.V. Zakhvatkin, I.S. Il'in, V.V. Koryanov, A.S. Samotokhin, V.A. Stepan'yants, A.G. Touchin, D.A. Touchin, V.A. Shishov, V.S. Yaroshevsky. Within the Radioastron project questions of the Ballistic-Navigation Support for Spectrum P Spacecraft (SC) Mission, reached an operational orbit on July 18, 2011, and indicates the main objective of the project are examined. Methods of the work organization, the measurement current navigation parameters, the operational orbit determination and the calculation of ballistic trajectory corrections parameters of the SC are presented. The particular attention is paid to the problem of the reconstruction of the orbit data for the ground-space interferometer. The special model solar radiation pressure, allowing the SC design peculiarities, is described.

Key words: Radioastron, Spectrum P, P.N. Lebedev Astro-Physics Institute, Russian Academy of Sciences (AP I RAS).

Старт космического аппарата «Спектр Р» проекта «Радиоастрон» состоялся 18 июля 2011 г. в 05:31:17.91 по декретному московскому времени. Выведение КА на рабочую орбиту обеспечивалось ракетой-носителем «Зенит-2SB.80» и разгонным блоком «Фрегат СБ» [1]. Параметры рабочей орбиты в системе координат J2000 составили: 339,9 тыс. км по расстоянию апоцентра; 6,95 тыс. км по расстоянию перицентра; 8,32 сут. по периоду; 51,6 град по наклону; 302 град по аргументу перицентра; 342,2 град по долготе восходящего узла.

Космический эксперимент «Радиоастрон» – это проект Роскосмоса, Российской академии наук и международной научной кооперации по изучению вселенной. Основной задачей проекта с использованием комплекса научной аппаратуры Астрокосмического центра Физического института им. П.Н. Лебедева является выполнение радиointерферометрических наблюдений со сверхдлинными базами. Космический радиотелескоп (КРТ) диаметром 10 м на борту КА «Спектр Р» –

элемент наземно-космического интерферометра, вынесенного относительно наземных радиотелескопов на расстояние, ограниченное апогеем орбиты КА. В качестве наземных элементов интерферометра используются крупнейшие радиотелескопы, в том числе: 300-метровый «Аресибо» и 100-метровый «Грин-



Рис. 1. Изменение наклона орбиты в зависимости от времени

Бэнк» в США; 100-метровый «Эффельсберг» в Германии; 70-метровый «Тидбинбилла» в Австралии и 64-метровый «Усада» в Японии. Эволюция орбиты КА «Спектр Р» (рис. 1 – 4) позволяет в ходе полёта вести наблюдение участков небесной сферы в различных режимах для решения научных задач проекта.

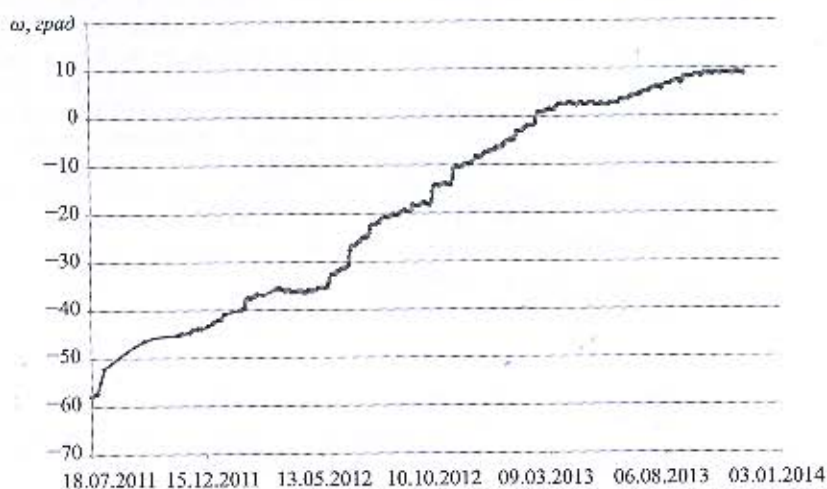


Рис. 2. Изменение аргумента перицентра орбиты в зависимости от времени

На борту используемого КА установлены приборы, разработанные в Институте космических исследований (ИКИ) РАН для плазменно-волнового эксперимента «Плазма Ф», в задачи которого входит мониторинг основных параметров межпланетной среды, исследование высокочастотной её турбулентности и магнитосферы Земли.

Космический аппарат «Спектр Р» создан в ППО им. С.А. Лавочкина на базе космической платформы «Навигатор», успешно отработавшей на КА «Электро Л».

Также в НИО им. С.А. Лавочкина создан космический телескоп уникальной конструкции [1].

Управление космическим комплексом «Спектр Р» осуществляет главная оперативная группа управления (ГОГУ), созданная на базе НПО им. С.А. Лавочкина, с участием специалистов организаций-разработчиков бортовых систем, с привле-

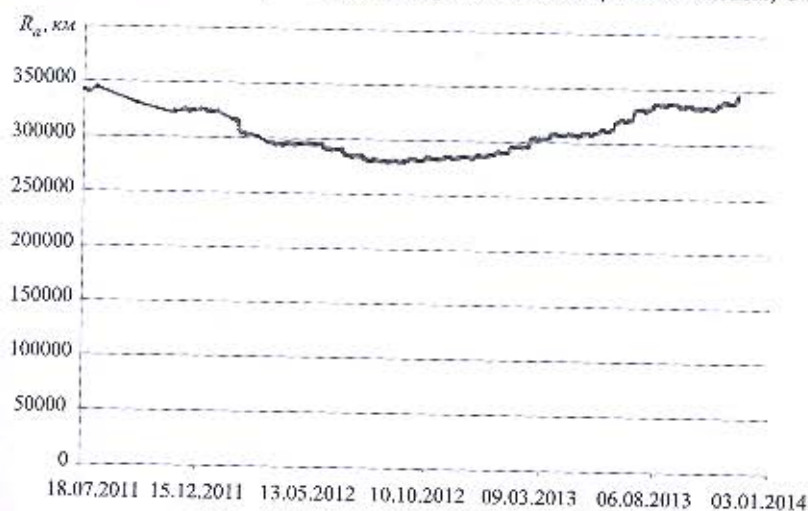


Рис. 3. Изменение расстояния апоцентра в зависимости от времени

чением наземного сегмента управления и наземного научного комплекса. Расчёт целеуказаний, обработку результатов измерений параметров орбиты, реконструкцию и прогнозирование орбиты КА, а также расчёт баллистических параметров коррекции рабочей орбиты КА и условий освещённости аппарата Солнцем обес-

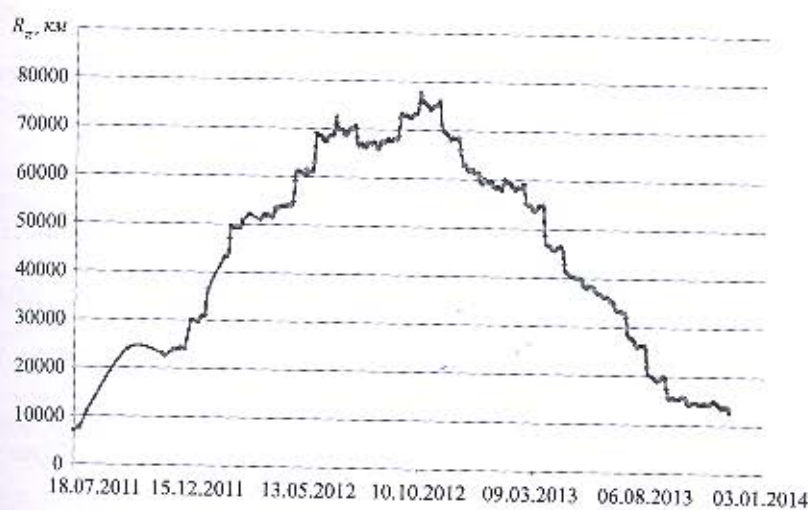


Рис. 4. Изменение расстояния перигея в зависимости от времени

печивает Баллистический центр Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН (БЦ ИПМ).

Наряду с работами по оперативному баллистико-навигационному обеспечению управления полётом КА «Спектр Р» БЦ ИПМ в тесном сотрудничестве с АКЦ ФИАН участвует в реализации научной программы проекта – проводит высокоточное определение параметров движения аппарата, необходимое для обработки

научной информации с целью корреляции его орбиты. Для решения этой достаточно сложной задачи в дополнение к траекторным измерениям привлечены лазерные измерения дальности, полученные отечественными и зарубежными станциями лазерной локации. В целях повышения точности определения параметров движения КА успешно применяется специальная методика обработки баллистической части телеметрической информации.

ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ ПО БАЛЛИСТИКО-НАВИГАЦИОННОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ КА

Подготовка к работе по баллистико-навигационному обеспечению полёта КА «Спектр Р» была начата за несколько лет до его запуска. Выполнены априорные оценки точности определения параметров движения КА в условиях периодического проведения разгрузок двигателей-маховиков, предложена типовая программа проведения измерений текущих навигационных параметров (ИТНП). Следует отметить, что для обработки данных наземно-космического интерферометра необходимо, чтобы погрешность определения положения не превышала ± 600 м, полной скорости $\pm 0,02$ м/с, а полного ускорения $\pm 10^{-8}$ м/с². В ходе подготовительных работ выяснилось, что по измерениям наклонной дальности и радиальной скорости, выполняемым двумя командно-измерительными станциями в Медвежьих Озёрах и Уссурийске, невозможно обеспечить точность определения параметров движения, необходимую для обработки данных наземно-космического интерферометра. Поэтому было принято решение об установке на борту КА «Спектр Р» угловых отражателей. Для обеспечения БНО был также выполнен цикл организационных мероприятий по подготовке к работе с КА «Спектр Р» сети наземных станций лазерной дальнометрии.

В ходе подготовки к БНО полёта КА «Спектр Р» был разработан и согласован протокол по константно-эфемеридному обеспечению, который содержит описание систем координат, описание шкал времени, модели учёта прецессии, нутации и движения полюсов, а также физические константы, модель геопотенциала, эфемериды Луны и планет.

На этапе подготовки к БНО полёта КА «Спектр Р» был согласован каталог форм обмена центра управления полётом (ЦУП) в ИПО им. С.А. Лавочкина с БЦ ИИМ.

За месяц до запуска КА была проведена юстировка командно-измерительных станций в Уссурийске и Медвежьих Озёрах по геостационарным КА, позволившая выявить и устранить ряд недостатков передачи целеуказаний и проведения ИТНП. Однако в ходе полёта возник ещё целый ряд серьёзных проблем.

Основные функции, выполняемые БЦ ИИМ в процессе БНО полёта КА «Спектр Р», следующие:

- приём по каналам связи ИТНП КА «Спектр Р», их первичная обработка, оценка качества и накопление в базе данных БЦ ИИМ;
- приём из центра управления полётом КА «Спектр Р», обработка и накопление данных, поступающих в составе телеметрической информации с борта КА и используемых при проведении баллистических расчётов в БЦ ИИМ;
- определение текущих кинематических параметров траектории движения КА и прогнозирование их значений на заданные моменты времени;
- расчёт начальных условий (моментов времени и соответствующих им кинематических параметров траектории полёта КА) для передачи на борт;
- расчёт интервалов видимости и целеуказаний для командно-измерительных систем и наземных станций слежения;
- расчёт на текущей траектории полёта КА по рабочей орбите интервалов времени, в рамках которых возможно проведение сеансов лазерной дальнометрии;

- разработка предложений по схеме проведения сеансов ИТНП и участие в планировании проведения сеансов ИТНП;
- расчёт на текущей траектории полёта КА по рабочей орбите интервалов времени наличия затенения относительно КА диска Солнца Землёй и Луной, а также степени этого затенения;
- расчёт времени баллистического существования рабочей орбиты КА;
- расчёт баллистических параметров коррекции движения КА с помощью его бортовой двигательной установки (ДУ), используемой для изменения характеристик рабочей орбиты КА;
- баллистический анализ исполнения коррекции траектории движения КА по рабочей орбите.

Выполнение расчётов по БНО КА «Спектр Р» производилось в БЦ ИПМ на двух серверах (основном и резервном) под управлением операционной системы (ОС) *FreeBSD*. На рабочих местах использовались персональные компьютеры под управлением ОС *Windows*. Для сохранения исходных и промежуточных данных, а также результатов расчётов на серверах применялась файловая система.

Так как при обработке данных космического интерферометра существенное значение имеют орбитальные данные, которые получаются в ходе реконструкции орбиты, необходимо было обеспечить возможность повторной обработки любой информации, накопленной с начала полёта. Выполнение этого требования осложнялось тем, что в протоколы получения информации с наземных станций слежения вносились изменения в работу самих станций слежения. Например, по решению ГОГУ 14 и 22 мая 2012 г. была проведена юстировка измерительного канала дальности контрольно-измерительной системы (КИС) «Клён Д» по КА «Электро Л». В результате юстировки была выявлена систематическая ошибка 600 м в измерениях наклонной дальности КИС «Клён Д». Систематическая ошибка была учтена при обработке измерений в БЦ ИПМ. Была проведена повторная обработка ИТНП КИС «Клён Д» с исключением этой систематической ошибки. Однако после доработки программного обеспечения КИС «Клён Д» систематическая составляющая стала исключаться на КИС. Таким образом, до определённого момента времени при обработке данных в БЦ ИПМ систематическая составляющая должна учитываться, а после – нет.

Для автоматизации обработки информации используется естественное расписание данных по датам. На каждую дату полёта КА создаётся отдельная директория, которая в свою очередь содержит несколько рабочих поддиректорий. В рабочих поддиректориях выполняется первичная обработка, сохраняются её результаты и ИТНП, определяются параметры движения КА, формируются целеуказания наземным станциям и рассчитываются данные для передачи на борт.

Необходимая гибкость программного обеспечения достигнута за счёт использования скриптов для командного процессора *Bash*. Разработаны типовые скрипты, которые обеспечивают первичную обработку ИТНП, определение параметров движения, расчёт целеуказаний, а также данных для передачи на борт КА и т.д. При необходимости учёта особенностей обработки информации, получаемой в некоторую дату, в скрипт вносятся изменения.

Рассмотрим логику информационного обмена между ЦУПом в НПО им. С.А. Лавочкина и БЦ ИПМ. Обмен файлами осуществляется по оптоволоконному каналу связи с использованием *FTP*-протокола через сервер НПО им. С.А. Лавочкина. Бортовой центр ИПМ для реализации обменов получает аккаунт на сервере. Пользователь после авторизации на сервере попадает в домашний каталог, в котором находятся две поддиректории:

- *mos2ext* – для передачи информации в направлении ЦУП – ИПМ;
- *ext2mos* – для передачи информации в направлении ИПМ – ЦУП.

На сервере БЦ ИПМ также имеются две поддиректории с такими же именами. Программное обеспечение сервера БЦ ИПМ обеспечивает периодический просмотр каталогов как на сервере ИПО им. С.А. Лавочкина, так и на сервере БЦ ИПМ. При появлении нового файла или поддиректории в каталоге pos2ex1 на сервере в ИПО им. С.А. Лавочкина файл или поддиректория копируется на сервере БЦ ИПМ. Аналогично этому при появлении нового файла или поддиректории в каталоге ex12pos на сервере БЦ ИПМ обеспечивается автоматическое копирование файла или поддиректории на сервере ИПО им. С.А. Лавочкина.

ИЗМЕРЕНИЯ ТЕКУЩИХ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Для навигационного обеспечения управления полётом КА «Спектр Р» используются две командно-измерительные станции: «Клён Д» в г. Уссурийске на базе антенного комплекса П-2500 и «Кобальт Р» в Медвежьих Озёрах (Московская область) на базе антенного комплекса ТПА-1500 (ОАО «Особое конструкторское бюро Московского энергетического института») [1]. Эти станции работают в *S*-диапазоне и обеспечивают измерения наклонной дальности и радиальной скорости.

Начиная с сентября 2011 г. использовались все возможности КА для проведения сеансов лазерной локации с целью уточнения параметров его движения и калибровки штатной радиотехнической системы.

Дальности, полученные станциями лазерной локации, – самый ценный вид измерений. Они имеют очень высокую точность и в данном проекте используются, главным образом, в целях калибровки штатных радиотехнических измерений. Для их получения необходимо выполнение ряда условий. Поскольку уголкового отражателя установлены только на днище аппарата в направлении – *X*, при проведении каждого сеанса лазерной локации требуется определённая ориентация КА, которая не всегда может быть обеспечена. Кроме того, возможность проведения лазерных измерений ограничивается погодными условиями, временем суток и расстоянием между станцией и аппаратом. Большинство имеющихся станций лазерной локации рассчитано на работу с низколетящими КА и не способно принять отражённый сигнал от КА, находящихся выше геостационарной орбиты. Космический аппарат «Спектр Р» является первым высокопланетным искусственным спутником Земли с установленными уголковыми отражателями, удаляющимся на расстояния, сопоставимые с лунными. Пока такие измерения проводятся на двух станциях: обсерваторией «Грас» на Лазурном Берегу (Франция) и лазерным оптическим локатором контроля космического пространства на Северном Кавказе.

Впервые провести лазерную локацию КА удалось 15 ноября 2011 г. обсерваторией «Грас» при дальности до КА примерно 65 тыс. км. Всего к декабрю 2013 г. было осуществлено 23 успешных сеанса лазерной локации, один из которых – 15 ноября 2013 г. со станции на Северном Кавказе – был проведён на рекордной для космических аппаратов дальности 330 тыс. км.

Наземно-космический интерферометр «Радиоастрон» может функционировать в двух режимах синхронизации: от бортового водородного стандарта частоты (режим «*H*-мазер») и от наземного водородного стандарта частоты наземной станции слежения (НСС). Последний вариант осуществляется путём использования двухсторонней когерентной петли радиосвязи на частоте 7,2 ГГц (НСС – КА) и 8,4 ГГц (КА – НСС). Режим «*H*-мазер» успешно подтвердил свою работоспособность и считается основным.

Главным приёмником сигнала высокоинформативного радиоканала (ВИРК) является радиоастрономическая обсерватория в г. Пуцзино (Московская область), через которую в режиме реального времени измерения с аппарата передаются на Землю. В Пуцзинской обсерватории создана наземная станция слежения на базе радиотелескопа РТ-22. Станция оснащена оборудованием для приёма сигналов в

X- и Ки-диапазонах (8,4 и 15,0 ГГц), используемых для синхронизации космического и наземного плеча интерферометра, а также передачи больших объёмов данных с КА на Землю. Несущая частота сигнала ВИРК, формируемая при помощи водородного стандарта на борту КА, имеет высокую стабильность. Измеренная на Земле частота принятого сигнала достаточно точно информирует о радиальной скорости аппарата. Ввиду того, что сигнал формируется на борту КА, а измерения частоты выполняются на Земле, в процессе обработки беззапросных доплеровских измерений требуется учёт релятивистских эффектов. С осени 2013 г. в части приёма научных данных с аппарата Пушчинскую обсерваторию дополняет комплекс Национальной радиоастрономической обсерватории США на базе 42-метровой антенны в Грин-Бэнке, также предоставляющий беззапросные доплеровские измерения.

Для повышения точности определения параметров движения КА «Спектр Р» обеспечено проведение беззапросных доплеровских измерений с помощью радиотехнического комплекса «Фобос» в Уссурийске и радиотехнического комплекса «Кобальт» в Медвежьих Озёрах [2]. Вопросы, касающиеся первичной обработки ИТНП, рассмотрены в работе [3].

Для определения параметров движения КА «Спектр Р» используются оптические измерения, основная часть которых производится участниками проекта «Научная сеть оптических инструментов астрометрических и фотометрических наблюдений» (ПСОИ АФН) с привлечением средств АКЦ ФИАН. Данный вид измерений имеет относительно невысокую точность в пересчёте на прямоугольные координаты по сравнению с традиционными радиотехническими измерениями дальности, однако позволяет получить оценку направления, т.е. положения КА в плоскости, ортогональной радиальному направлению. Эта оценка может быть получена также исходя из радиальных измерений, накопленных на временном интервале, в результате динамики аппарата. Тем не менее подобный подход применительно к аппаратам, долгое время находящимся вдали от притягивающих тел, малоэффективен, так как из-за слабо выраженной динамики приходится использовать протяжённые мерные интервалы, в пределах которых существенными становятся ошибки модели движения. Астрометрические измерения позволяют получить более точные орбиты в коротких интервалах, а также помогают контролировать качество орбит, полученных на больших мерных дугах.

По заданию ГОУ КА «Спектр Р» в декабре 2012 г. БЦ ИПМ провел анализ качества ИТНП, в процессе которого было выполнено сравнение невязок измерений скорости наземного радиотехнического комплекса (НРТК) «Фобос» в X-диапазоне с аналогичными невязками измерений, выполненных системой «Клён Д» в С-диапазоне. Среднеквадратичное отклонение измерений скорости КИС «Клён Д» составило 5 мм/с, а НРТК «Фобос» – 1 мм/с. При дальнейшем планировании сеансов измерений количество сеансов в X-диапазоне было увеличено.

В штатном режиме беззапросные измерения выполняются в ходе проведения научных сеансов и регистрируются Пушчинской обсерваторией на двух частотах – 8,4 и 15 ГГц. По решению ГОУ КА «Спектр Р» измерения на частоте 8,4 ГГц стали выполнять НРТК «Фобос», расположенный в Уссурийске, и «Кобальт», расположенный в Медвежьих Озёрах. При этом для выполнения измерений НРТК «Кобальт» использовался процессор *Cortex*.

Радиальная скорость в X-диапазоне измерялась в беззапросном режиме. Высокую точность этих измерений обеспечил бортовой высокостабильный водородный стандарт частоты. Благодаря этому удалось экспериментально проверить релятивистские эффекты.

В августе 2013 г. начала работать станция ВИРК, расположенная в Грин-Бэнке. Таким образом, для выполнения измерений радиальной скорости использовались четыре наземные станции трёх типов: НРТК «Фобос» в Уссурийске, НРТК

«Кобальт» с процессором *Cortex* в Медвежьих Озёрах, станция ВИРК в Пущино и станция ВИРК в Грин-Бэнке. При этом станции ВИРК и НРТК «Кобальт» выполняли измерения мгновенных значений доплеровского сдвига, а станция НРТК «Фобос» – измерения пробега нециклической, т.е. не ограниченной значением 2π , фазы сигнала промежуточной частоты. При совместной обработке измерений этих четырёх станций было выявлено, что систематическая составляющая ошибки измерений всех станций практически отсутствует. Шумовая составляющая ошибки измерений исключается за счёт осреднения. Самую малую величину шумовой составляющей имеет НРТК «Фобос», а самую большую – станция ВИРК (Пущино и Грин-Бэнк).

В результате увеличения числа сеансов траекторных измерений в X -диапазоне точность определения траектории полёта КА «Спектр Р» возросла и стала соответствовать требованиям обеспечения научной программы.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЁТОМ КА

В процессе определения параметров движения КА должны быть решены две задачи: оперативного определения параметров движения, которая предназначена для управления полётом КА, и реконструкции орбиты, результаты которой используются для обработки данных космического интерферометра. Рассмотрим задачу оперативного определения параметров движения.

Для определения параметров движения использована модель движения КА в системе координат $J2000$

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\mu_E \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^3} + \mathbf{f}_g + \mathbf{f}_{ng}, \quad (1)$$

где \mathbf{r} – геоцентрический радиус-вектор; μ_E – гравитационный параметр Земли, \mathbf{f}_g – вектор возмущающих ускорений гравитационной природы, а \mathbf{f}_{ng} – вектор возмущающих ускорений негравитационной природы.

Гравитационные возмущения обусловлены действием Луны, Солнца и планет Солнечной системы, гармониками гравитационного поля Земли и её приливного потенциала. Для расчёта действия сторонних гравитирующих тел используются эфемериды *DE421*, а для определения возмущающих ускорений геопотенциала Земли – модель *EGM96*. Поправки к геопотенциалу из-за твердых приливов рассчитываются согласно модели [4].

Из негравитационных возмущений учитывается давление солнечного излучения. Применительно к случаям, когда возмущение от атмосферы присутствует, её плотность рассчитывается согласно стандарту ГОСТ Р 25645.166-2004 [5], а баллистический коэффициент аппарата – исходя из площади миделевого сечения.

Для оперативного определения параметров движения используется простая модель ускорения, возникающего в результате светового давления,

$$\mathbf{f}_{sp} = -\kappa \frac{\mu_S}{|\mathbf{R}_S - \mathbf{r}|^2} (\mathbf{R}_S - \mathbf{r}),$$

где μ_S – гравитационная постоянная Солнца, а \mathbf{R}_S – радиус-вектор Солнца.

Световое давление при этом никак не зависит от ориентации КА и характеризуется одним неизвестным коэффициентом κ , который входит в число уточняемых параметров.

Для определения параметров движения используется классический метод наименьших квадратов [7]. При одновременном уточнении кинематического вектора КА и коэффициента солнечного давления применяется метод Левенберга – Марквардта [8]. При одновременном уточнении кинематического вектора КА и параметров импульса коррекции применяется метод, изложенный в работе [9].

РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ОРБИТЫ КА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЕЁ ВЫПОЛНЕНИЯ

Прогноз эволюции орбиты по результатам определения параметров движения в конце 2012 г. показал, что при сохранении модели действующих на КА сил в январе 2013 г. солнечная тень составит 5,7 ч, а баллистическое существование закончится в конце 2013 – начале 2014 г.

Начиная с середины ноября в БЦ ИИМ с учётом уточнения начальных условий (НУ) по измерениям регулярно проводились расчёты параметров для предстоящей коррекции орбиты КА. В качестве целевой (после проведения коррекции) рассматривалась орбита, момент времени которой, когда высота КА над поверхностью Земли становилась менее 400 км, наступал в середине 2018 г., а заходы в тень от Земли и Луны на КА по длительности не превосходили двух часов больше, чем на 10 мин. При этом указанные условия должны выполняться с учётом ошибок НУ движения КА и коэффициента k солнечного давления, возможных погрешностей в ориентации и величине тяги ДУ при реализации каждого импульса коррекции.

Предварительные расчёты показали, что влияние ошибок ориентации тяги на дальнейшее движение аппарата пренебрежимо мало по сравнению с влиянием ошибок величины тяги, текущего ПУ и значения коэффициента солнечного давления. Все последующие расчёты параметров коррекции выполнялись с учётом полученной от ГОГУ величины предельной ошибки тяги ДУ, которая эквивалентна относительной ошибке в реализации приращения характеристической скорости $V_{хар}$, равной 9 % от этой скорости. При этом находилось такое решение задачи расчёта параметров, которое обеспечивает изложенные требования к траектории полёта КА после коррекции для установления трёх значений коэффициента солнечного давления: текущего, нулевого и удвоенного текущего.

При решении задачи коррекции корректирующими параметрами являются два момента времени включения ДУ и соответствующие им приращения характеристической скорости $V_{хар1}$ и $V_{хар2}$. Вектор направления тяги ДУ выбирается практически однозначно с учётом ограничений и направлен по вектору скорости КА в момент включения ДУ.

Задача коррекции, вообще говоря, является задачей математического программирования с минимизацией функционала $V_{хар\Sigma} = V_{хар1} + V_{хар2}$, значение которого пропорционально затратам рабочего тела, используемым на реализацию целевой коррекции.

Для выбора времени проведения коррекции и определения соответствующих параметров потребовалось решить примерно 700 вариантов оптимизационных задач. Дата проведения коррекции согласовывалась со специалистами АКЦ ФИАН и ИКИ, так как изменение орбитальных параметров КА «Спектр Р» влияло на программу проведения научных экспериментов. В связи с этим главной оперативной группой управления было принято решение о проведении коррекции с целью обеспечения:

- баллистического существования КА до середины 2018 г. (высота КА над поверхностью Земли не меньше 640 км);
- отсутствия до начала 2017 г. непрерывных интервалов тени длительностью более 2,2 ч на КА от Земли с неприемлемым коэффициентом затенения;
- сохранения (для проведения эффективных научных исследований) эволюции орбиты КА за счёт небольших изменений параметров орбиты КА.

Коррекция производилась по схеме, предложенной БЦ ИИМ: 21 февраля 2012 г. выполнялся прожиг двигателя и реализовывался первый импульс; 1 марта 2012 г. осуществлялся второй импульс. Были предусмотрены два резервных вари-

анта: в первом предусматривалось исполнение второго импульса 10 марта 2012 г., во втором – перенос прожига и первого импульса на 1 марта 2012 г. и выполнение второго импульса 10 марта 2012 г.

Во всех случаях баллистические параметры, необходимые для реализации второго импульса, рассчитываются с использованием параметров орбиты, полученных по ИТНП после первого импульса, с учётом возможной ошибки, по модулю не превосходящей 9% от абсолютной величины второго импульса. Все варианты обеспечивали условия проведения коррекции. Первый импульс составил около 1,77 м/с. Прожиг двигателя сообщает КА суммарный импульс около 0,01 м/с. Вторым импульс составил около 1,86 м/с. Время начала работы ДУ для реализации первого импульса 21.02.2012 – 21:00:00. Включение ДУ для реализации второго импульса происходило в районе апоцентра текущей орбиты.

Для оценки величин импульсов по ИТНП использовалась методика, изложенная в работе [8]. Оценка величины первого импульса составила 1,79 м/с, а второго – 1,96 м/с.

В результате проведения двух коррекций КА «Спектр Р» был переведён на орбиту, на которой до июня 2018 г. должна обеспечиваться выполнение следующих условий:

- минимальная высота КА над поверхностью Земли не менее 640 км;
- отсутствие непрерывных интервалов солнечной тени длительностью более 2,1 ч.

При этом длительность всего двух из указанных интервалов превосходит 2 ч: 28.11.2013 г. и 22.02.2014 г.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Космический аппарат «Спектр Р» обладает рядом особенностей, которые необходимо учитывать для достижения точности, необходимой при обработке данных космического интерферометра. В первую очередь к таким особенностям следует отнести работу системы ориентации и стабилизации, вызывающую возмущение движения центра масс. В указанной системе использованы маховичные электромеханические исполнительные органы (ЭМИО), управление которыми позволяет компенсировать внешние возмущающие моменты и менять ориентацию КА в пространстве. В ходе полёта скорость маховиков ЭМИО может достигать таких величин, что дальнейшее управление ориентацией КА становится неэффективным или невозможным, вследствие чего возникает необходимость разгрузки системы – значительного сокращения угловой скорости маховиков и уменьшения кинетического момента КА при помощи реактивных двигателей стабилизации (ДС). Расположение ДС относительно корпуса КА не позволяет осуществлять разгрузку маховиков без возмущения движения центра масс. Величина приращения скорости КА в результате разгрузки в среднем составляет 3 – 7 мм/с, а сами разгрузки проходят чаще одного раза в сутки. Поскольку плотность проведения внешнетраекторных измерений не позволяет постоянно определять орбиту КА в коротких интервалах между разгрузками маховиков, реконструкция движения должна производиться с использованием длинных мерных дуг, а возмущения от разгрузок учитываться должным образом в модели движения КА. Ориентация КА «Спектр Р» относительно Солнца изменяется во времени, поэтому для адекватного описания возмущений, вызванных световым давлением, возникает необходимость в модели, позволяющей учесть форму и свойства поверхности аппарата. Из-за наличия параболической антенны КРТ отношение площади миделевого сечения к массе КА может достигать 0,3 м²/кг, а возмущение в результате действия сил светового давления может отличаться всего на 1 – 2 порядка от возмущений гравитационной природы. Таким образом, наличие адекватной модели светового давления

является необходимым условием для качественного восстановления орбиты КА в пределах протяженных временных интервалов. Движение КА с такими особенностями не может быть достаточно хорошо описано стандартным набором орбитальных параметров, таких, как элементы орбиты или вектор состояния, заданным на определенный момент времени. Этот набор должен дополняться параметрами светового давления и параметрами, характеризующими разгрузки ЭМИО. При этом передаваемая на Землю телеметрическая информация, содержащая сведения о работе бортовых систем, может быть использована для оценки неизвестных параметров движения наряду с основным источником данных – ИТП.

Штатный полёт КА «Спектр Р» можно считать пассивным за исключением моментов проведения разгрузок ЭМИО, сопровождающихся включением двигателей стабилизации. Разгрузки происходят несколько раз за сутки и представляют собой попеременное включение двигателей стабилизации с целью погасить суммарный кинетический момент аппарата вместе с маховиками. Процесс длится 1 – 2 минуты, за которые происходит несколько десятков включений двигателей. Поскольку орбитальный период аппарата во много раз превышает длительность разгрузки, считается, что КА получает приращение скорости в результате разгрузки маховиков мгновенно в средневзвешенный момент времени. Пусть во время i -й разгрузки маховиков произошло N включений двигателей в моменты времени $t_{i,j}$, $j = 1, \dots, N$, а каждое из включений дало приращение скорости $\Delta v_{i,j}$, $j = 1, \dots, N$. Тогда средневзвешенный момент включения и суммарное приращение скорости

$$t_i = \frac{\sum_{j=1}^N \Delta v_{i,j} t_{i,j}}{\sum_{j=1}^N \Delta v_{i,j}}; \quad \Delta v_i = \sum_{j=1}^N \Delta v_{i,j}. \quad (2)$$

Такую трактовку приращения скорости КА в результате разгрузки ЭМИО будем называть импульсной, а само приращение скорости – импульсом разгрузки. Оценку импульса разгрузки можно получить исходя из телеметрических данных. В составе телеметрической информации передаются параметры ориентации КА, длительность включения двигателя и масса израсходованного топлива. Используя известное значение удельной тяги двигателей стабилизации, оценим величину приращения скорости КА. Для оценки импульса разгрузки с индексом i , полученного таким образом, введём обозначение Δv_i^0 .

Рассмотрим движение во временном интервале (t_i, t_{i+1}) . Между соседними разгрузками движение будем считать пассивным, соответствующим уравнению (1). Для реконструкции орбиты требуется более точная модель учёта светового давления по сравнению с моделью, используемой при оперативном определении параметров движения. Сила давления солнечного излучения на освещённый элемент корпуса КА может быть представлена в виде линейной комбинации сил [9]

$$\mathbf{F}_{el} = (1 - \alpha) \mathbf{F}_b + \alpha \mu \mathbf{F}_s + \alpha (1 - \mu) \mathbf{F}_d, \quad (3)$$

где α – коэффициент отражения; μ – зеркальность поверхности; \mathbf{F}_b , \mathbf{F}_s и \mathbf{F}_d – силы светового давления в предположении о том, что поверхность полностью поглощает свет, зеркально отражает свет и диффузно отражает свет, соответственно.

Под диффузным отражением подразумевается отражение по закону косинусов Ламберта. Очевидно, что значения коэффициентов α и μ , которые соответствуют материалам, лежат в интервале от нуля до единицы. Значения базовых сил, по которым раскладывается сила светового давления, зависят только от геометрии элемента поверхности и направления светового потока. Таким образом, знание коэффициентов α и μ каждого освещённого элемента поверхности позволяет в

рамках рассматриваемого подхода рассчитать совокупную силу светового давления, действующую на аппарат. Применительно к КА «Спектр Р» для расчёта сил использовалась упрощённая модель поверхности, включающая в себя антенну КРТ, базовый модуль «Навигатор» и панели солнечных батарей. Поверхности антенны КРТ и центрального модуля соответствовали коэффициенты светового давления α_1 и μ_1 , а поверхности панелей солнечных батарей – α_2 и μ_2 . Введение единых коэффициентов, отвечающих центральному блоку и КРТ, связано с тем, что освещаемые части этих элементов покрыты одинаковой многослойной тепловой изоляцией. Отметим, что введение двух коэффициентов применительно к панелям солнечных батарей избыточно ввиду того, что панели все время ориентированы практически ортогонально направлению на Солнце, поэтому все три их базовые силы будут направлены практически в одну сторону – по нормали к плоскости панелей и коэффициенты α_2 и μ_2 не будут независимыми. Во избежание неоднозначности зафиксируем значение $\mu_2 = 0$, что соответствует отсутствию зеркального отражения от панелей батарей. Таким образом, возмущение от светового давления на поверхность КА «Спектр Р» зависит от трёх параметров: α_1 , μ_1 и α_2 .

При моделировании динамики КА используются данные об ориентации КА, передаваемые в составе телеметрической информации. От ориентации зависят силы светового давления и направление импульсов разгрузок, поскольку двигатели стабилизации фиксированы относительно корпуса КА. Данные, полученные со звёздных датчиков, обрабатываются на борту КА и записываются в телеметрический поток. Расчёт ориентации в произвольный момент времени производится с учётом равномерного по времени поворота между двумя известными положениями. Согласно уравнению (2) оценка импульса разгрузки Δv_i^0 может быть получена исходя из оценок приращений скорости $\Delta v_{i,j}$, обусловленных отдельными включениями ДС, которые, в свою очередь, зависят от телеметрических данных следующим образом:

$$\Delta v_{i,j} = \frac{1}{M} \Delta m_{i,j} v_{эфф}(\tau_{i,j}) \mathbf{e}_{i,j}, \quad (4)$$

где M – текущая масса КА; $\Delta m_{i,j}$ – расход топлива во время включения; $v_{эфф}(\tau_{i,j})$ – эффективная скорость истечения как известная функция длительности включения $\tau_{i,j}$; $\mathbf{e}_{i,j}$ – известное направления тяги двигателя. Полученную таким образом оценку Δv_i^0 будем называть измеренным значением импульса разгрузки. Измеренное значение содержит погрешности по величине и направлению. Погрешность по величине определяется погрешностями измерений значений $\Delta m_{i,j}$ и $\tau_{i,j}$. Погрешности по направлению $\mathbf{e}_{i,j}$ обусловлены ошибками определения ориентации во время разгрузки и ошибками определения направления тяги в системе координат, связанной с КА. Априорная оценка ошибки определения $\mathbf{e}_{i,j}$ составляет 1 grad , т.е. ортогональная составляющая ошибки определения приращения скорости мала по сравнению с ошибкой по величине приращения. Погрешность измеренной величины $\Delta v_{i,j}$ можно считать нормально распределённым вектором с ковариационной матрицей

$$\mathbf{K}_{i,j} = \sigma_d^2 (\mathbf{E} - \mathbf{e}_{i,j} \mathbf{e}_{i,j}^T) + \sigma_v^2 \mathbf{e}_{i,j} \mathbf{e}_{i,j}^T, \quad (5)$$

где σ_v – ошибка измерения величины приращения, σ_d – ошибка в ортогональном направлении. При расчётах ортогональная ошибка задавалась в соответствии с

угловой ошибкой в один градус, ошибка в величине рассчитывалась исходя из того, что ошибки ДС составляют 10%.

Полезными с точки зрения информации о параметрах движения КА являются данные о работе ЭМИО, включающие в себя скорости вращения двигателей-маховиков. В общем случае знание параметров вращения КА как целого вокруг центра масс и знание того, как движутся его элементы, а именно маховики, позволяет оценить действующий на аппарат момент внешних сил. Космический аппарат «Спектр Р» около 90% времени находится на расстоянии от Земли, превышающем 100 тыс. км, где средний момент, создаваемый световым давлением, минимум на два порядка больше максимально возможного гравитационного момента. Помимо этого большая часть времени ориентация КА неизменна, т.е. изменение суммарного кинетического момента аппарата происходит только за счёт маховиков. Рассмотрим временной интервал (t_1, t_2) продолжительностью несколько часов, в течение которого аппарат удалён от Земли и ориентация его относительно звёзд неизменна. За это время ориентация Солнца относительно аппарата, а также расстояние до Солнца изменятся незначительно, и поэтому справедливо выражение

$$\sum_{j=1}^M \mathbf{a}_j I_j (\Omega_j(t_2) - \Omega_j(t_1)) = \mathbf{M}_{sp}(\alpha_1, \mu_1, \alpha_2, \mathbf{r}, \mathbf{A})(t_2 - t_1), \quad (6)$$

где суммирование в левой части ведётся относительно маховиков аппарата; \mathbf{a}_j – единичный вектор, направленный по оси вращения маховика; I_j – момент инерции маховика вокруг его оси вращения; $\Omega_j(t)$ – скорость вращения маховика, измеряемая бортовой системой; \mathbf{M}_{sp} – момент сил светового давления; \mathbf{r} – радиус-вектор КА; \mathbf{A} – кватернион ориентации КА. Зависимость момента сил от коэффициентов светового давления по структуре совпадает с выражением для определения силы светового давления (3). Значение левой части (6) зависит от измеряемых величин $\Omega_j(t)$, правой части – от неизвестных коэффициентов светового давления. Рассмотрим связь между измеренным и расчётным моментом сил светового давления

$$\xi = \frac{\sum_{j=1}^M \mathbf{a}_j I_j (\Omega_j(t_2) - \Omega_j(t_1))}{t_2 - t_1} - \mathbf{M}_{sp}(\alpha_1, \mu_1, \alpha_2, \mathbf{r}, \mathbf{A}), \quad (7)$$

которую можно использовать при уточнении параметров движения.

Проанализируем движение аппарата во временном интервале $[t_u, t_k]$. Предположим, что в течение этого интервала произошло n разгрузок маховиков. Из телеметрических данных известны времена и номинальные значения импульсов разгрузок

$$(t_1, \Delta \mathbf{v}_1^0), (t_2, \Delta \mathbf{v}_2^0), \dots, (t_n, \Delta \mathbf{v}_n^0), \quad t_i \in [t_u, t_k], i = 1, \dots, n. \quad (8)$$

Световое давление описывается набором 3 параметров: α_1 , μ_1 и α_2 . Пусть в заданном интервале времени были проведены траекторные измерения Ψ , в общем случае включающие в себя измерения дальности, радиальной скорости и угловых положения КА. Предположим, что на протяжении рассматриваемого временного интервала аппарат N раз находился в неизменной ориентации. Для каждого из таких событий определяются временные рамки $(t_{1,j}, t_{2,j})$ и величины рассогласований, полученные из (7). Задаётся следующий расширенный вектор параметров, определяющих движение КА,

$$\mathbf{Q} = \{\mathbf{X}_0(t_0), \alpha_1, \mu_1, \alpha_2, \Delta \mathbf{v}_1, \dots, \Delta \mathbf{v}_n\},$$

где $\mathbf{X}_0(t_0)$ – вектор состояния аппарата в момент $t_0 \in [t_n, t_k]$, в качестве вектора состояния используются координаты и скорость аппарата в инерциальном пространстве. Используя введённые обозначения, определяется функционал

$$\Phi = (\Psi_0 - \Psi_c)^T \mathbf{P} (\Psi_0 - \Psi_c) + \sum_{j=1}^M \xi_j^T \mathbf{P}_j^{sp} \xi_j + \sum_{i=1}^n (\Delta \mathbf{v}_i^0 - \Delta \mathbf{v}_i)^T \mathbf{P}_i (\Delta \mathbf{v}_i^0 - \Delta \mathbf{v}_i), \quad (9)$$

где Ψ_0 – полученные (измеренные) значения траекторных измерений; Ψ_c – расчётные значения траекторных измерений, зависящие от движения аппарата $\Psi_c = \Psi_c(\mathbf{Q})$; \mathbf{P} – весовая матрица траекторных измерений; \mathbf{P}_j^{sp} – весовая матрица моментов светового давления; \mathbf{P}_i – весовая матрица измерений импульсов, полученная из суммы ковариационных матриц отдельных включений (5) разгрузок. Выражение (9) отличается от функционала, используемого в классическом варианте определения орбиты по траекторным измерениям методом максимального правдоподобия [9], наличием двух дополнительных слагаемых, каждое из которых содержит рассогласования между функциями от измеренных величин, предоставляемых телеметрической системой, и расчётных значений, зависящих от элементов \mathbf{Q} . Предположим, что ошибки рассогласований как траекторных измерений, так и измерений импульсов разгрузок и моментов светового давления распределены нормально с нулевым математическим ожиданием. Будем искать такие параметры движения \mathbf{Q}^* , которые доставляют максимум функции правдоподобия $L(\Psi | \mathbf{Q}) = P(\mathbf{Q} | \Psi)$, что для нормального распределения эквивалентно

$$\mathbf{Q}^* = \operatorname{argmin} \Phi(\mathbf{Q}). \quad (10)$$

Оценка вектора \mathbf{Q}^* производится итерационным методом обобщённых касательных Ньютона, аналогичным методу получения оценки только по траекторным измерениям. В качестве начального приближения используется оценка, полученная при уточнении вектора состояния кинематических параметров КА: $\mathbf{Q} = \mathbf{X}_0(t_0)$.

За величину, характеризующую согласование измерений, примем безразмерное среднеквадратичное отклонение $\sigma = \sqrt{\Phi / N_m}$, где N_m – число измерений. Оценки показывают, что использование сложной модели светового давления с учётом возмущений, вызванных разгрузками маховиков, позволяет на порядок улучшить согласование измерений по сравнению с классической пассивной моделью движения. Дополнительное уточнение импульсов разгрузок даёт возможность улучшить этот показатель примерно в 30 раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы по баллистико-навигационному обеспечению полёта КА «Спектр Р», возложенные на БЦ ИПМ, выполняются в срок и в полном объёме без замечаний.

11 июня 2013 г. на заседании Президиума РАН был представлен доклад академика Н.С. Карданова о результатах работ, проводимых Астрокосмическим центром ФИАН по программам проекта «Радиоастрон», в частности о наиболее интересных открытиях, а также технических достижениях, полученных в ходе эксплуатации КА. В докладе были особо отмечены работы по баллистико-навигационному обеспечению полёта КА «Спектр Р». Подводя итоги обсуждения, президент РАН В.Е. Фортов отметил, что «космос – источник уникальных фундаментальных результатов: существующие там условия смоделировать на Земле невозможно, а «Радиоастрон» – один из немногих успешных проектов последних лет, придуманных и реализованных в России».

Опыт, полученный в ходе работ по баллистико-навигационному обеспечению полёта КА «Спектр Р», будет использован в планируемых полётах КА «Спектр РГ», «Луна – Глоб», «Спектр – Миллиметрон» и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдеев В. Ю., Алакоз А. В., Александров Ю. А. и др. Космическая миссия «Радиоастрон». Первые результаты. – Вестник ФГУП ИПО им. С.А. Лавочкина, 2012, № 3, с. 4 – 21.
2. Наземный комплекс управления дальними космическими аппаратами. Перспективы развития. Под ред. Урличича Ю.М. М.: Радиотехника, 2012, 216 с.
3. Тучил А. Г., Комовкин С. В., Лаврсов С. М. и др. Небесно-механическая интерпретация радиотехнических измерений наклонной дальности и радиальной скорости. Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. М., 2013, № 66, 30 с.
4. Baner R., Schutz W., Tarpley B. Earth and Ocean Tide Effects on Lageos and Starlett. The Proc. of the Ninth International Symposium on Earth Tides, 1983, pp. 239 – 250.
5. ГОСТ Р 25645.166-2004. Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для баллистического обеспечения полетов искусственных спутников Земли.
6. Аким Ю. Л., Энсев Т. М. Определение параметров движения космического летательного аппарата по данным траекторных измерений. – Космические исследования, 1963, вып. 1, т. 1.
7. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985, 510 с.
8. Боровин Г. К., Захваткин М. В., Степаньянц В. А. и др. Определение параметров орбиты и маневра космического аппарата при заданном времени приложения импульса. – Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Математическое моделирование, 2012, № 4, с. 6.
9. Комаров М. М., Сазонов В. В., Климович Д. Н. Расчет сил и моментов светового давления, действующих на роторный солнечный парус. Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 1995, № 59.