

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИЕМНИКА СПУТНИКОВОЙ РАДИОНАВИГАЦИИ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МИКРОУСКОРЕНИЙ ВО ВРЕМЯ ПОЛЕТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА "ФОТОП-М2"

При проведении эксперимента "НАВИГАТОР" в мае-июне 2005 г. на космическом аппарате (КА) "ФотоП-М2" [1] были получены значительные массивы данных (более 210000 векторов навигационных решений), которые обеспечили высокоточную координатно-временную привязку экспериментов, проводимых в условиях микрогравитации. В состав научной аппаратуры "Мираж-М" Самарского государственного аэрокосмического университета (СГАУ) входил навигационный приемник (ПП) производства Ижевского радиозавода, который был адаптирован к условиям эксплуатации в космическом пространстве.

Предлагается вариант использования навигационных решений, формируемых в ПП, для определения влияния внешних возмущающих воздействий на параметры движения КА. В качестве объекта исследования рассматривается плотность атмосферы, которая вызывает основные возмущения в движении низковысотного КА.

Под низкочастотной составляющей микроускорений в дальнейшем понимаются микроускорения, обусловленные тормозящим влиянием атмосферы, имеющие период, кратный периоду обращения КА по орбите. Точность навигационных измерений, достигнутая в эксперименте "НАВИГАТОР", позволяет выявить влияние аэродинамических микроускорений на параметры движения центра масс КА на относительно коротких интервалах времени.

Для повышения точности решения поставленной задачи была проведена предварительная двухэтапная отбраковка аномальных измерений, поступающих с ПП, для чего использовалась методика, изложенная в [2]. На первом этапе отбраковка производилась по величине рассчитанной полной энергии КА, которая сравнивалась с ее номинальным значением. Второй этап отбраковки заключался в анализе величин значений отклонений полученных навигационных решений от "эталонной" орбиты, построенной по алгоритму сглаживания, описанному в [3].

Считается, что плотность атмосферы ρ является функцией высоты полета и индекса солнечной активности $F_{10.7}$. Находится оценка \bar{S} баллистического коэффициента

S , которая интерпретируется, как согласующий баллистический коэффициент между переменной величиной плотности $\rho(H, F_{10,7})$ и ее номинальным значением $\rho_M(H)$, вычисленным с использованием модели [4], который отражает влияние солнечной активности на состояние атмосферы Земли. Таким образом, вычисляя оценку баллистического коэффициента \bar{S} при заданной модели плотности атмосферы $\rho_M(H)$, фактически отыскиваем оценку произведения $S \cdot \rho$, так как принимается, что $S \cdot \rho = \bar{S} \rho_M(H)$.

Интервал сглаживания T навигационных измерений для вычисления оценки \bar{S} выбирается с учетом точности определения параметров движения, обеспечиваемой НП. В эксперименте "НАВИГАТОР" использовался одночастотный НП, который согласно летным испытаниям [1] обеспечивал определение положения с погрешностью до 70 м. При допущении, что погрешность измерения не должна превышать 5% от номинального значения, выбран интервал движения протяженностью четыре витка (шесть часов полета) для определения оценки \bar{S} [5].

Низкочастотная составляющая микроускорений $|\bar{a}|$ будет находиться по соотношению

$$|\bar{a}| = \bar{S} \cdot \rho_M(H) \cdot V^2, \quad (1)$$

где $\rho_M(H)$ – модельная плотность атмосферы, H и V – соответственно высота и модуль скорости полета, определяемые в результате сглаживания данных от НП на интервале четырех витков.

Учитывая результаты, приведенные в [6], можно считать, что динамика движения КА "Фотон-М2" не оказывает заметного влияния на вычисление $|\bar{a}|$ и поэтому в дальнейшем не учитывается.

Таким образом, при вычислении низкочастотной составляющей микроускорений центральной проблемой является решение задачи сглаживания навигационных измерений с одновременным подбором согласующего баллистического коэффициента на интервале четырех витков полета: требуется отыскать согласующий баллистический коэффициент \bar{S} и вектор навигационной оценки $\bar{q}(t_N)$ на момент окончания интервала сглаживания t_N , которые обеспечивают минимум функционалу [3]

$$I(\bar{q}(t_N), \bar{S}) = \sum_{j=1}^N \left\{ [L_p(t_j, \bar{q}(t_N), \bar{S}) - q(t_j)]^T D_j^{-1} [L_p(t_j, \bar{q}(t_N), \bar{S}) - q(t_j)] \right\},$$

где $L_p(t_j, \bar{q}(t_N), \bar{S})$ – оператор прогнозирования движения КА, который пересчитывает вектор $\bar{q}(t_N)$ на моменты времени t_j получения навигационных решений от НП; $p = 4, 8, 16$ – порядок используемых гармоник в модели гравитационного поля Земли; $D_j = K_p(t_j)$ – матрица весовых коэффициентов, которая обычно принимается равной априорной ковариационной матрице погрешностей навигационных решений в момент t_j . Возможны различные варианты реализации алгоритма совместного вычисления оценок $\bar{q}(t_N)$ и \bar{S} . В соответствии с одним из них, широко используемом в практике навигационного обеспечения, вектор $\bar{q}(t_N)$ и параметр \bar{S} определяются совместно в виде расширенного семимерного вектора $(\bar{q}(t_N), \bar{S})$. Однако в этом случае результат будет зависеть от соотношения между априорными дисперсиями компонент вектора $\bar{q}(t_N)$ и априорной дисперсией \bar{S} .

Предлагается использовать двухэтапный алгоритм, который лишен вышеупомянутого недостатка. Поиск минимума функционала (2) разделяется на два согласованных процесса минимизации с поочередным поиском параметров $\bar{q}(t_N)$ и \bar{S} : осуществляется однопараметрическая минимизация функционала (2) по баллистическому коэффициенту \bar{S} , на каждом шаге которой отыскивается навигационная оценка $\bar{q}_N = \bar{q}(t_N)$, обеспечивающая минимум (2) при фиксированном значении \bar{S} . Оценить выигрыш по точности данного алгоритма можно при помощи соотношений приведенных в [3], которые определяют погрешности МНК, связанные с невыполнением принятых допущений.

Эксперимент "НАВИГАТОР" проводился в течение пяти дней с 31 мая по 5 июня. В этот период времени НП осуществлял непрерывные навигационные измерения в течение 6 часов, после которых он на 6 часов выключался. Всего было проведено десять шестичасовых сеансов навигационных измерений (СНИ) работы приемника. Гринвичское время (ГВ) и даты СНИ приведены в таблице 1.

На промежутках работы НП формировал навигационные определения с шагом в одну секунду, которые записывались на электронный носитель. Для каждого СНИ в соответствии с упомянутым двухэтапным алгоритмом находилась оценка баллистического коэффициента, которая называлась уточненной оценкой. На шестичасовых интервалах отсутствия навигационных решений (между СНИ) оценка баллистического коэффициента отыскивалась из условия согласования навигационных векторов на моменты

времени окончания предыдущего СНИ и начало последующего СНИ (в дальнейшем называется согласованной оценкой).

Найденные значения обоих видов оценок баллистического коэффициента \bar{S} также приведены в таблице 1. Полученные результаты отражают динамику изменения плотности атмосферы во времени, обусловленную изменением индекса солнечной активности.

Для промежутка времени с 1 до 7 часов ГВ 3 июня на рисунке 1 приведены изменения модуля микроускорений $|\bar{a}|$ на протяжении четырех витков, соответствующие трем различным значениям согласующего баллистического коэффициента $S = 1,43 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ (уточненная оценка, найденная на текущем интервале) $S = 1,08 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ (согласованная оценка, найденная на предыдущем интервале) $S = 0,56 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ (оценка, найденная в наземном комплексе управления на предыдущем суточном интервале). Приведенные графики показывают колебания величины модуля микроускорений, соответствующие трем вариантам построения и использования моделей вычисления плотности атмосферы. Каждый из них показывает изменение модуля микроускорений в процессе полета. Использование данных наземного комплекса управления для рассмотренного временного интервала дает более чем трехкратное занижение значений микроускорений по сравнению с использованием уточненных оценок баллистического коэффициента. При наличии перерывов в СНИ использование согласованных оценок дает примерно 30%-ое занижение результатов. Для остальных СНИ результаты аналогичны по отличию между рассчитанными значениями микроускорений, однако может наблюдаться как занижение, так и завышение оценок.

Модуль микроускорений на витке меняется от минимальной величины в апоорбиты до максимальной величины в перигее. В последнем столбце таблицы 1 показаны отличия максимального (в перигее) отклонения модуля микроускорений, рассчитанного с уточненным значением баллистического коэффициента на текущем СНИ, относительно модуля микроускорений, найденного с использованием согласованной оценки баллистического коэффициента на предыдущем шестичасовом интервале отсутствия навигационных измерений. В большинстве случаев отличия не превышают 15%.

Таким образом, анализ движения КА "Фотон-М2" по измерениям НП дает возможность оценить уровень ускорений за счет аэродинамического торможения, по

тверждающий проектные характеристики КА "Фотон-М2", и оценить низкочастотную, кратную движению по орбите составляющую микроускорений.

Приведенные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности включения ИП в состав обеспечивающей аппаратуры не только для координатно-временной привязки результатов научных экспериментов, проводимых на микрогравитационной платформе "Фотон-М", но и для контроля микроускорений, возникающих во время полета.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 060-08-00244а).

Библиографический список

1. Белоконов И.В., Болтов Е.А., Крамлих А.В., Собола С.А. Эксперимент «Навигатор» на борту космического аппарата "Фотон-М2": цели задачи предварительные результаты. Сб. тр. XII Всерос. научн.-техн. семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов / Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Самара, 2007.– С. 32-40.
2. Белоконов И.В., Белоконов В.М., Боровков В.А., Собола С.А. Методика отбраковки данных, поступающих с навигационного приемника, установленного на борту низковысотного космического аппарата. Сб. тр. XII Всерос. научн.-техн. семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов / Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Самара, 2007.– С. 27-31.
3. Эльясберг П.Е. Определение движения по результатам измерений. -М.: Наука, 1976.
4. ГОСТ 4401-81 Атмосфера стандартная. Параметры.
5. Эльясберг П.Е. Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. М., «Наука», 1965.
6. Абрашкин В.И., Боговяленский Н.Л., Воронов К.Е., Казакова А.Е., Панкратов В.А., Сазонов В.В., Семкин Н.Д., Стратилатов Н.Р. Определение вращательного движения спутника "Фотон М2" по данным измерений его угловой скорости и напряженности магнитного поля Земли с использованием кинематической модели движения. Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, №26. – Москва, 2006.

Таблица 1. Оценки значений баллистических коэффициентов КА "Фотон-М2"

Но- мер СНИ	Дата СНИ	Гринвич- ское время СНИ, часы	Значения S , 10-3 м2/кг	Вариант вычисления баллистического ко- эффициента	Вариации максимального отклонения модуля аэро- динамического ускорения на витке, 10-6 г
1	31 мая	12-18	1,53	уточненный	
	31 мая	18-24	1,25	согласованный	
2	1 июня	0-6	1,40	уточненный	0,5
	1 июня	6-12	0,82	согласованный	
3	1 июня	12-18	0,96	уточненный	0,4
	1 июня	18-1	1,40	согласованный	
4	2 июня	1-6	1,47	уточненный	0,2
	2 июня	6-12	1,30	согласованный	
5	2 июня	12-18	1,08	уточненный	0,7
	2 июня	18-0	1,10	согласованный	
6	3 июня	1-7	1,43	уточненный	1
	3 июня	7-13	0,88	согласованный	
7	3 июня	13-19	1,35	уточненный	1,4
	3,4 июня	19-1	1,45	согласованный	
8	4 июня	1-7	1,2	уточненный	0,7
	4 июня	7-13	1,15	согласованный	
9	4 июня	13-19	1,59	уточненный	1,3
	4, 5 июня	19-1	1,43	согласованный	
10	5 июня	1-7	1,82	уточненный	1,2

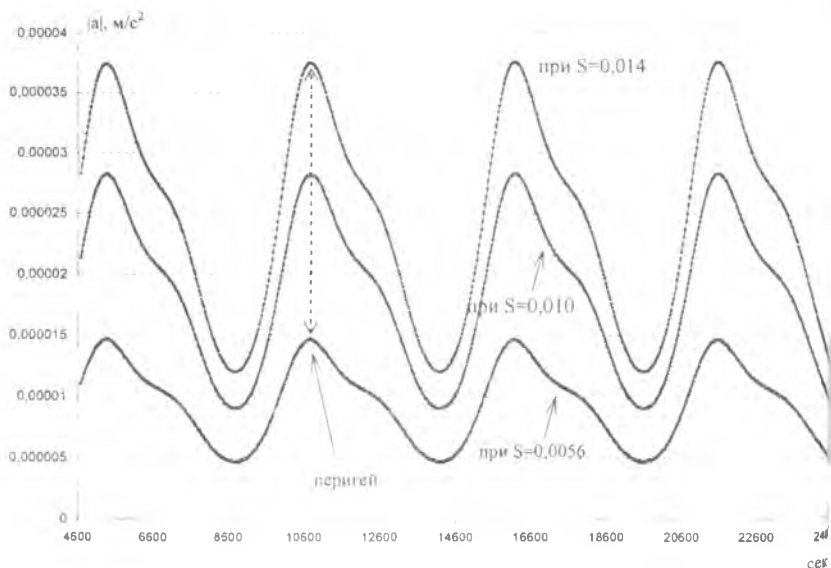


Рис. 1. Изменения значения модуля ускорения $|a|$ на четырех витках 3 июня с 1 по часам ГВ в зависимости от используемой оценки баллистического коэффициента