

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАКТИЧЕСКОГО ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ И УРОВНЯ ОСТАТОЧНЫХ МИКРОУСКОРЕНИЙ НА КА «ФОТОН» ПО ДАННЫМ БОРТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2010 г. В.И. Абрашкин¹, А.С. Зайцев¹, В.В. Сазонов²

¹ ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС», г. Самара

² Институт прикладной математики РАН, г. Москва

Приводятся результаты определения фактического вращательного движения и уровня остаточных микроускорений, полученные на борту космических аппаратов (КА) технологического назначения «Фотон» № 11 и «Фотон» № 12.

Угловая скорость, микроускорение, вектор напряжённости магнитного поля Земли, метод наименьших квадратов, низкочастотная фильтрация данных измерений, дискретные ряды Фурье, регулярная прецессия Эйлера осесимметричного твёрдого тела

Введение

Автоматический космический аппарат "Фотон" предназначен для проведения исследований и экспериментов по космической технологии, биотехнологии, биологических исследований на биообъектах, отработки элементов технологических процессов и установок, проверки правильности теоретических предположений, заложенных в программу получения материалов.

Схема полёта космического аппарата "Фотон" в общем случае выглядит следующим образом. После отделения от ракеты-носителя «Союз» КА "Фотон" ориентируется в орбитальной системе координат с гашением угловых скоростей до $0,03^\circ/\text{с}$ в течение 20-90 минут, после чего система управления движением выключается. В дальнейшем КА совершает неориентированный полёт. Не ранее, чем за сутки до спуска спускаемого аппарата (СА) производится включение системы управления движением (СУД). После отработки тормозного импульса и выключения тормозной двигательной установки (ПТДУ) производится разделение СА и приборного отсека, после чего СА осуществляет автономный спуск по баллистической траектории до

момента ввода его парашютной системы. На завершающем этапе осуществляется посадка в заданный район местности.

Основные характеристики КА «Фотон» № 11 и КА «Фотон» № 12 приведены в табл. 1.

1 Работа измерительных устройств в составе КА «Фотон»

На КА "Фотон" № 11 и КА "Фотон" № 12 устанавливались средства измерения микроускорений российского и зарубежного производства.

Измерения на борту КА "Фотон" № 11 проводились системой измерения микроускорений «СИНУС-6К» отечественной разработки (ЦНИИ «Электроприбор»), микроакселерометром ВЕТА фирмы SYMINEX (Франция) и аппаратурой QSAM (Quasi-Steady Acceleration Measurement) фирмы Kayser-Trede (Германия).

В состав системы «СИНУС-6К» входили два трёхосных компенсационных акселерометра и многоканальное цифровое вычислительное устройство. Система «СИНУС-6К» на КА «Фотон» № 11 устанавливалась впервые (проводились её испытания). Поэтому система работала в режиме «макро», имеющим

ограничения по разрешающей способности.

Микроакселерометр БЕТА предназначался для замера уровня микроускорений в месте установки прибора CROCODILE 2 и имел скорость выборки 7,8125 измерений в секунду.

В состав немецкой системы QSAM, позволявшей измерять вектор угловой скорости и микроускорения в нескольких точках борта, входили: один трёхкомпонентный измеритель угловой скорости и микроакселерометры. Скорость выборки составляла: в режиме измерения угловой скорости один замер в 50 с, в режиме измерения микроускорений – один замер в 150 с.

На КА "Фотон" № 12 были продолжены исследования, начатые на КА "Фотон" № 11. В состав измерительной аппаратуры входили системы «СИНУС-12КУ» и QSAM, микроакселерометры аппаратуры FluidPac, разработанной промышленным консорциумом VERHAERT (Бельгия), CIR (Швейцария), Kayser Italia (Италия) и Carlo Gavazzi Spase (Италия). Кроме того, проводились замеры электромагнитных излучений (ЭМИ) внутриобъектовой среды космического аппарата системой МИРАЖ.

Аппаратура МИРАЖ, предназначавшаяся для измерений магнитного поля во время проведения космических экспериментов, устанавливалась внутри спускаемого аппарата (СА) и имела пять трёхкомпонентных магнитометров. Измерения проводились практически весь полёт. Оцифровка показаний всех пяти магнетометров выполнялась с шагом 5 с. На некоторых витках имелись непродолжительные отрезки времени – не более 10 мин., на которых шаг дискретизации уменьшался до 1 с.

Исходя из полученной информации работа отмеченных систем характеризуется как положительная, за исключением системы «СИНУС», с которой так и не удалось получить информацию приемлемого качества.

К особенностям работы относятся

вынужденные коррективы в измерения микроускорений, связанные с нарушением штатной автоматической программы выполнения экспериментов (FluidPac) и погрешности в работе отдельных микроакселерометров (QSAM) и магнитометров (МИРАЖ).

2 Методика обработки данных измерений

В общем случае микроускорение на борту КА можно разбить на две составляющие – высокочастотную и низкочастотную. В настоящей статье рассматривается только низкочастотная составляющая микроускорения.

Остаточная (низкочастотная) составляющая микроускорения обусловлена движением космического аппарата относительно центра масс как твёрдого тела, градиентом гравитационного поля Земли и сопротивлением атмосферы. Эта составляющая может быть весьма точно рассчитана по информации о фактическом движении космического аппарата относительно центра масс, которую может предоставить, например, трёхкомпонентный датчик угловой скорости или магнитометр. В этом случае, проведя обработку данных измерений на достаточно большом числе интервалов и выявив общие закономерности вращательного движения космического аппарата, можно в ряде случаев весьма надёжно оценить уровень низкочастотной составляющей в течение всего полёта.

Для КА «Фотон» обработка данных измерений выполняется с помощью математических моделей, в рамках которых КА «Фотон» считается абсолютно твёрдым телом, на движение которого главным образом влияет гравитационное поле Земли. Из сил негравитационной природы учитывается только сопротивление атмосферы. Указанные упрощения позволяют записать формулу для определения микроускорения в заданной точке борта космического аппарата в виде:

$$\mathbf{n} = \frac{m_E}{|\mathbf{R}|^3} \left[\frac{3(\mathbf{R} \cdot \boldsymbol{\rho})\mathbf{R}}{|\mathbf{R}|^2} - \boldsymbol{\rho} \right] + \boldsymbol{\rho} \times \boldsymbol{\omega} + (\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\rho}) \times \boldsymbol{\omega} + \frac{S}{m} \rho_a |\mathbf{v}| \mathbf{v}.$$

постоянные смещения в данных измерений.

3 Результаты исследования

Здесь $\boldsymbol{\rho}$ - радиус-вектор заданной точки космического аппарата, в которой рассчитывается микроускорение, относительно его центра масс; m_E - гравитационный параметр Земли; v - скорость центра масс космического аппарата относительно земной поверхности; ρ_a - плотность набегающего на космический аппарат аэродинамического потока; S - площадь геометрической фигуры, являющейся проекцией внешней оболочки космического аппарата на плоскость, перпендикулярную v . При выводе последнего члена этой формулы предполагалось, что молекулы воздуха при столкновении со спутником испытывают абсолютно неупругий удар и что атмосфера неподвижна относительно поверхности Земли.

Обработка проводилась следующим образом. Из данных измерений каждой компоненты вектора угловой скорости или микроускорения выделялась низкочастотная (с частотами менее 0.01 Гц) составляющая (помимо этого для КА «Фотон» № 12 обработка данных измерений включала обработку данных измерений вектора напряжённости магнитного поля Земли). Затем выбирались интервалы времени, целесообразные для исследования и имеющие длину от одного до несколько часов. При необходимости проводилось предварительное сжатие полученных данных. На каждом таком отрезке строилась аппроксимация полученной векторной функции аналогичной функцией, рассчитываемой вдоль решений дифференциальных уравнений движения спутника относительно центра масс. Построение выполнялось методом наименьших квадратов, параметрами согласования служили начальные условия движения КА «Фотон», его аэродинамические параметры и

Как оказалось, большую часть полёта вращательное движение КА «Фотон» № 11 было близко к регулярной прецессии Эйлера осесимметричного твёрдого тела. Угловая скорость космического аппарата относительно его продольной оси составляла примерно 1 град./с, проекция угловой скорости на плоскость, перпендикулярную этой оси, имела модуль около 0.2 град./с. Низкочастотная составляющая в данных измерений угловой скорости после удаления из них постоянного смещения согласуется с расчётной угловой скоростью со среднеквадратичной ошибкой 0.04 град./с по каждой компоненте. Модуль квазистатической компоненты микроускорения в местах расположения акселерометров QSAM и BETA для указанного движения КА «Фотон» не превышал $5 \cdot 10^{-5} - 10^{-4} \text{ м/с}^2$ [1], [2], [5].

Подобные результаты были получены и после обработки данных измерений на КА «Фотон» № 12 [3], [4].

Графики, представленные на рис. 1, подтверждают сделанное предположение и естественным образом разбиваются на две части. В верхней части представлены графики, относящиеся к КА «Фотон» № 11. Нижние графики иллюстрируют характер движения КА «Фотон» № 12. Начало координат графиков $t=0$ соответствуют времени начала обрабатываемых интервалов.

Движение КА «Фотон» № 12, происходившее вначале с малой угловой скоростью, постепенно убыстрялось (рис. 2 и 3). Особенно заметно возрастал компонент угловой скорости относительно продольной оси спутника. В первые несколько суток полёта этот компонент практически скачкообразно менялся после каждого прохождения

перигея орбиты. По мере раскрутки спутника его движение все больше становилось похожим на регулярную прецессию Эйлера осесимметричного твёрдого тела. В последние несколько суток полёта угловая скорость спутника относительно его продольной оси

составляла примерно 1 град./с, проекция угловой скорости на плоскость, перпендикулярную этой оси, имела модуль около 0.15 град./с. Отклонения продольной оси от нормали к плоскости орбиты не превышали 60 град.

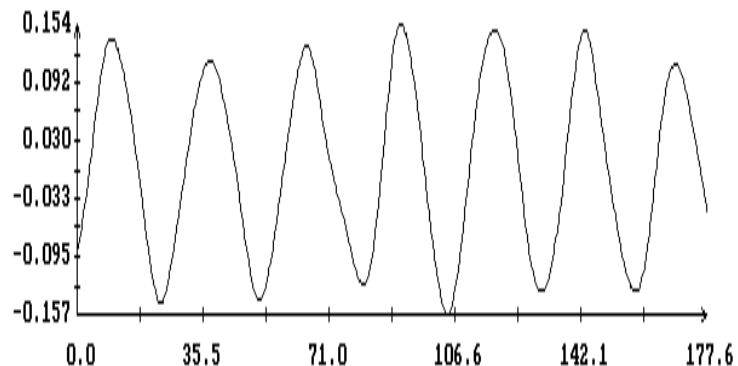
Таблица 1 Основные технические характеристики КА «Фотон» №№ 11-12

Параметр	Значение параметра во время полёта	
	КА «Фотон» № 11	КА «Фотон» № 12
Дата запуска	09.10.1997г	09.09.1999 г
Время старта, ДМВ	20.59.59	21.00.01
Время включения системы ориентации, ДМВ	21.08.45, 1-ый виток	21.08.45, 1-ый виток
Время выключения системы ориентации, ДМВ	22.38.53, 2-ой виток	22:38:45, 2-ой виток
Неориентированный полёт КА	до 202 витка	~ до 217 витка
Время включения системы ориентации перед посадкой, ДМВ	11.47.06, 202 виток	23.09.1999 г, 10:30:38
Время включения ТДУ, ДМВ	23.10.1997 г, 11.28.58, 218 виток	24.09.1999 г, 11:45:00, 234 виток
Дата посадки спускаемого аппарата, ДМВ	23.10.1997 г.	24.09.1999 г, 12.17.00
Продолжительность полёта	13 суток и 15 часов	14 суток и 15 часов
Масса КА полностью собранного, заправленного	6410,8 кг	6410,0
Масса КА к моменту включения ПТДУ*	5745,01 кг	---
Габаритные размеры КА:		
-длина	6200 мм	6200 мм
-диаметр	2500 мм	2500 мм
Параметры рабочей орбиты:		
-наклонение орбиты к плоскости экватора, град.	62,80°	62,81°
-максимальная высота, км	395,74	405,40
-минимальная высота, км	227,07	225,10
-период обращения, мин	90,40	90,53
Измерительные устройства:		
-измерение угловой скорости и микроускорений	СИНУС-6К, QSAM, БЕТА	СИНУС-12КУ, QSAM, FluidPac
-измерение магнитных полей внутри СА в течение всего орбитального полёта	не было	МИРАЖ
Ракета-носитель	«Союз»	
Космодром запуска	Плесецк	

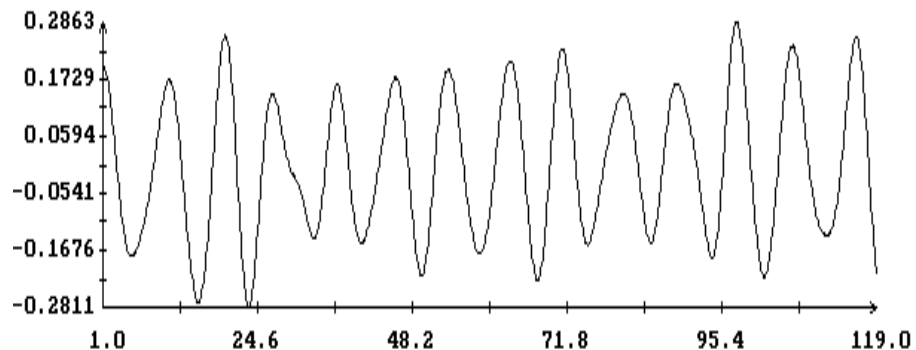
* - расчётное значение

Фотон № 11

Компонент угловой скорости w_3 , град./с (в начале полёта)

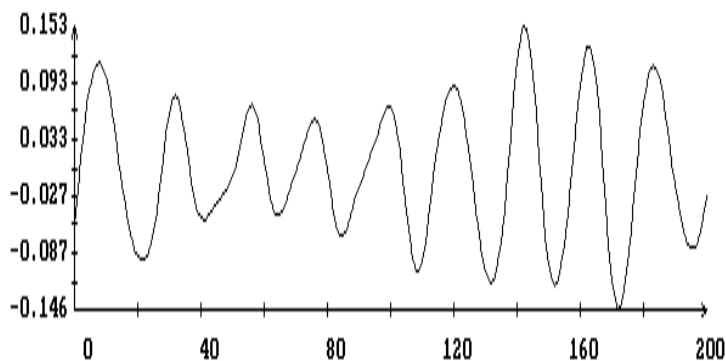


Компонент угловой скорости w_3 , град./с (в конце полёта)



t , сутки полёта

21



Фотон № 12

Компонент угловой скорости w_3 , град./с (в начале полёта)

Компонент угловой скорости w_3 , град./с (в конце полёта)

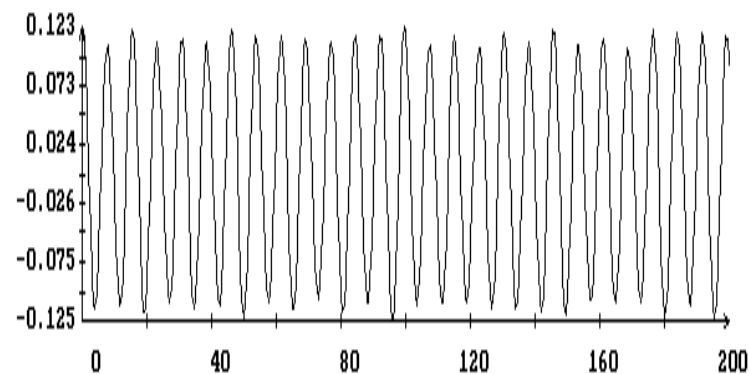
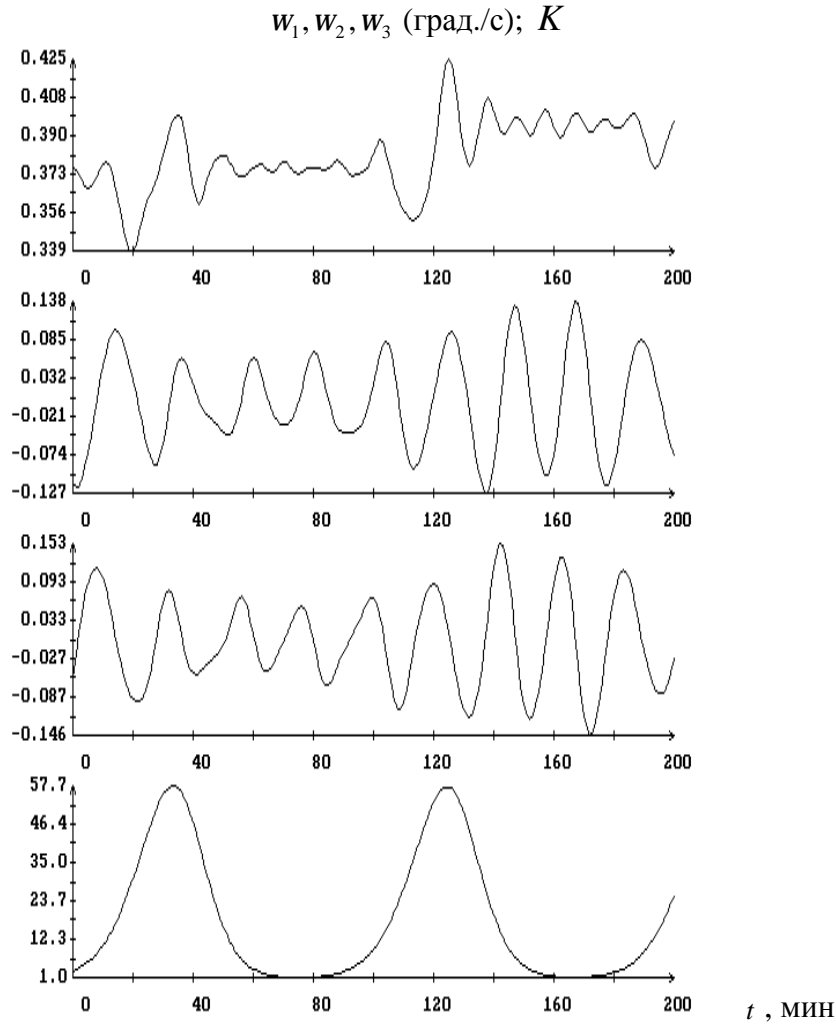
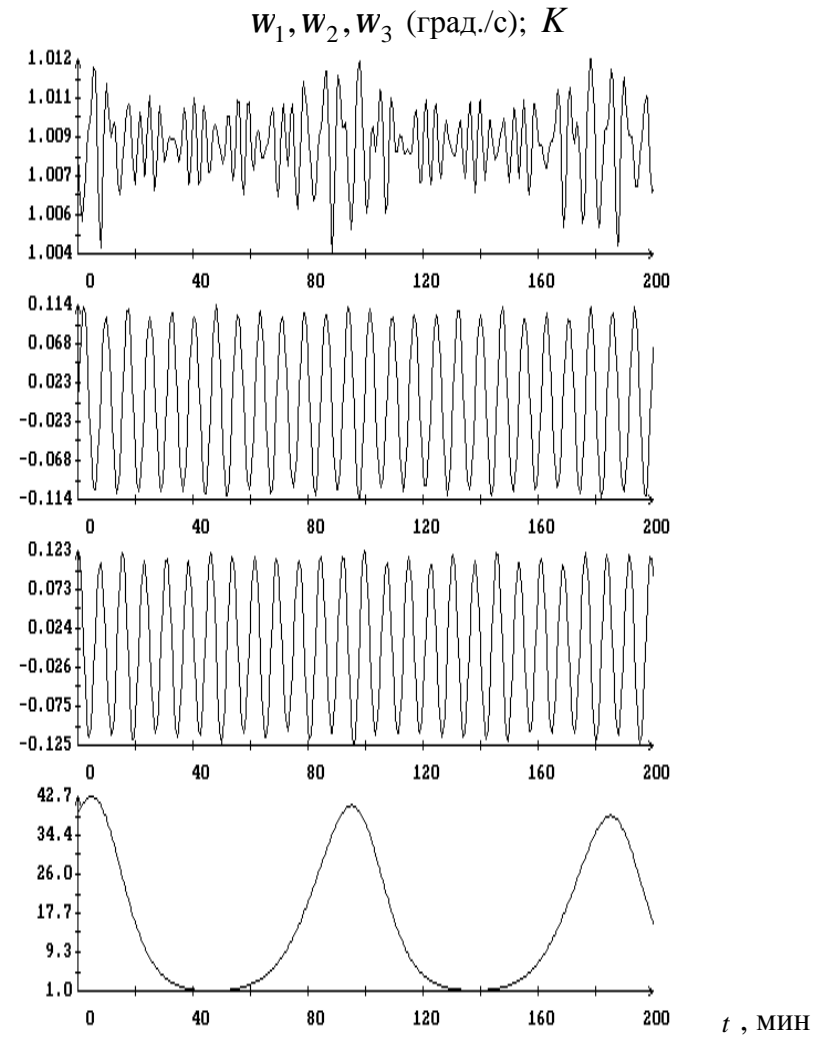


Рис. 1. Анализ результатов обработки данных измерений угловой скорости, проведенных на КА «Фотон» № 11 и КА «Фотон» № 1

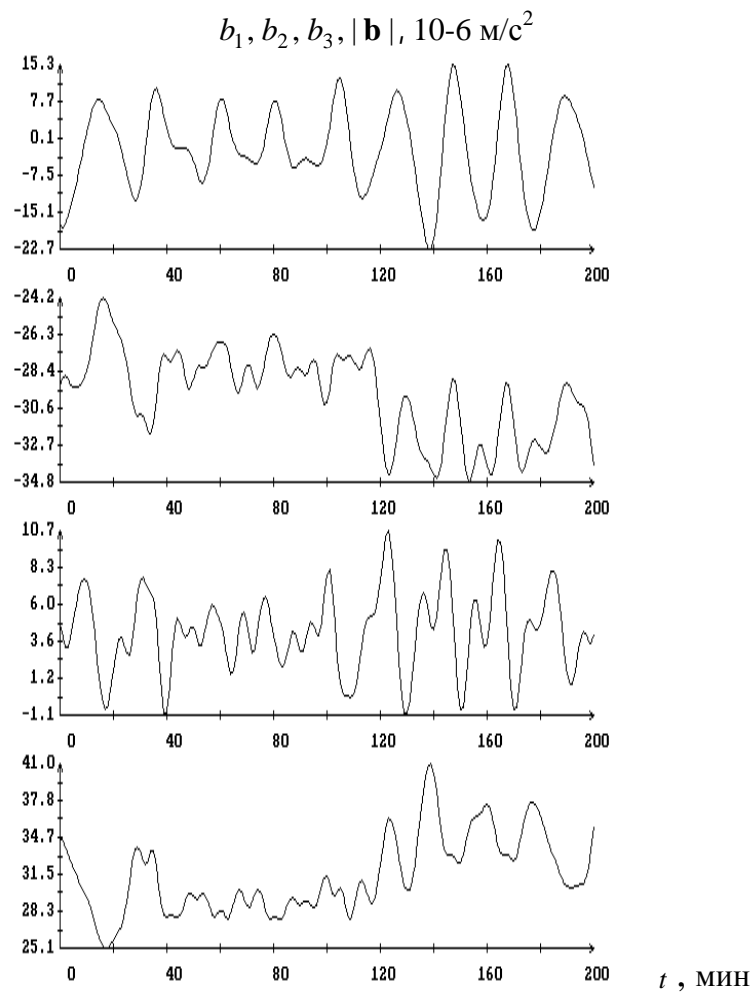


Время $t = 0$ соответствует 11:52:33 11.09.1999 г. ДМВ

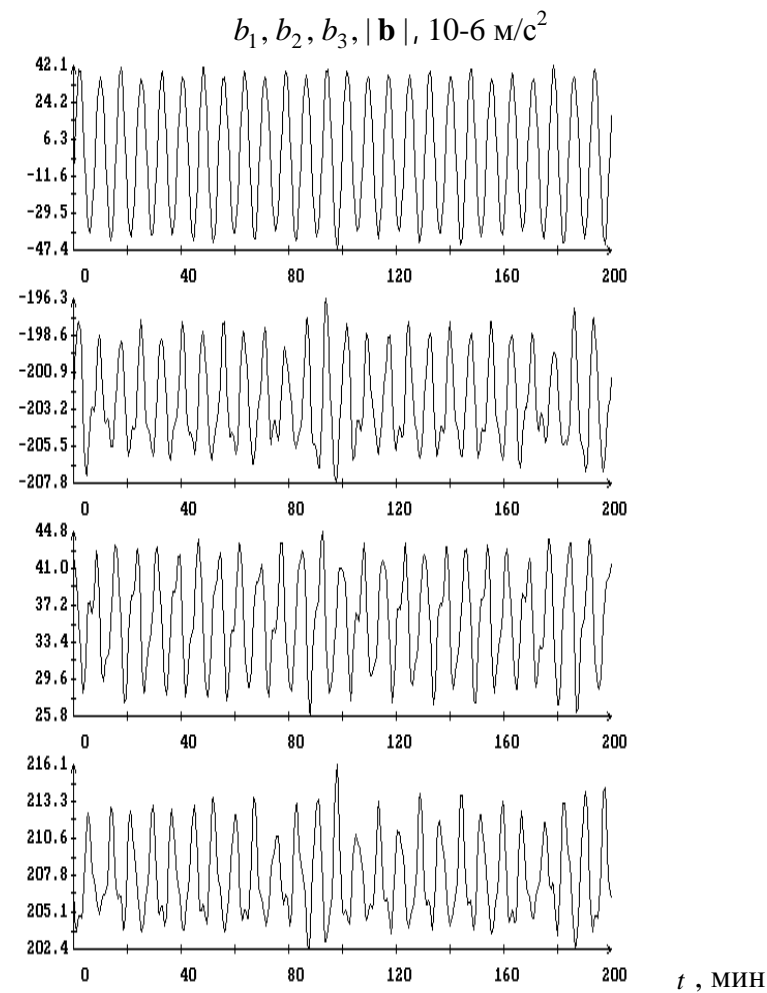


Время $t = 0$ соответствует 11:50:00 19.09.1999 г. ДМВ

Рис. 2. Результаты обработки данных измерений угловой скорости на КА «Фотон» № 12



Время $t = 0$ соответствует 11:52:33 11.09.1999 г. ДМВ



Время $t = 0$ соответствует 11:50:00 19.09.1999 г. ДМВ

Рис. 3. Результаты обработки данных измерений микроускорений, проведенных на КА «Фотон» № 12

Заключение

В проведённом исследовании, наряду с полученными закономерностями, дающими полное представление о характере движения КА типа «Фотон», были определены особенности обработки данных бортовых измерений (выбор временных интервалов, целесообразных для обработки, исключение подозрительных участков в данных измерений, содержащих ошибки и непригодных для обработки и др.).

Библиографический список

1. **Зайцев, А.С.** Анализ низкочастотных микроускорений на борту ИСЗ Фотон-11 [текст] / В.И. Абрашкин, А.С. Зайцев, В.В. Сазонов и др.// М.: ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, Препринт № 33, 1999.
2. **Зайцев, А.С.** Анализ низкочастотных микроускорений на борту ИСЗ ФОТОН-11 [текст] / В.И. Абрашкин, А.С. Зайцев, В.В. Сазонов и др.// Космические исследования. – 2001. - Т. 39, № 4. - С. 419-435.
3. **Зайцев, А.С.** Неуправляемое вращательное движение спутника ФОТОН-12 и квазистатические микроускорения на его борту [текст] / В.И. Абрашкин, А.С. Зайцев, В.В. Сазонов и др.// Космические исследования - 2003. - Т.41, № 1. - С. 45-56.
4. **Зайцев, А.С.** Анализ низкочастотной составляющей в измерениях угловой скорости и микроускорения, выполненных на спутнике Фотон-12 [текст] / В.И. Абрашкин, А.С. Зайцев, В.В. Сазонов и др.// Космические исследования - 2003. - Т.41, № 6. - С. 632 -651.
5. **Зайцев, А.С.** Низкочастотные микроускорения на борту ИСЗ Фотон-11 [текст] / В.И. Абрашкин, А.С. Зайцев, В.В. Сазонов и др.// Космические исследования – 2004. - Т. 42, № 2. - С. 185-200.
6. **Зайцев, А.С.** Квазистатические микроускорения на ИСЗ Фотон при его полёте на высоких орбитах [текст] / В.И. Абрашкин, А.С. Зайцев, В.В. Сазонов и

др.// Космические исследования - 2004. - Т.42, № 2. - С. 201 - 208.

7. **Зайцев, А.С.** Определение микроускорений и вращательного движения КА Фотон [текст] / А.С. Зайцев// В кн.: Труды VIII Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике. Аннотации докладов. – Пермь: ПГУ, 2001.

References

1. **Zaitsev, A.S.** Analysis of Low-Frequency Microgravity Environment onboard the Foton-11 / V.I. Abrashkin, A.S. Zaitsev, V.V. Sazonov and ect. // Moscow: Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Preprint № 33, 1999. – [in Russian].
2. **Zaitsev, A.S.** Analysis of Low-Frequency Microaccelerations onboard the Foton-11 Satellite / V.I. Abrashkin, A.S. Zaitsev, V.V. Sazonov and ect. // Cosmic Research – 2001. - V. 39, № 4. - P. 419-435. – [in Russian].
3. **Zaitsev, A.S.** Uncontrolled Attitude Motion of the Foton-12 satellite and Quasi-Steady Microaccelerations Onboard It / V.I. Abrashkin, A.S. Zaitsev, V.V. Sazonov and ect. // Cosmic Research - 2003. - V. 41, № 1. - P. 45-56. – [in Russian].
4. **Zaitsev, A.S.** An Analysis of the Low-Frequency Component in Measurements of Angular Velocity and Microacceleration onboard the Foton-12 Satellite / V.I. Abrashkin, A.S. Zaitsev, V.V. Sazonov and ect. // Cosmic Research - 2003. - V. 41, № 6. - P. 632 -651. – [in Russian].
5. **Zaitsev, A.S.** Low-Frequency Microaccelerations onboard the Foton-11 Satellite / V.I. Abrashkin, A.S. Zaitsev, V.V. Sazonov and ect. // Cosmic Research - 2004. -V. 42, № 2. - P. 185-200. - [in Russian].
6. **Zaitsev, A.S.** Quasistatic Microaccelerations onboard the Foton Satellite during Its Flight at High-Altitude Orbits / V.I. Abrashkin, A.S. Zaitsev, V.V. Sazonov and ect. // Cosmic Research - 2004. - V. 42, № 2. - P. 201 - 208. - [in Russian].
7. **Zaitsev, A.S.** Determination Microaccelerations and Rotate Motion the Foton S/C // In book: Bulletin VIIIth Congress of Theoretical Mechanics // Perm: PGU, 2001. - [in Russian].

**THE RESULTS OF DETERMINATION ANGULAR RATE AND QUASISTATIC
MICROACCELERATIONS THE FOTON S/C
ON THE ONBOARD MEASUREMENTS**

© 2010 г. V.I. Abrashkin¹, A.S. Zaitsev¹, V.V. Sazonov²

¹ Samara space rocket center “CSDB-Progress”, Samara

² Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow

The paper presents the results of determination angular rate and quasistatic microaccelerations on board the spacecraft’s Foton-11 and Foton-12.

Angular rate, microacceleration, vector of Earth magnetic field strength, least squares method, filtration of the measurement’s data, discrete Fourier series, the regular Euler precession of an axisymmetric rigid body

Информация об авторах

Абрашкин Валерий Иванович, кандидат технических наук, начальник отдела – заместитель начальника отделения ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС». E-mail: csdb@samtel.ru. Работает в области проектирования космических аппаратов научно-исследовательского и технологического назначения.

Зайцев Алексей Сергеевич, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева, начальник бюро отдела развития ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС». E-mail: dax1974@rambler.ru. Область научных интересов: механика космического полёта, системный анализ рынка ракетно-космической техники.

Сазонов Виктор Васильевич, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук, профессор механико-математического факультета МГУ, читает курс «Механика космического полёта». E-mail: sazonov@keldysh.ru. Работает в области прикладной небесной механики.

Abrashkin Valery Ivanovich, candidate of science, Samara Space Centre “TsSKB-Progress”, deputy division head - department head. E-mail: csdb@samtel.ru. Works in design of unmanned spacecraft for civil and research applications.

Zaitsev Aleksey Sergeevich, S.P.Korolyov Samara State Aerospace University, chief of bureau the department of development enterprises Samara Space Centre “TsSKB-Progress”. E-mail: dax1974@rambler.ru. Scientific research: space flight mechanics, a system analysis the market of space-rocket techniques.

Sazonov Victor Vasiljevich, principal research fellow of Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor of Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics. He gives a course Mechanics of a space flight. E-mail: sazonov@keldysh.ru. Works in the area of Applied Celestial Mechanics