

УДК 531.5001.5:629.7.058.83

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И РАСЧЕТА МИКРОУСКОРЕНИЙ НА БОРТУ НИЗКООРБИТАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ МИКРОГРАВИТАЦИОННОЙ ПЛАТФОРМЫ

© 2010 В.И. Абрашкин¹, А.Е. Казакова¹, В.В. Сазонов²

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

² Институт прикладной математики РАН, г. Москва

Приведены результаты, связанные с обработкой измерений, определением вращательного движения последних четырёх КА серии «Фотон» и расчётом бортовых квазистатических микроускорений. Разработаны методики расчёта и программно-математическое обеспечение послеполётной обработки получаемых данных и измерений.

Микроускорения, низкоорбитальная космическая микрогравитационная платформа (МГП), магнитное поле Земли, кинематическая модель движения КА

Известно, что на борту КА практически невозможно достичь состояния полной невесомости. Установленное на корпусе КА оборудование испытывает остаточные микроускорения, которые в ряде случаев существенно влияют на реализуемые с помощью этого оборудования процессы. Выделяют даже специальный класс так называемых гравитационно-чувствительных процессов и систем, на которые микроускорения влияют достаточно сильно. Одним из главных примеров таких процессов служит выращивание полупроводникового кристалла из расплава. Гравитационно-чувствительные процессы встречаются также в некоторых космических экспериментах по физике жидкости и биологии. Эксперименты с гравитационно-чувствительными процессами и системами занимают значительное место в программе экспериментов, проведённых на КА "Фотон". Реализация этой программы потребовала принятия специальных мер по контролю уровня остаточных микроускорений или микрогравитационной среды.

Возникновение остаточных микроускорений на борту МГП в неуправляемом полёте обусловлено несколькими причинами: движение КА относительно центра масс, градиент

гравитационного поля, аэродинамическое торможение, упругие колебания конструкции. Микроускорения измеряются акселерометрами, и их показания на массивных жёстких МГП типа КА "Фотон" естественным образом разбиваются на две составляющие – вибрационную (высокочастотную) и квазистатическую (низкочастотную). Квазистатическая составляющая имеет спектр в диапазоне от нуля до нескольких тысячных долей герца ($\leq 0,01$) и обусловлена первыми тремя указанными выше причинами, которые могут реализоваться для КА – твердого тела. Вибрационная составляющая имеет спектр в диапазоне выше нескольких сотых долей герца ($0,01 \div 400$) и вызвана упругими колебаниями конструкции КА от функционирования его бортовых устройств и научной аппаратуры.

Акселерометры позволяют измерять микроускорения во всём необходимом диапазоне частот, но для обеспечения высокой точности измерений каждая указанная выше частотная составляющая измеряется своим прибором. Акселерометры, предназначенные для измерения квазистатической составляющей, представляют собой сложные устройства, в которых предусматриваются специальные меры по устранению смещения нуля. Но при этом, квазистатическая составляющая,

наиболее просто и при определённых условиях наиболее точно определяется расчётным путем по информации о движении КА.

Рассмотрим МГП, представляющую собой твёрдое тело, и точку P , жёстко связанную с её корпусом. Микроускорением \mathbf{b} в точке P будем называть разность между напряжённостью гравитационного поля в этой точке и абсолютным ускорением последней. Вектор \mathbf{b} играет роль ускорения силы тяжести Земли в орбитальных экспериментах. В частности, если в точке P закрепить пробное тело с исчезающе малой массой m , то сила реакции, действующая на это тело со стороны КА, будет равна $-m\mathbf{b}$. Из негравитационных воздействий на КА будем учитывать только сопротивление атмосферы. Тогда микроускорение можно найти по формуле [1]

$$\mathbf{b} = \mathbf{r} \times \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} + (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \times \boldsymbol{\omega} + \frac{m_e}{|\mathbf{R}|^3} \left[\frac{3(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})\mathbf{R}}{|\mathbf{R}|^2} - \mathbf{r} \right] + cr_a |\mathbf{v}| \mathbf{v}. \quad (1)$$

Здесь \mathbf{r} – радиус-вектор точки P относительно центра масс КА – точки O , $\boldsymbol{\omega}$ – абсолютная угловая скорость КА, t – время, m_e – гравитационный параметр Земли, \mathbf{R} – геоцентрический радиус-вектор точки O , r_a – плотность атмосферы в этой точке, c – баллистический коэффициент КА, \mathbf{v} – скорость точки O относительно поверхности Земли.

Восстановив по какой-либо информации фактическое движение КА относительно центра масс и зная параметры орбиты КА, можно затем с помощью формулы (1) найти реальную квазистатическую составляющую микроускорения в любой заданной точке борта в функции времени. Информацию о вращательном движении могут предоставить, например, магнитометры и датчики угловой скорости. Если для определения движения использовать математическую модель, основанную на уравнениях динамики твёрдого тела, то

можно обойтись минимальной косвенной измерительной информацией, например, только показаниями трёхосного магнитометра или трёхосного датчика угловой скорости. Такой подход применялся к КА «Фотон». Данные бортовых измерений магнитного поля Земли (МПЗ) использовались для определения вращательного движения «Фотона-12», «Фотона М-2» и «Фотона М-3» [3, 7, 9]. Данные измерений угловой скорости использовались для определения вращательного движения «Фотона-11», «Фотона М-2» и «Фотона М-3» [1, 8]. Уровень измерения микроускорений осуществлялся и при некоторых предыдущих полётах КА «Фотон» [10, 11].

Аналогичным образом можно использовать и данные измерений микроускорения, если они получены с помощью акселерометра, обладающего достаточной чувствительностью в области низких частот. Сначала с помощью низкочастотной фильтрации из данных измерений выделяется квазистатическая составляющая. Затем эта составляющая аппроксимируется микроускорением, рассчитываемым по формуле (1) вдоль подобранного специальным образом решения уравнений движения КА [1, 3]. Необходимо отметить следующее: знание движения позволяет найти квазистатическое микроускорение в любой точке КА, тогда как низкочастотная фильтрация даёт его только в месте расположения акселерометра¹. Во-первых, проверяется адекватность уравнений движения КА. Измерения микроускорений в ряде случаев более полезны в этом отношении, чем измерения магнитного поля, поскольку содержат информацию об угловой скорости и угловом ускорении КА. Во-вторых, проверяется низкочастотный диапазон данных измерений акселерометра. При

¹ В некоторых случаях результаты фильтрации могут оказаться более информативными и отражать какие-то локальные особенности пространственного распределения квазистатических микроускорений, выпадающие из общей картины, которую даёт формула (1).

необходимости низкочастотная составляющая в этих данных может быть скорректирована с учётом движения КА [13].

2. Определения движения КА по измерениям магнитного поля Земли

Опишем применение этого подхода в случае полётов КА "Фотон-12", "Фотон М-2" и "Фотон М-3". Фактическое вращательное движение "Фотона-12" и "Фотона М-2" определялось по показаниям бортовых магнитометров, входящих в состав Российской аппаратуры «Мираж». Движение "Фотона М-3" определялось по показаниям магнитометров аппаратуры DIMAS Европейского космического агентства. Магнитометры предназначались для измерения магнитного поля в спускаемом аппарате во время проведения космических экспериментов. На каждом из указанных КА измерения проводились практически весь полёт. Как показал анализ полученных данных, магнитное поле в спускаемом аппарате мало отличалось от магнитного поля Земли. Это обстоятельство и тот факт, что КА были неуправляемы, позволили использовать полученные данные для определения их фактического вращательного движения по обычным методикам [3, 7, 9].

Обработка измерений магнитометров выполнялась следующим образом. По измерениям, относящимся к некоторому отрезку времени $t_0 \leq t \leq t_1$, с помощью конечных рядов Фурье строились функции $h_i(t)$ ($i=1, 2, 3$), которые задавали на этом отрезке компоненты вектора $\mathbf{H}(t)$ местной напряжённости магнитного поля Земли в приборной системе координат КА $Ox_1y_2y_3$. Зная параметры орбиты КА и воспользовавшись аналитической моделью магнитного поля Земли, можно рассчитать компоненты $\mathbf{H}(t)$ в гринвичской системе координат SY_2Y_3 . Полученные два набора функций должны быть связаны определёнными соотношениями, из условия выполнения которых находилось решение уравнений

вращательного движения КА, аппроксимирующее на отрезке $t_0 \leq t \leq t_1$ его фактическое движение.

В уравнениях движения учитывались гравитационный, восстанавливающий аэродинамический и некоторые другие механические моменты. Эти уравнения записывались в системе координат $Ox_1x_2x_3$, образованной главными центральными осями инерции КА. Угол между осями Ox_1 и Oy_1 составлял около одного градуса, углы между осями Ox_2 , Oy_2 и Ox_3 , Oy_3 были несколько больше. Матрицу перехода от системы $Ox_1x_2x_3$ к системе SY_2Y_3 обозначим $\|a_{ij}\|_{i,j=1}^3$, где a_{ij} – косинус угла между осями SY_i и Ox_j . Зависимость элементов этой матрицы от времени определяется решением уравнений движения. Матрицу перехода от системы $Ox_1x_2x_3$ к приборной системе координат обозначим $\|b_{ij}\|_{i,j=1}^3$. Здесь b_{ij} – косинус угла между осями Oy_i и Ox_j . Аппроксимацией фактического движения КА на отрезке $t_0 \leq t \leq t_1$ считалось решение уравнений вращательного движения, доставляющее минимум функционалу

$$\Phi = \sum_{n=0}^N \sum_{i=1}^3 [h_i(t_0 + nt) - \Delta_i - h'_i(t_0 + nt)]^2, \quad (2)$$

$$h'_i(t) = \sum_{j,k=1}^3 H_j(t) a_{jk}(t) b_{ik}, \quad t = \frac{t_1 - t_0}{N}.$$

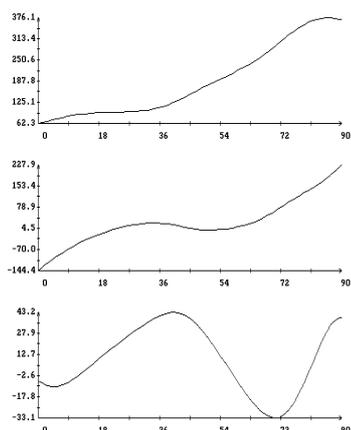
Минимизация Φ проводилась по начальным условиям решения в точке t_0 и параметрам математической модели. К последним относятся постоянные смещения Δ_i в данных измерений, параметры уравнений движения КА и три угла, задающих матрицу перехода $\|b_{ij}\|$. Обычно принималось $t_1 - t_0 \approx 100 \div 300$ мин, $t \approx 1$ мин.

В качестве примера приведём реконструкцию вращательного движения

КА «Фотон М-2». Примеры результатов представлены на рис. 1 и в табл. 1.

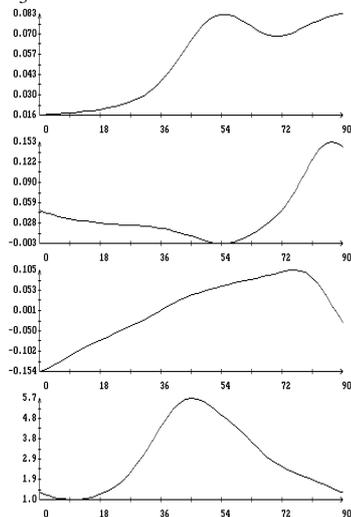
Таблица 1. Основные характеристики некоторых обработанных интервалов для «Фотона М-2»

$g, d, b \text{ (}^\circ\text{)}$



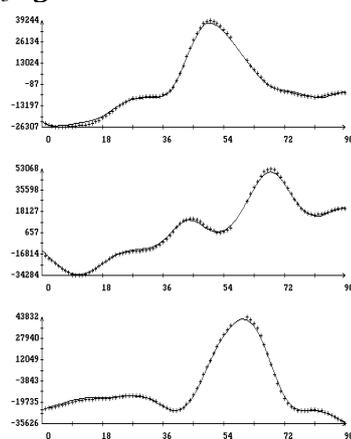
$t \text{ (мин)}$

$w_1, w_2, w_3 \text{ (}^\circ\text{/с), K}$



$t \text{ (мин)}$

$h_1, h_2, h_3 \text{ (g)}$



$t \text{ (мин)}$

Рис. 1. Движение «Фотона М-2». Момент $t = 0$ на графиках соответствует 14:12:48 UTC 31.05.2005, $S = 952 \text{ g}$.

№ инт.	Дата 2005	t_0 (UTC), h.m.s	$\sigma_{n, \gamma}$	$\langle \omega_i \rangle$, град./с	$\delta \omega_i$, град./с	$\langle w_i \rangle$, град./с	δw_i , град./с
1	31.V	23:25:30	2947	0.200	0.017	0.107	0.045
2	1.VI	11:11:08	1318	0.312	0.014	0.082	0.045
3	2.VI	00:11:50	1428	0.441	0.013	0.099	0.038
4	2.VI	11:12:25	1566	0.521	0.012	0.066	0.029
5	3.VI	00:13:07	1038	0.645	0.016	0.070	0.024
6	3.VI	11:13:43	1231	0.745	0.0070	0.056	0.016
7	4.VI	00:14:24	1381	0.789	0.0059	0.094	0.029
8	4.VI	13:15:06	1111	0.849	0.0067	0.145	0.013
9	5.VI	10:36:15	1340	0.931	0.0059	0.147	0.011
10	6.VI	11:17:34	1094	1.008	0.0072	0.146	0.011
11	7.VI	09:18:45	1136	1.066	0.0039	0.131	0.0099
12	8.VI	09:20:02	1210	1.111	0.0058	0.114	0.010
13	9.VI	09:21:20	1147	1.149	0.0021	0.112	0.010

Рис. 1 естественным образом разбивается на три части – левую, среднюю и правую. Графики в правой части иллюстрируют качество согласования функций $h_i(t)$ и $H_i(t)$ с помощью найденного движения КА. Здесь в каждой системе координат сплошной линией изображён график одной из функций $h'_i(t)$ на отрезке $t_0 \leq t \leq t_1$, маркерами указаны точки $(t_0 + nt, h_i(t_0 + nt) - \Delta_i)$, $n = 0, 1, \mathbf{K}, N$. Количественно совпадение указанных функций характеризуется стандартным отклонением $s \approx \sqrt{\Phi_{\min} / 3N}$, где Φ_{\min} – минимальное значение функционала (2). Значения s приведены в подписях к рисунку, а для некоторых интервалов ещё и в табл. 1.

В средней части рисунка помещены графики зависимости от времени компонент $w_i(t)$ ($i = 1, 2, 3$) абсолютной угловой скорости КА в системе координат $Ox_1x_2x_3$ и график отношения K плотности атмосферы в точке O к минимальному значению этой плотности на данном интервале. Минимальные значения $K = 1$ достигаются в окрестности апогея, максимальные – вблизи перигея. Функция $K(t)$ характеризует действующий на КА аэродинамический момент. Средние графики расчетов показывают, что угловая скорость КА постепенно возрастала. Причины возрастания исследованы в [19].

По мере увеличения угловой скорости движение КА становилось всё больше похоже на регулярную

прецессию Эйлера осесимметричного твёрдого тела. Формирование регулярной прецессии с медленно возрастающей угловой скоростью w_1 и практически неизменным значением $w = \sqrt{w_2^2 + w_3^2}$ завершилось после полутора – двух суток полёта. Начиная примерно с этого времени, движение «Фотона М-2» на интервалах обработки данных измерений имеет смысл характеризовать величинами

$$\langle w_1 \rangle = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} w_1 dt,$$

$$dw_1 = \sqrt{\frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} [w_1 - \langle w_1 \rangle]^2 dt}.$$

Вернемся к описанию рисунков. В левой части рис. 1 находятся графики зависимости от времени углов g , d и b , задающих ориентацию системы $Ox_1x_2x_3$ – главных центральных осей инерции КА – относительно квазиинерциальной системы координат $CZ_1Z_2Z_3$.

Изменение вида графиков углов на рис. 1 и результаты расчётов поясняют начальный этап эволюции движения КА. Наибольший интерес на рис. 1 представляют графики угла b . На всех этих графиках b меняет знак.

Точность определения движения с помощью описанной методики можно характеризовать стандартными отклонениями определяемых величин. Как правило, такие стандартные отклонения, рассчитанные в рамках метода наименьших квадратов, дают заниженные оценки погрешности. Сошлёмся на опыт определения неуправляемого вращательного движения станции «Мир» по данным измерений магнитометров с помощью сходной методики и результатов аналогичного определения того же движения по показаниям оптического звёздного датчика, а также по телеметрической информации из БЦВМ [17, 18]. Информацию от звёздного датчика и из

БЦВМ в данном случае можно считать эталонной. Сопоставление результатов полученных разными способами на одних и тех же отрезках движения станции показывает, что реальную оценку максимальной погрешности можно найти, увеличив указанные стандартные отклонения в два раза. Исходя из этого рецепта, были получены следующие оценки [7]: для большинства моментов времени реальная погрешность определения положения осей Ox_1 и Oy_i ($i = 1, 2, 3$) составляет около 1° , погрешность определения компонент угловой скорости w_i и аналогичных компонент в приборной системе координат – менее $0.01^\circ/\text{с}$.

В табл. 2 приведены характеристики некоторых интервалов времени, на которых можно говорить о близости движения КА к регулярной прецессии Эйлера.

Таблица 2. Основные характеристики некоторых обработанных интервалов для «Фотона М-3»

№	Дата	t_0 (UTC), h:m:s	T , мин	$\sigma_{H, \gamma}$	$\langle \omega \rangle$, град/с	$\delta \omega$, град/с	$\langle w \rangle$, град/с	δw , град/с
1	14	13:55:34	270	1380	–	–	–	–
2	14	23:08:55	360	687	–	–	–	–
3	15	09:38:58	270	596	–	–	–	–
4	15	21:35:45	270	935	–	–	–	–
5	16	08:58:55	270	756	–	–	–	–
6	16	18:42:11	270	1514	–	–	–	–
7	17	09:08:59	360	763	0.151	0.030	0.192	0.012
8	17	20:08:55	270	982	0.174	0.020	0.187	0.010
9	18	09:05:41	360	500	0.199	0.036	0.189	0.0099
10	19	09:55:40	360	678	0.251	0.013	0.182	0.010
11	20	06:52:17	270	691	0.330	0.0084	0.183	0.013
12	21	08:42:24	360	615	0.402	0.0065	0.181	0.014
13	22	06:55:45	360	650	0.410	0.0054	0.188	0.012
14	23	07:09:05	360	573	0.430	0.0085	0.189	0.010
15	24	05:19:05	360	732	0.441	0.015	0.185	0.011
16	24	19:12:27	360	542	0.456	0.020	0.180	0.012

3. Расчет и измерение микроускорений на КА «Фотон М-2» и «Фотон М-3»

На борту КА «Фотон М-2» и «Фотон М-3» находился трёхосный акселерометр TAS-3, созданный фирмой Редшифт Дизайн энд Инжиниринг БВБА (г. Синт-Никлас, Бельгия). На «Фотоне М-3» этот акселерометр входил в состав аппаратуры DIMAC. На обоих КА TAS-3 был установлен вблизи печи «Полизон» и работал непрерывно в течение почти всего полёта. Цель измерений состояла в определении микроускорений, имевших место в рабочем пространстве этой печи

во время проведения технологических экспериментов.

Акселерометр TAS-3 измерял кажущееся ускорение ($-\mathbf{b}$). Данные измерений TAS-3 получены со скоростью выборки 1000 отсчётов в секунду и имеют широкий частотный диапазон. Ниже рассматривается только низкочастотная составляющая этих данных. Её выделение (низкочастотная фильтрация) выполнялось с помощью конечных рядов Фурье независимо для каждой векторной компоненты.

Прямое сопоставление данных измерений TAS-3 с результатами расчёта микроускорения по формуле (1) обнаружило, что составляющие микроускорения с инфра низкими частотами (менее $\sim 10^{-4}$ Гц) этим акселерометром измеряются с очень большой ошибкой. Кроме того, было обнаружено, что в данных измерений этого акселерометра имеются наводки со стороны МПЗ [13]. Заметим, что аналогичные наводки были обнаружены также в данных измерений, выполненных на «Фотоне-12» системой QSAM. А именно, в данных измерений микроускорения высокочастотным акселерометром этой системы и в данных измерений угловой скорости её датчиком угловой скорости [5, 14]. Чтобы устранить указанные ошибки, результаты низкочастотной фильтрации данных измерений TAS-3 нужным образом корректировались. Здесь не будем описывать всех деталей коррекции, упомянем только её наиболее важные этапы [13].

Во-первых, из данных измерений удалялись составляющие с частотами менее 0.00015 Гц. Эта операция выполнялась с помощью конечных рядов Фурье [5].

Во-вторых, в фильтрованные данные вносилась поправка за влияние магнитного поля Земли. Считалось, что эта поправка для каждой векторной компоненты микроускорения линейно зависит от всех компонент напряженности МПЗ. Девять коэффициентов этой зависимости служили уточняемыми параметрами и

определялись методом наименьших квадратов.

В-третьих, удалённые из фильтрованных микроускорений составляющие с инфра низкими частотами заменялись аналогичными составляющими функций, рассчитанных по формуле (1). Здесь опять же использовался аппарат конечных рядов Фурье. Фактически эта замена и удаление инфра низкочастотных ошибок из фильтрованных данных выполнялись в рамках единой операции. Подчеркнём, что верные, (\equiv расчётные) инфра низкочастотные составляющие микроускорения имеют весьма малые амплитуды.

Пример результатов сопоставления микроускорений, рассчитанных по формуле (1) с результатами низкочастотной фильтрации данных измерений представлены на рис. 2.

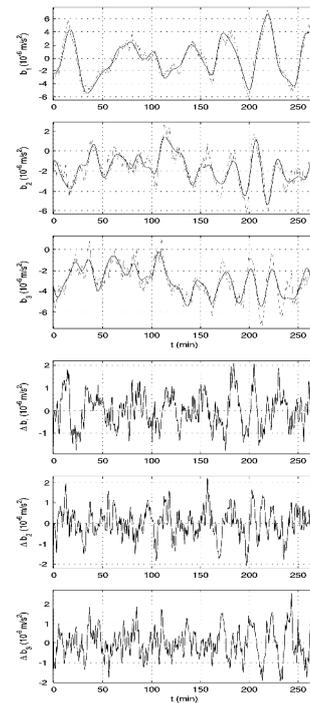


Рис. 2. Квазистатическое микроускорение в точке расположения TAS-3 на интервале 1 табл.

$1, S_b = 8.7 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2$; (а) исправленные фильтрованные данные $\hat{b}_i(t)$ и их расчётный аналог $b_i(t)$, (б) рассогласование

$$\Delta b_i(t) = \hat{b}_i(t) - b_i(t).$$

Результаты данного раздела интересны по двум причинам. Во-

первых, они дают детальную оценку точности акселерометра ТАС-3 в области низких частот. Во-вторых, они показывают, что уровень квазистатических микроускорений на борту «Фотон» определялся их вращательным движением. Это показывает практическую важность задачи определения вращательного движения КА.

4. Определения движения КА по измерениям угловой скорости

Измерения угловой скорости не так информативны для определения вращательного движения КА как измерения МПЗ, но при отсутствии другой информации приходится довольствоваться ими. Если использовать достаточно точную математическую модель вращательного движения КА, то результат определения этого движения по измерениям одной лишь угловой скорости может оказаться вполне приемлемым. Ориентация КА при этом определяется не так точно, как по магнитным измерениям, но угловая скорость находится точно, а в случае «Фотон» (после первых нескольких суток их неуправляемого полёта) именно члены формулы (1), зависящие от угловой скорости, дают наиболее значимый вклад в микроускорение.

Измерения угловой скорости проводились на последних четырёх «Фотонах». На «Фотоне-11» и «Фотоне-12» они выполнялись системой QSAM [1, 5, 14], на «Фотоне М-2» и «Фотоне М-3» – датчиком угловой скорости системы управления движением КА [8]. Все эти измерения были успешно использованы для реконструкции вращательного движения указанных КА. Ниже в основном приводятся некоторые результаты, полученные для «Фотона М-2» и «Фотона М-3».

Данные измерений, полученные во время одного сеанса, представляют собой совокупность чисел

$$t_n, \Omega_1^{(n)}, \Omega_2^{(n)}, \Omega_3^{(n)} \quad (n = 0, 1, \mathbf{K}, N), \quad (3)$$

где $\Omega_i^{(n)}$ ($i = 1, 2, 3$) приближенные значения компонент угловой скорости

КА в приборной системе координат $Oy_1y_2y_3$ в момент времени t_n , $t_0 < t_1 < \mathbf{K} < t_N$. Если сеанс проходил без сбоя, то $N = 419$, $t_n - t_{n-1} = 12$ с, $t_N - t_0 = 83.8$ мин.

Поскольку данных в каждом сеансе было немного, в одном из вариантов обработки эти данные обрабатывались непосредственно. Обработка состояла в аппроксимации всех измерений сеанса одним решением уравнений вращательного движения КА. Аппроксимация строилась методом наименьших квадратов. Опишем процедуру обработки более детально.

Пусть ошибки в измерениях (3) независимы и имеют нормальные распределения с одинаковым стандартным отклонением S_{Ω} , ошибки в измерениях i -ой компоненты имеют одинаковые средние значения Δ_{Ω_i} – смещения. Параметры Δ_{Ω_i} и S_{Ω} неизвестны. В соответствии с методом наименьших квадратов аппроксимацией фактического движения КА на отрезке $t_0 \leq t \leq t_N$ считалось решение уравнений вращательного движения, доставляющее минимум функционалу

$$\Phi_{\Omega} = \sum_{n=0}^N \sum_{i=1}^3 [\Omega_i^{(n)} - \Delta_{\Omega_i} - \Omega_i(t_n)]^2, \\ \Omega_i(t) = \sum_{k=1}^3 b_{ik} w_k(t). \quad (4)$$

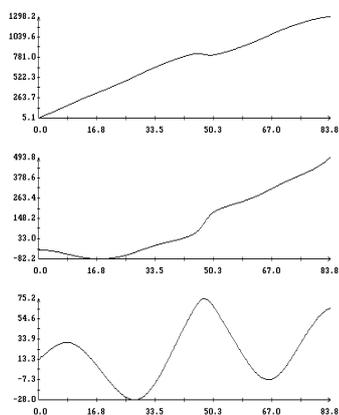
Минимизация Φ_{Ω} проводилась по начальным условиям решения в точке t_0 и параметрам математической модели. В число этих параметров входят постоянные смещения Δ_{Ω_i} в данных измерений, параметры уравнений движения КА и три угла, задающих матрицу перехода $\|b_{ij}\|$.

Некоторые примеры определения движения «Фотона М-2» по измерениям угловой скорости приведены на рис. 3.

Найденные реконструкции движения КА достаточно точно совпадают с реконструкциями, построенными по магнитным измерениям. Вообще, данные магнитных

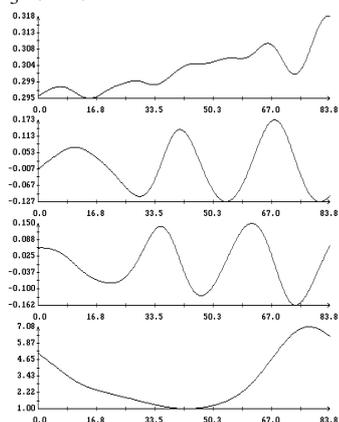
измерений и измерений угловой скорости хорошо согласуются друг с другом. Это показано совместной обработкой этих данных [8].

$g, d, b (^{\circ})$



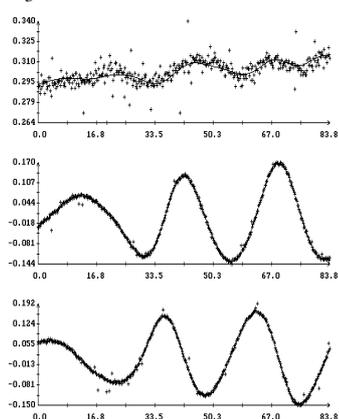
t (мин)

$w_1, w_2, w_3 (^{\circ}/c), K$



t (мин)

$\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3 (^{\circ}/c)$



t (мин)

Рис. 3. Движение «Фотона М-2». Момент $t = 0$ на графиках соответствует 12:09:36 UTC

$$01.06.2005, S_{\Omega} = 0.0060 \text{ } ^{\circ}/c,$$

$$\langle w_1 \rangle = 0.302 \text{ } ^{\circ}/c, \quad dw_1 = 0.0054 \text{ } ^{\circ}/c,$$

$$\langle w \rangle = 0.118 \text{ } ^{\circ}/c, \quad dw = 0.035 \text{ } ^{\circ}/c.$$

Точность определения движения с помощью методики, описанной в данном разделе, удобно характеризовать стандартными отклонениями определяемых величин. В случае угловых скоростей w_i, Ω_i ($i = 1, 2, 3$) эта точность почти такая же, как при определении движения по магнитным измерениям (но надо учесть, что отрезки измерений угловой скорости в несколько раз короче обработанных отрезков магнитных измерений), в случае углов – примерно на порядок хуже [8].

На «Фотоне-11» выполнялись также измерения микроускорений; использовались акселерометры системы QSAM, акселерометр ВЕТА. Обработка данных этих измерений подтвердила эволюцию угловой скорости КА, приведенную в табл. 3 [1, 3].

Таблица 3. Результаты обработки данных измерений угловой скорости, выполненных системой QSAM на «Фотоне-11»

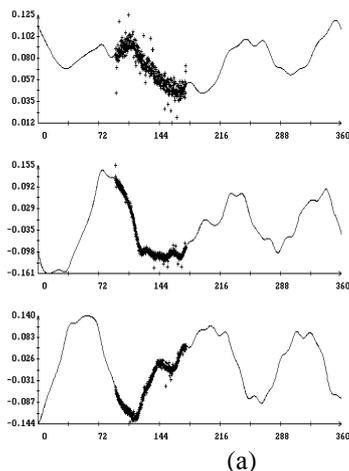
№ с.	Дата X.1997	t_0 (UTC), h:m:s	t_{Σ} , мин	N	σ_{ω} , $^{\circ}/c$	$\langle \omega \rangle$, $^{\circ}/c$	$\delta \omega$, $^{\circ}/c$	$\langle w \rangle$, $^{\circ}/c$	δw , $^{\circ}/c$
1	10	23:25:30	177.6	177	0.045	0.308	0.016	0.128	0.018
2	11	11:11:08	177.6	177	0.037	0.519	0.004	0.135	0.013
3	12	00:11:50	118.4	118	0.043	0.700	0.003	0.146	0.020
4	13	11:12:25	118.4	118	0.042	0.705	0.005	0.162	0.011
5	13	00:13:07	236.8	236	0.044	0.798	0.003	0.159	0.018
6	14	11:13:43	236.8	236	0.043	0.928	0.002	0.155	0.013
7	15	00:14:24	118.4	118	0.036	0.892	0.003	0.164	0.011
8	15	13:15:06	296.0	295	0.041	0.862	0.003	0.159	0.013
9	16	10:36:15	118.4	118	0.047	0.855	0.003	0.171	0.010
10	16	11:17:34	118.4	118	0.038	0.892	0.003	0.177	0.014
11	16	09:18:45	59.2	59	0.044	0.933	0.005	0.186	0.011
12	17	09:20:02	118.4	118	0.046	0.925	0.003	0.182	0.009
13	17	09:21:20	118.4	118	0.041	0.907	0.007	0.194	0.011
14	17	21:34:30	59.2	59	0.045	0.865	0.011	0.207	0.011

5. Определения движения КА по измерениям угловой скорости и напряжённости МПЗ с помощью кинематической модели движения

Выше рассматривалась отдельная обработка данных измерений угловой скорости и напряжённости МПЗ, выполненных на КА «Фотон М-2» и «Фотон М-3». Эта обработка проводилась с помощью интегральных статистических методик, основанных на полных – кинематических и динамических – уравнениях вращательного движения КА. Была проведена и совместная обработка этих данных, показавшая их хорошую согласованность [8]. Эта обработка также

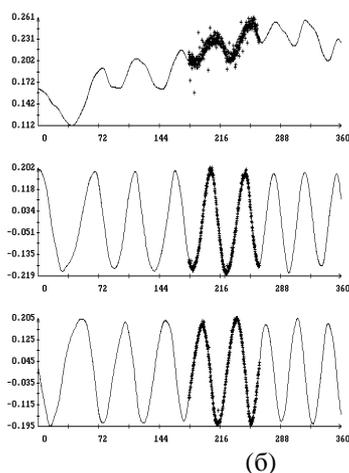
проводилась с использованием полных уравнений движения.

$\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ ($^\circ/\text{с}$)



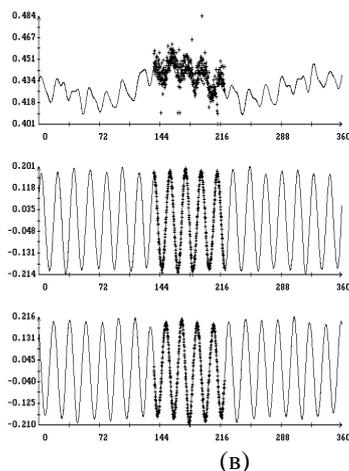
t (мин)

$\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ ($^\circ/\text{с}$)



t (мин)

$\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ ($^\circ/\text{с}$)



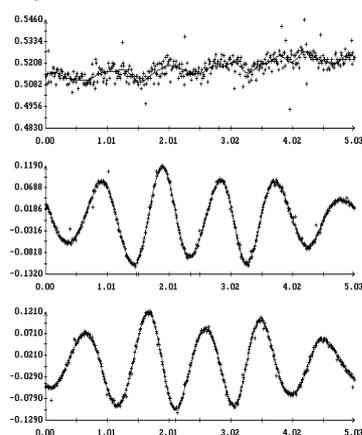
t (мин)

Рис. 4. Маркеры – данные измерений угловой скорости на «Фотоне М-3», сплошные кривые – реконструкция функций $\Omega_i(t)$ ($i = 1, 2, 3$) по измерениям МПЗ. Момент $t = 0$ на графиках (а) соответствует 09:38:58 UTC 15:09:2007, на графиках (б) – 08:05:41 UTC 18:09:2007, на графиках (в) – 09:25:54 UTC 23.09.2007.

Хорошее согласие обоих видов измерений (рис. 4) позволяет применить другой способ их совместной обработки. А именно, интегральную статистическую методику, основанную только на кинематических уравнениях. Эта методика не зависит от модели внешних моментов и поэтому может служить средством разного рода проверок. Кроме того, такую методику можно применять для реконструкции управляемых вращательных движений КА, в частности, планируемых движений КА «Бион М» и «Фотон М-4».

Методика обработки, основанная только на кинематических уравнениях вращательного движения КА, состоит в следующем. Полагаем, что данные измерений обоих видов интерпретируются в приборной системе координат $Oy_1y_2y_3$. По данным измерений (3) угловой скорости в виде конечных рядов Фурье строятся аппроксимирующие выражения $c_i(t)$ ($i = 1, 2, 3$). Типичный вид данных измерений (3) и графиков сглаживающих эти данные выражений $c_i(t)$ приведен на рис. 5.

$\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ ($^\circ/\text{с}$)



t (10^3 с)

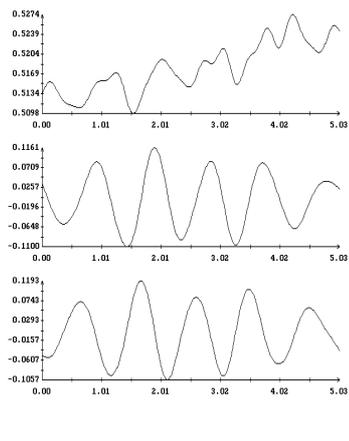
$c_1, c_2, c_3 \text{ (}^\circ/\text{с)}$

 $t (10^3 \text{ с})$

Рис. 5. Аппроксимация данных измерений угловой скорости, полученных на спутнике «Фотон М-2», момент $t = 0$ соответствует 12:10:14.272 UTC 02.06.2005., маркерами обозначены данные измерений, сплошные кривые – графики функций $c_i(t)$ ($i = 1, 2, 3$).

Точки $(t_n, \Omega_i^{(n)})$ изображены маркерами в виде крестов в левой части рисунка, там же сплошными линиями изображены графики функций $c_i(t)$. Поскольку маркеры в некоторых местах закрывают линии графиков, последние для ясности повторены в правой части рисунка. В кинематические уравнения, описывающие движение приборной системы координат, в качестве угловых скоростей подставляются величины $\Omega_i = c_i(t) + \Delta_{\Omega_i}$. Здесь по-прежнему Δ_{Ω_i} – постоянные смещения в данных измерений. На решениях кинематических уравнений минимизируется функционал, аналогичный функционалу (2). Решение, доставляющее функционалу минимум, считается реконструкцией фактического движения КА.

Некоторые результаты построения таких реконструкций для КА «Фотон М-2» приведены на рис. 6.

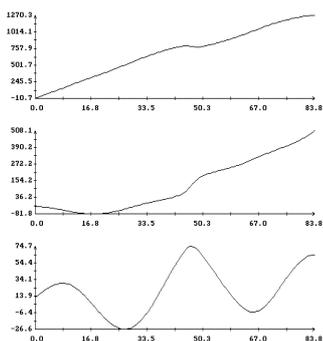
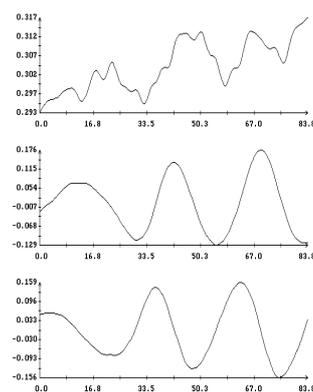
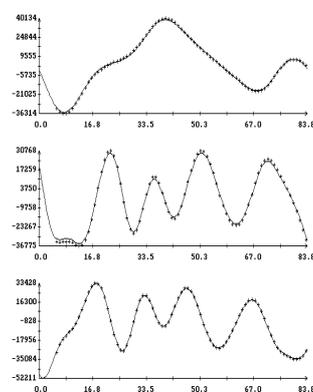
 $g, d, b \text{ (}^\circ)$

 $t \text{ (мин)}$
 $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3 \text{ (}^\circ/\text{с)}$

 $t \text{ (мин)}$
 $h_1, h_2, h_3 \text{ (g)}$

 $t \text{ (мин)}$

Рис. 6. Движение «Фотона М-2». Момент времени $t = 0$ на графиках соответствует 12:10:18 UTC 01.06.2005, $S = 887 \text{ g}$.

Результаты определения движения КА по изложенной методике хорошо согласуются с результатами, полученными по методике раздела 2.

6. Заключение

Выше были приведены некоторые результаты, связанные с определением вращательного движения последних четырех КА «Фотон», расчётом и измерением квазистатических микроускорений на их борту. Для решения этих задач имеются достаточно точные и надежные методики. Программное обеспечение, реализующее эти методики, ориентировано на послеполётную обработку получаемых данных – обработку, проводимую в спокойной обстановке, когда есть время обдумать возникающие сложности.

В настоящее время сформированы требования и проводятся работы по созданию бортового магнитометра "Гравитон" и автоматизированного рабочего места для КА "Бион-М" №1 (аналог "Фотона"), позволяющие во время орбитального полета по информации с КА оперативно оценивать уровень микроускорений в низкочастотной части спектра и принимать решения в поддержку научных экспериментов.

Библиографический список

1. Сазонов В.В., Чебуков С.Ю., Абрашкин В.И., Казакова А.Е., Зайцев А.С. Анализ низкочастотных микроускорений на борту ИСЗ "Фотон-11". Космические исследования, 2001, т. 39, № 4, с. 419-435.

2. Абрашкин В.И., Зайцев С.А., Казакова А.Е., Чебуков С.Ю. Определение микроускорений и вращательного движения КА «Фотон». VIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Пермь, 23-29 августа 2001. Аннотации докладов с. 19.

3. Абрашкин В.И., Балакин В.Л., Белоконов И.В., Воронов К.Е., Зайцев А.С., Иванов В.В., Казакова А.Е., Сазонов В.В., Семкин Н.Д. Неуправляемое вращательное движение КА "Фотон-12", и квазистатические микроускорения на его борту. Космические исследования, 2003, т. 41, № 1, с. 45-56.

4. Сазонов В.В., Чебуков С.Ю., Абрашкин В.И., Казакова А.Е., Зайцев А.С. Низкочастотные микроускорения на борту ИСЗ "Фотон-11". Космические исследования, 2004, т. 42, № 2, с. 185-200.

5. Абрашкин В.И., Волков М.В., Егоров А.В., Зайцев А.С., Казакова А.Е., Сазонов В. Анализ низкочастотной составляющей в измерениях угловой скорости и микроускорения, выполненных на КА "Фотон-12".

Космические исследования, 2003, т. 41, № 6, с. 632-651.

6. Абрашкин В.И., Богоявленский Н.Л., Воронов К.Е., Казакова А.Е.,

Пузин Ю.Я., Сазонов В.В., Семкин Н.Д., Чебуков С.Ю. Определение вращательного движения КА "Фотон М-2" по данным измерений бортовых датчиков. IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Нижний Новгород, 22-28 августа 2006. Аннотации докладов, том I, с. 8.

7. Абрашкин В.И., Богоявленский Н.Л., Воронов К.Е., Казакова А.Е., Пузин Ю.Я., Сазонов В.В., Семкин Н.Д., Чебуков С.Ю. Неуправляемое вращательное движение КА «Фотон М-2» и квазистатические микроускорения на его борту. Космические исследования, 2007, т. 45, № 5, с. 450-470.

8. Абрашкин В.И., Казакова А.Е., Сазонов В.В., Чебуков С.Ю. Определение вращательного движения КА «Фотон М-2» по данным бортовых измерений угловой скорости. Космические исследования, 2008, т. 46, № 2, с. 148-167.

9. Бойзелинк Т., Ван Бавинхов К., Абрашкин В.И., Казакова А.Е., Сазонов В.В. Определение вращательного движения КА «Фотон М-3» по данным бортовых измерений магнитного поля Земли. Препринт ИПМ им. М.В.Келдыша РАН № 80, 2008, 31 с.

10. Бармин И.В., Сенченков А.С. Технологическое оборудование автоматического КА «Фотон» и некоторые результаты экспериментов. Известия Академии наук. Механика жидкости и газа, 1994, № 5, с. 37-45.

11. Бармин И.В., Волков М.В., Егоров А.В., Реут Э.Ф., Сенченков А.С. Результаты измерения ускорений технологических установок на борту космических аппаратов «Фотон». Космические исследования, 2001, т. 39, № 4, с. 407-418.

12. Сазонов В.В., Комаров М.М., Полежаев В.И., Никитин С.А., Ермаков М.К., Стажков В.М., Зыков С.Г., Рябуха С.Б., Асеведо Х., Либерман Е. Микроускорения на орбитальной станции "Мир" и оперативный анализ гравитационной чувствительности конвективных процессов тепло-массопереноса. Космические исследования, 1999, т. 37, № 1, с. 80-94.

13. Бойзелинк Т., Ван Бавинхов К., Сазонов В.В., Чебуков С.Ю. Анализ низкочастотной составляющей в измерениях микроускорения, выполненных на КА «Фотон М-2». Космические исследования, 46, № 5, с. 463-483.

14. Сазонов В.В. Обработка данных измерений угловой скорости и микроускорения, полученных на КА «Фотон-12». Препринт ИПМ им. М.В.Келдыша РАН № 62, 2008, 32 с.

15. Абрашкин В.И., Волков М.В., Воронов К.Е., Егоров А.В., Казакова А.Е., Панкратов В.А., Сазонов В.В., Семкин Н.Д. Определение вращательного движения КА по данным измерений его угловой скорости и напряжённости магнитного поля Земли с использованием кинематической модели движения. Космические исследования, 2005, т. 43, № 4, с. 295-305.

16. Абрашкин В.И., Богоявленский Н.Л., Воронов К.Е., Казакова А.Е., Панкратов В.А., Сазонов В.В., Семкин Н.Д., Стратилатов Н.Р. Определение вращательного движения КА «Фотон-М2» по данным измерений его угловой скорости и напряжённости магнитного поля Земли с использованием кинематической модели движения // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, № 60, 2006.

17. Беляев М.Ю., Ефимов Н.И., Сазонов В.В. Определение ориентации орбитального комплекса "Мир" по показаниям оптического звёздного датчика. Космические исследования, 1995, т. 33, № 4, с. 395-402.

18. Бабкин Е.В., Беляев М.Ю., Ефимов Н.И., Сазонов В.В., Стажков В.М.. Неуправляемое вращательное движение орбитальной станции Мир. Космические исследования, 2001, т. 39, № 1, с. 27-42.

19. Абрашкин В.И. Методы и средства повышения эффективности низкоорбитальной космической микрогравитационной платформы. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук, 2004.

References

1. Sazonov V.V., Chebukov S.Y., Abrashkin V.I., Kazakova A.E., Zaitsev A.S. Analysis of LF microaccelerations onboard Foton-11 satellite. Space research, 2001, vol. 39, №4, p. 419-435.

2. Abrashkin V.I., Chebukov S.Y., Kazakova A.E., Zaitsev A.S. Estimation of microaccelerations and angular motion of Foton spacecraft. VIII All-Russian Congress on Engineering and Applied Mechanics. Perm, 23-29 August, 2001. Paper abstracts p.19.

3. Abrashkin V.I., Balakin V.L., Belokonov I.V., Voronov K.E., Zaitsev A.S., Ivanov V.V., Kazakova A.E., Sazonov V.V., Semkin N.D. Uncontrolled angular motion of Foton-12 spacecraft and quasi-static loads onboard. Space research, 2003, vol. 41, №1, p. 45-56.

4. Sazonov V.V., Chebukov S.Y., Abrashkin V.I., Kazakova A.E., Zaitsev A.S. LF microaccelerations onboard Foton-11 satellite. Space research, 2004, vol. 42, №2? p. 185-200.

5. Abrashkin V.I., Volkov M.V., Egorov A.V., Zaitsev A.S., Kazakova A.E., Sazonov V.V. Analysis of LF component during angular velocity and microacceleration measuring onboard Foton-12 spacecraft. Space research, 2003, vol. 41, № 6, p. 632-651.

6. Abrashkin V.I., Bogoyavlensky N.L., Voronov K.E.,

Kazakova A.E., Puzin Y.Y., Sazonov V.V., Semkin N.D., Chebukov S.Y. Estimation of angular motion of Foton M-2 spacecraft according to onboard sensor measurements. IX All-Russian Congress on Engineering and Applied Mechanics. Nizhniy Novgorod, 22-28 August 2006. Paper abstracts, vol.1, p.8.

7. Abrashkin V.I., Bogoyavlensky N.L., Voronov K.E., Kazakova A.E., Puzin Y.Y., Sazonov V.V., Semkin N.D., Chebukov S.Y. Uncontrolled angular motion of Foton-M2 spacecraft and quasi-static loads onboard. Space research, 2007, vol. 45, №5, p. 450-470.

8. Abrashkin V.I., Kazakova A.E., Sazonov V.V., Chebukov S.Y. Estimation of angular motion of Foton M-2 spacecraft according to onboard measurements of angular velocity. Space research, 2008, vol. 46, № 2, p. 148-167.

9. Boyselink T., Van Bavinov K., Abrashkin V.I., Kazakova A.E., Sazonov V.V. Estimation of angular motion of Foton M-3 spacecraft according to onboard measurements of terrestrial magnetic field. Preprint IPM after Keldish M.V., RAS №80, 2008, p. 31.

10. Barmin I.V., Senchenkov A.S. Process equipment of unmanned Foton spacecraft and some experimental results. Izvestiya, Academy of Science. Fluid mechanics, 1994, №5, p. 37-45.

11. Barmin I.V., Volkov M.V., Egorov A.V., Reut A.F., Senchenkov A.S. Measurement of processing hardware accelerations onboard Foton spacecraft. Space research, 2001, vol. 39, № 4, p. 407-418.

12. Sazonov V.V., Komarov M.M., Polezhaev V.I., Nikitin S.A., Ermakov M.K., Stazhkov V.M., Zikov S.G., Ryabukha S.B., Asevedo H., Liebermann E. Microaccelerations at MIR orbital station and on-line gravitational susceptibility analysis of convective processes of

heat/mass transfer. Space research, 1999, vol. 37, № 1, p. 80-94.

13. Boyselink T., Van Bavinov K., Sazonov V.V., Chebukov S.Y. Analysis of LF component during microacceleration measurements onboard Foton M-2 spacecraft. Space research 46, № 5, p. 463-483.

14. Sazonov V.V. Processing of angular velocity and microacceleration measurements onboard Foton-12 spacecraft. Preprint IPM after Keldish M.V., RAS №62, 2008, p. 32.

15. Abrashkin V.I., Volkov M.V., Voronov K.E., Egorov A.V., Kazakova A.E., Pankratov V.A., Sazonov V.V., Semkin N.D. Estimation of spacecraft angular motion according to measurements of angular velocity and terrestrial magnetism intensity, based on kinematic motion model. Space research, 2005, vol. 43, № 4, p. 295-305.

16. Abrashkin V.I., Bogoyavlensky N.L., Voronov K.E., Kazakova A.E., Pankratov V.A., Sazonov V.V., Semkin N.D., Stratilatov N.R. Estimation of spacecraft angular motion according to measurements of angular velocity and terrestrial magnetism intensity, based on kinematic motion model. Preprint IPM after Keldish M.V., RAS №60, 2006.

17. Belyaev M.Y., Efimov N.I., Sazonov V.V. Attitude control of MIR orbital complex according to readings of optical star sensor. Space research, 1995, vol. 33, № 4, p. 395-402.

18. Babkin E.V., Belyaev M.Y., Efimov N.I., Sazonov V.V., Stazhkov V.M. Uncontrolled angular motion of MIR orbital station. Space research, 2001, vol. 39, № 1, p. 27-42.

19. Abrashkin V.I. Methods and tools enhancing performance of low-orbiting space microgravity platform. Candidate's thesis, 2004.

**METHODS OF MEASUREMENT AND CALCULATION OF
MICROACCELERATIONS ONBOARD OF LOW ORBIT SPACE
MICROGRAVITATIONAL PLATFORM**

© 2010 V.I.Abrashkin¹, A.E.Kazakova¹, V.V. Sazonov²

¹ SRP SRC "TSSKB-PROGRESS", Samara

² Institute of applied mathematics of the Russian Academy of Sciences, Moscow

The given work contains some results connected with processing of measurements and definition of rotary movement of last four SC "Foton" series and calculation of onboard quasi-static micro accelerations. Special methods are developed for the decision of these problems as well as software for after-flight processing of received data and measurements.

Microaccelerations, low-orbiting space microgravitational platform, terrestrial magnetic field, kinematic motion model of spacecraft

Информация об авторах

Абрашкин Валерий Иванович, Государственный научно-производственный ракетно-космический центр "ЦСКБ - Прогресс", кандидат технических наук, заместитель начальника отделения – начальник отдела. E-mail: csdb@samtel.ru. Область научных интересов: проектирование автоматических космических аппаратов народнохозяйственного и научного назначения.

Казакова Анфиса Егоровна, до 2009 г. Государственный научно-производственный ракетно-космический центр "ЦСКБ - Прогресс", кандидат технических наук, начальник сектора. Область научных интересов: проектирование автоматических космических аппаратов народнохозяйственного и научного назначения.

Сазонов Виктор Васильевич, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник института. E-mail: sazonov@spp.keldish.ru. Область научных интересов: методическое обеспечение и расчёт параметров орбитального движения КА.

Abrashkin Valery Ivanovich, Samara Space Centre TsSKB-Progress, Candidate of science, Deputy Division Head – Department Head. e-mail: csdb@samtel.ru, works in design of unmanned spacecraft for civil and research applications.

Kazakova Anfisa Egorovna, Samara Space Centre TsSKB-Progress, Candidate of Engineering, Head of Department up to 2009, works in the field of development of unmanned spacecraft for national economic and research applications.

Sazonov Viktor Vasilevich, Institute of Applied Mathematics after M.V. Keldish of RAS, Doctor of Physics and Mathematics, senior scientific associate, E-mail: sazonov@spp.keldish.ru, works in the field of methodology and estimation of spacecraft orbital motion.