

Методика исследования колебаний оси визирования при наблюдениях земной поверхности с борта Российского сегмента Международной космической станции

© Р.А. Евдокимов, В.Ю. Тугаенко, А.В. Смирнов

ПАО «РКК «Энергия», Московская обл., г. Королёв, 141070, Россия

Предложена методика определения характеристик долгопериодических колебаний конструкции Международной космической станции посредством анализа смещения оси визирования научной аппаратуры относительно расчетного положения при наблюдениях земной поверхности с борта Российского сегмента станции. Методика позволяет выявить долгопериодические колебания на фоне шума, обусловленного высокочастотными колебаниями и ошибками измерений, а также долговременных трендов, связанных с изменением ориентации станции. Работа выполнена в рамках реализации первого этапа космического эксперимента «Пеликан» по отработке технологии беспроводной передачи энергии в космосе. Полученные результаты измерений, выполненные в сеансах эксперимента, позволили определить максимальные значения амплитуд и угловых скоростей смещения оси визирования в целях уточнения требований к системе наведения научной аппаратуры, используемой на последующих этапах эксперимента.

Ключевые слова: космический эксперимент, беспроводная передача энергии, система наведения, колебания, временной ряд, гармонический анализ

Введение. В долговременную программу исследований и экспериментов на Российском сегменте (РС) Международной космической станции (МКС) включен космический эксперимент (КЭ) «Пеликан» («Исследование передачи электрической энергии лазерным излучением между космическими аппаратами») [1, 2]. Планируется поэтапная отработка технологии дистанционной передачи энергии в космосе [1–4] с размещением на РС МКС источника, а на транспортном грузовом корабле (ТГК) «Прогресс» — приемника излучения. Сеансы эксперимента будут проводиться после расстыковки корабля и станции, на этапе увода корабля и во время специально организованных повторных пролетов.

Одной из наиболее сложных задач, решаемых при создании научной аппаратуры (НА) для КЭ «Пеликан», является разработка системы наведения узкого пучка излучения на малогабаритный приемник [5]. Допустимая величина отклонения продольной оси пучка от направления на центр приемника — не более $5,0 \cdot 10^{-5}$ рад. Для уточнения требований к данной системе был проведен первый этап эксперимента, в котором изучалась составляющая относительного движения корабля и станции, связанная с колебаниями МКС. Иссле-

довались параметры (амплитуда, угловая скорость) колебаний оси визирования научной аппаратуры «Фотоспектральная система» (ФСС) при наблюдениях земной поверхности через иллюминатор станции.

Цель настоящей статьи заключается, во-первых, в обосновании проведения эксперимента, так как имеющиеся данные о динамике конструкции МКС [6], полученные математическим моделированием и экспериментальным путем (по данным с датчиков угловых скоростей), не позволяют непосредственно перейти от моделей к характеристикам движения оптической оси конкретной научной аппаратуры, во-вторых, в представлении методики обработки данных.

Методика проведения эксперимента. При съемке земной поверхности в надир с борта РС МКС при отсутствии смещений оптической оси фотографической аппаратуры центры снимков должны попадать непосредственно на трассу, совпадая с ее точками в моменты получения изображений. Измеряя отклонения координат центров снимков от координат соответствующих точек трассы МКС, можно получить данные о смещениях оси визирования аппаратуры. Мерой отклонения является расстояние L между подспутниковой точкой и геометрическим центром снимка, полученного в момент времени t (рис. 1). Для вычисления L используются формулы Винценти и модели земного эллипсоида. При малых расстояниях между точками допустимо использование формулы гаверсинусов для модели сфероида [7]:

$$L = R\Delta\sigma; \quad (1)$$

$$\Delta\sigma = \arctg \left(\frac{\sqrt{(\cos\varphi_2 \sin\Delta\lambda)^2 + (\cos\varphi_1 \sin\varphi_2 - \sin\varphi_1 \cos\varphi_2 \cos\Delta\lambda)^2}}{\sin\varphi_1 \sin\varphi_2 + \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 \cos\Delta\lambda} \right).$$

Здесь R — средний радиус Земли, км (6371,1 км); φ_1, φ_2 — значения широты подспутниковой точки РС МКС и центра снимка; $\Delta\lambda$ — разность долготы подспутниковой точки РС МКС и центра снимка, град, $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$.

На рис. 1 показан общий случай: оптическая ось фотографической аппаратуры отклонена от надира на постоянный угол (присутствует систематическая составляющая смещения оси визирования, перпендикулярная трассе).

Для выполнения первого этапа КЭ «Пеликан» использовалась НА ФСС, доставленная на станцию в рамках КЭ «Ураган». Съемка велась через иллюминатор № 9 служебного модуля РС МКС с применением установочного кронштейна. Иллюминатор имеет диаметр

426 мм, его оптическая ось направлена в надир при ориентации МКС в орбитальной системе координат (ОСК). Применялся фотоаппарат Nikon D3S с фокусным расстоянием 400 мм в составе ФСС.

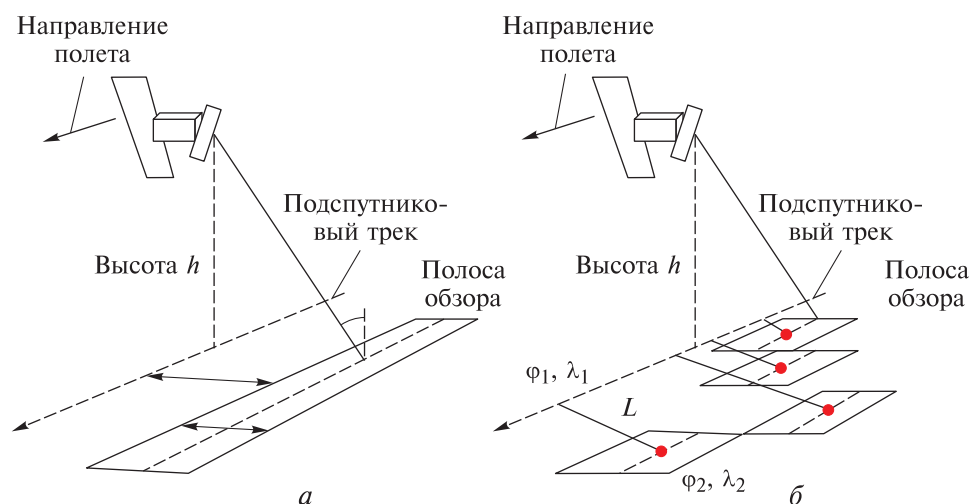


Рис. 1. Подспутниковый трек (трасса) космического аппарата:
a — идеальный; *б* — в присутствии колебаний оси визирования

Выбор районов съемки диктовался необходимостью получения больших (не менее 15–20 снимков), непрерывных серий качественных изображений земной поверхности, для которых возможна точная географическая привязка (присутствуют береговая линия, озера, острова, хорошо заметные из космоса искусственные сооружения). Учитывались ограничения по метеоусловиям и условиям освещенности в районах наблюдения. Перед съемкой выполнялись контроль и корректировка времени фотоаппарата по бортовым часам, настройка оборудования для автоматической интервальной съемки. Устанавливались время запуска съемки, длительность интервала Δt , количество интервалов и снимков в интервале (один снимок). Для НА ФСС минимально возможный интервал равен 1 с. С учетом большой трудоемкости процедуры географической привязки снимков использовался интервал $\Delta t = 3$ с.

Всего выполнено семь сеансов эксперимента. Предварительный анализ результатов позволил выделить восемь серий снимков, пригодных для дальнейшего исследования. Длительность серий находилась в диапазоне от 1 до 4 мин, что соответствует продолжительности сеансов беспроводной передачи энергии на последующих этапах КЭ. Ввиду сложности географической привязки исследованы наиболее качественные серии (всего три), полученные в сеансах 13 декабря 2016 г. (18 снимков, Северо-Западная Африка), 16 декабря 2016 г.

(61 снимок, Южная Америка) и 3 января 2017 г. (51 снимок, Северная Америка). Для оценки точности географической привязки для части изображений она выполнялась двумя различными методами. Оба метода основаны на сопоставлении снимка с ортофотопланом или картой путем поиска на них общих опорных точек. В первом методе используется алгоритм тонкостенного сплайна, допускающий наличие местных деформаций, что наиболее точно соответствует реальным неровностям рельефа подстилающей поверхности. В основе второго, так называемого ангармонического метода лежит процедура поиска координат произвольной точки снимка на плане по координатам четырех общих опорных точек. С помощью второго метода выполнена привязка 40 снимков, полученных 13 декабря 2016 г. и 3 января 2017 г. Разница в определении географических координат двумя методами составляет $0,0001 \dots 0,0005$ град, что соответствует $\sim 10 \dots 50$ м. Эта величина дает оценку точности привязки сверху, так как является результатом сложения погрешностей двух методов. Максимальную точность алгоритма тонкостенного сплайна (основного метода привязки изображений) можно оценить независимо, используя соотношения:

$$\text{GSI} = \frac{h}{f} w; \quad (2)$$

$$w = \frac{l}{n_d}. \quad (3)$$

Здесь GSI — наземный интервал дискретизации, м; h — высота орбиты МКС, км; f — фокусное расстояние объектива, м; w — ширина детекторного элемента, м; l — линейный размер приемника излучения, м; n_d — число детекторов приемника.

Для НА ФСС при высоте орбиты МКС $h = 400$ км расчет по формулам (2)–(3) дает значение $\text{GSI} \approx 8,1$ м. Эта оценка в совокупности со сравнением с результатами привязки по ангармоническому методу позволяет принять значение погрешности используемого метода привязки равным $\pm 10 \dots 20$ м.

Для каждой серии снимков, после того как была выполнена процедура географической привязки, были получены выборки временных рядов $\varphi_1(t)$, $\lambda_1(t)$, $\varphi_2(t)$, $\lambda_2(t)$, позволяющие найти с помощью (1) временную выборку $L(t)$ для дискретных моментов времени с шагом Δt .

Методика обработки результатов эксперимента. В полученных выборках временных рядов $L(t)$ может содержаться следующая информация:

– временной тренд (за исследуемый промежуток времени, т. е. за время получения серии снимков T_c), включающий также величину систематического смещения оси визирования L_c в виде константы;

– гармонические колебания на определенных частотах (тригонометрическая составляющая);

– случайный шум.

Цель первого этапа КЭ «Пеликан» состояла в уточнении требований к системе наведения научной аппаратуры, что может быть достигнуто без детального исследования физических причин смещений оси визирования. Тем не менее могут быть сделаны общие замечания о возможной физической природе перечисленных составляющих движения.

Временной тренд (за вычетом систематического смещения) может быть обусловлен как программными разворотами МКС, так и изменением ориентации станции в пределах допустимой погрешности (± 10 угловых минут), а также присутствием долгопериодических колебаний конструкции МКС, период которых превосходит время T_c .

Тригонометрическая составляющая представляет собой сумму гармонических колебаний, которые могут быть выявлены в данном эксперименте. Это колебания с периодами продолжительнее удвоенного интервала съемки (т. е. 6 с), но не более T_c для каждого сеанса. Они могут быть обусловлены колебаниями самой конструкции МКС.

Случайный шум, остающийся после вычитания из выборки временного ряда тренда и тригонометрической составляющей, включает не только случайные погрешности измерений (источники которых перечислены ниже), но и сумму всех колебаний и вибраций конструкции с периодами короче 6 с. Кроме того, в высокочастотные колебания вносят свой вклад колебания кронштейна НА ФСС. Принимая во внимание большое число мод колебаний и их источников, можно предположить, что случайный шум будет иметь свойства, близкие к белому шуму.

Методика исследования указанных составляющих, разработанная на базе известных методов анализа временных рядов [8–12], включает следующие этапы.

1. Выделение временного тренда для исследуемой составляющей $L(t)$ регрессионными методами с вычислением индексов детерминации R_t^2 и проверкой значимости полученной регрессии с помощью F -критерия; выделение постоянного смещения $L(t)$ — константы L_c в уравнении тренда.

2. Гармонический анализ (с использованием преобразований Фурье) каждой из составляющих $L(t)$ после вычета трендов с целью поиска гармонических колебаний с периодом свыше 6 с. Анализ амплитудно-частотных характеристик и периодограмм с целью проверки статистической значимости результатов по критерию Пирсона.

3. Проверка качества предложенной модели путем анализа остатка (разности выборки временного ряда $L(t)$ и суммы тренда и гармо-

нических колебаний) статистическими методами. Проверка близости свойств остатка к свойствам белого шума.

4. Сравнение результатов для различных сеансов.

С точки зрения анализа возможных причин и характера смещений оси визирования удобно разложить общее смещение $L(t)$ на продольную и поперечную составляющие: проекцию $L(t)$ на трассу МКС — $L_{\parallel}(t)$ и перпендикулярную трассе проекцию — $L_{\perp}(t)$.

При построении трендов выборок временных рядов использовались различные модели (линейные, полиномиальные, логарифмические). Для каждой модели вычислялось значение индекса детерминации R_t^2 . Выбор выполнялся по критерию максимума его приведенного значения:

$$\hat{R}_t^2 = 1 - \frac{n-1}{m-1} (1 - R_t^2), \quad (4)$$

где n — количество точек в выборке (количество обработанных снимков в серии); m — количество коэффициентов регрессии.

Проверка полученной зависимости на значимость выполнялась с помощью F -критерия:

$$F = \frac{R_t^2}{1 - R_t^2} \frac{n - k - 1}{k}, \quad (5)$$

где k — число коэффициентов в уравнении тренда при t .

Уравнение регрессии является значимым с уровнем α , если выполняется неравенство

$$F > F_{1-\alpha; k; n-k-1}, \quad (6)$$

где $F_{1-\alpha; k; n-k-1}$ — квантиль распределения.

Гармонический анализ предполагает использование преобразования Фурье для разложения выборки временного ряда по гармоникам [10–12]. Для дискретных временных рядов справедливо следующее представление исследуемой величины:

$$L(t_i) = A_0 + \sum_{k=1}^{N_{garm}} A_k \cos(t_i k \omega_1 + \varphi_k); \quad (7)$$

$$N_{garm} = \text{int}((n - 1)/2);$$

$$\omega_1 = 2\pi/T_c;$$

$$T_c = (n - 1)\Delta t.$$

Здесь $L(t_i)$ — значение в момент времени t_i величины $L(t)$; A_0 — нулевая амплитуда (появляется, если в рядах данных не полностью уstra-

нено систематическое смещение после регрессионного анализа); N_{garm} — номер наивысшей гармоники; n — количество точек в выборке временного ряда; A_k — амплитуда k -й гармоники; φ_k — фаза k -й гармоники; ω_1 — циклическая частота первой гармоники.

Период колебаний, соответствующий k -й гармонике, определяют по формуле

$$T_k = T_0/k.$$

После вычисления амплитуд и фаз гармоник в (7) может быть построена амплитудно-частотная характеристика. Ее анализ позволяет выдвинуть гипотезу о наличии в составе временного ряда тригонометрической составляющей, содержащей гармоники с определенными номерами k . Данная гипотеза должна быть проверена по критерию Пирсона с использованием периодограммы — графика зависимости мощности сигнала (величины, пропорциональной квадрату амплитуды) от номера гармоники (частоты). Для выполнения данного анализа удобно использовать нормированную величину «мощности» сигнала, соответствующую k -й гармонике:

$$P_k = \frac{2A_k A_k}{P_{cp}}; \quad (8)$$

$$P_{cp} = \frac{1}{N_{garm}} \sum_{k=1}^{N_{garm}} A_k A_k.$$

Здесь P_{cp} — среднее значение мощности.

Нормированное по формуле (8) значение мощности можно непосредственно сравнивать со значениями распределения с двумя степенями свободы, соответствующими выбранным значениям уровня значимости (достоверности). Рекомендуемые уровни значимости $\alpha = 0,05; 0,01$ (что соответствует достоверности 95 и 99 %) и выше. Если полученное значение P_k превышает соответствующую величину распределения χ^2 , то гипотеза о наличии гармонических колебаний на данной частоте принимается с выбранным уровнем значимости.

После выделения тренда и поиска гармонических колебаний выполняется проверка качества разработанной модели для исследуемой серии изображений. Поэтому необходимо вычесть из имеющейся выборки временного ряда полученный тренд и гармонические колебания. Если тренд и тригонометрическая составляющая выделены верно, то ряд остатков e_i должен обладать следующими свойствами:

- математическое ожидание ряда остатков должно быть равно нулю;
- ряд остатков должен представлять собой набор случайных величин;

– между членами ряда остатков должна отсутствовать автокорреляция.

Для проверки гипотезы о равенстве нулю математического ожидания ряда остатков вычисляются его оценка и величина s_e :

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i; \quad (9)$$

$$s_e = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2 \right]^{1/2}. \quad (10)$$

Если гипотеза о равенстве нулю математического ожидания ряда остатков справедлива, то величина T_e , определяемая выражением

$$T_e = \frac{\bar{e}}{s_e} \sqrt{n}, \quad (11)$$

должна подчиняться распределению Стьюдента с $n-1$ степенями свободы.

Тогда для соблюдения условия справедливости гипотезы с уровнем значимости α величина T_e должна попадать в следующий интервал значений квантиля распределения Стьюдента:

$$-t(1-\alpha, n-1) < T_e < t(1-\alpha, n-1). \quad (12)$$

Если условие (12) нарушается, гипотеза отвергается с уровнем значимости α , что означает необходимость уточнения уравнения тренда.

Для проверки условия случайности ряда остатков используется критерий поворотных точек [8]. Точка называется поворотной, если значение остатка в ней меньше либо больше двух соседних. Ряд остатков можно считать случайным, если справедливо неравенство

$$n_p > \text{int} \left[\frac{2}{3}(n-2) - 1,96 \sqrt{\frac{16n-29}{90}} \right]. \quad (13)$$

Для определения наличия либо отсутствия автокорреляции между соседними членами ряда остатков применялся тест Дарби — Уотсона [8]. Если соблюдаются все три рассмотренных выше условия, то можно считать, что свойства остатка близки к белому шуму.

Для дополнительной проверки близости остатка к белому шуму вычислялись выборочные коэффициенты автокорреляции с построением коррелограммы (зависимости значений коэффициентов $\rho(l)$ от величины лага l) [8, 9]. Для сигнала, близкого к белому шуму, коэффициент автокорреляции $\rho(0) \approx 1$, остальные — близки к нулю.

Анализ систематических и случайных погрешностей. К источникам систематических погрешностей определения $L(t)$ относятся:

- отклонение ориентации МКС от орбитальной системы координат (ОСК) в момент начала сеанса съемки;
- отклонение установки кронштейна НА ФСС относительно нормали к иллюминатору;
- расхождение между моментами времени съемки земной поверхности и моментами, для которых вычисляются параметры орбиты МКС (например, вследствие неточности синхронизации таймера НА ФСС с бортовым временем станции);
- погрешность расчета координат точек трассы МКС по данным радиоконтроля орбиты (РКО);
- использование приближенного соотношения (1) для расчета расстояний между двумя точками на поверхности Земли;
- расстояние между зоной установки НА ФСС и центром масс МКС (т. е. отсутствие учета конечных размеров станции).

Указанные факторы могут приводить к большим систематическим погрешностям в определении $L(t)$ — вплоть до сотен километров. Но они учитываются на первом этапе регрессионного анализа.

К источникам случайных погрешностей относятся:

- отклонения формы земного геоида от модельного эллипсоида;
- случайные отклонения реальных моментов получения изображений с помощью НА ФСС от моментов, фиксированных таймером;
- ошибки географической привязки центров изображений.

Отклонение поверхности геоида от модельного эллипсоида на малых расстояниях связано с разностью высот поверхности, которая оказывает незначительное влияние на величину расстояния между двумя точками. Так, при расстоянии между двумя точками, равном 50 000 м, разность высот в 200 м приводит к погрешности не более 0,4 м.

Погрешность, обусловленная случайными отклонениями моментов съемки, зависит от времени срабатывания затвора фотоаппарата (0,00025 с) и отклонений от заданных значений времени экспозиции (0,00025...0,001 с). Случайная погрешность определения моментов съемки не более 0,001 с, поэтому смещение вдоль трассы МКС составляет не более ± 8 м. Таким образом, величина случайной погрешности $L(t)$ определяется точностью географической привязки изображений и составляет $\pm 10...20$ м.

Результаты исследований движения оси визирования в рамках сеансов космического эксперимента «Пеликан». Соотношения (1)–(13) были использованы при анализе серий изображений, полученных в сеансах космического эксперимента. Для всех трех проанализированных серий изображений выявлены тренды поперечной составляющей величины $L(t)$. Для серии, выполненной в сеансе

13 декабря 2016 г., присутствует также тренд продольной компоненты. В частности, для серии снимков, полученных в сеансе 3 января 2017 г., выявлен тренд поперечной компоненты $L(t)$: $L_{\perp}(t) = 1,0437t + 8964,73$ м (с индексом детерминации $R_t^2 = 0,5656$). Тренд продольной составляющей не выявлен, но имеется большое систематическое смещение $L_{\text{ПС}} = 58004$ м. Такое большое смещение, вероятно, обусловлено систематическими расхождениями между моментами съемки поверхности и расчета точек трассы МКС. Эти смещения легко устранимы из модели. Ниже, помимо линейных величин, представлены угловые значения отклонений оси визирования:

$$\alpha_V(t) = \arctg\left(\frac{L(t)}{h}\right).$$

Максимальное смещение, обусловленное трендовой составляющей (без систематической константы), наблюдалось для серии снимков, полученных 13 декабря 2016 г.: смещение в поперечном относительно трассы направлении составило $\approx 5,55'$, средняя угловая скорость смещения $\approx 0,1'/\text{с}$, максимальная $\approx 0,29'/\text{с}$.

Анализ смещений оптической оси, остающихся после вычета тренда, указывает на их физическую природу, так как амплитуды колебаний оси визирования (± 400 м) значительно превышают оценку погрешности определения $L(t)$. Гармонические колебания оси визирования НА ФСС (см. таблицу) выявлены с достоверностью более 95 % для двух серий снимков. Мода с периодом около 9 с найдена для обеих серий. Колебания наблюдаются как для продольной, так и для поперечной составляющей $L(t)$, но амплитуда значительно выше для продольной компоненты. Зависимости амплитуды продольной составляющей $L(t)$ от номера гармоники для одного из временных рядов приведена на рис. 2, а, периодограмма продольной составляющей смещения оси визирования — на рис. 2, б.

Для всех изученных временных рядов амплитуды отдельных мод гармонических колебаний не превышают $1'$, максимальная связанная с ними скорость смещения оси визирования — $0,78'/\text{с}$.

В работе [6] на основании результатов математического моделирования и измерений датчиков угловых скоростей приводятся сведения о модах колебаний конструкции МКС. В частности, приведены данные о наличии мод с периодами около 10 и 3,96 с. Следует отметить, что с учетом дискретности исследуемых временных рядов первое значение достаточно близко к приведенным в таблице периодам, составляющим около 9 с, удвоенное значение второй величины дает период, близкий к 7,83 с.

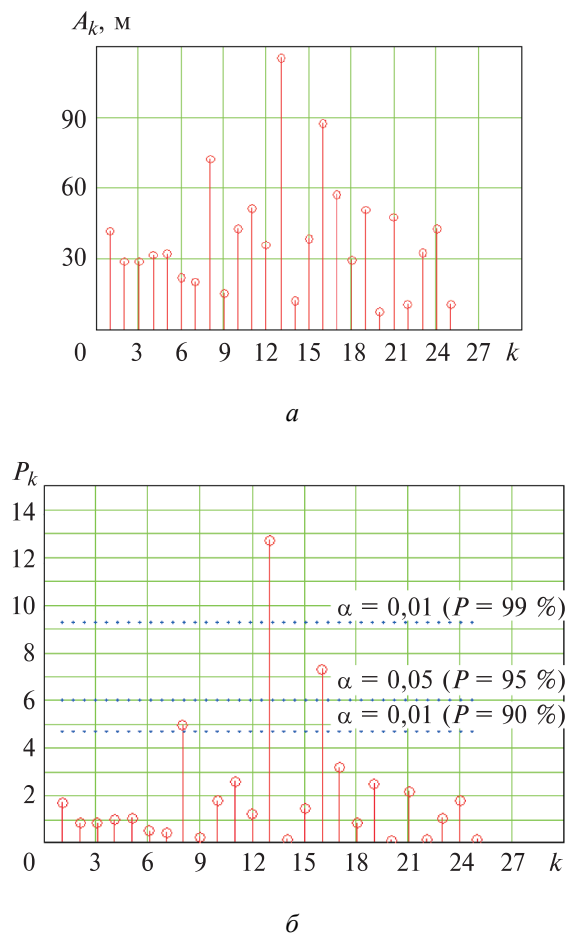


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика и периодограмма для выборки временного ряда, полученного по результатам съемки 03.01.2017 г.:

a — зависимость амплитуды A_k продольной составляющей смещения оси визирования от номера гармоники в разложении в ряд Фурье; *б* — периодограмма продольной составляющей смещения оси визирования для разложения в ряд Фурье

Свойства выявленных гармонических колебаний оси визирования НА ФСС

Дата сеанса съемки	Периоды выявленных гармоник, с	Амплитуды выявленных гармоник	
		A_k , м	$\alpha_V(t)$, угл. мин
03.01.2017	9,38	90,0	0,774
	11,54	117,9	1,013
16.12.2016	7,83	113,0	0,971
	9,0	76,3	0,656
	20,0	79,2	0,681

Однако максимальные значения величины $L(t)$ связаны со случайным остатком (шумом), который обусловлен колебаниями и вибрациями конструкции МКС (и, частично, кронштейна ФСС) с частотой более 0,17 Гц (периодами короче 6 с). Как показал статистический анализ, для достигнутого временного разрешения свойства случайного остатка близки к свойствам белого шума, что указывает на наличие большого количества мод колебаний (и находится в соответствии с данными работы [6]). Угловые отклонения, связанные со случайным остатком, могут достигать $\approx \pm 3,3'$ в продольном и $\approx \pm 0,7'$ в поперечном относительно трассы МКС направлении. Максимальная средняя скорость движения оси визирования, которая в этом случае может быть оценена как отношение максимального изменения положения оси за заданный, трехсекундный интервал времени, составляет $\approx 1,5'/с$. Отметим, что колебания кронштейна ФСС не могут вносить доминирующий вклад в случайный остаток. Принимая во внимание конструкции кронштейна и его крепления к иллюминатору (ориентирован вдоль продольной оси РС МКС), следует ожидать большей амплитуды для поперечной составляющей $L(t)$. Но по результатам эксперимента амплитуда продольной составляющей больше, чем поперечной (до 380 и до 80 м). Кроме того, собственные частоты кронштейна составляют сотни герц. С учетом всех компонент движения оси визирования максимальная величина смещения составила не более $15'$ (включая удвоенные амплитуды колебаний и тренд), скорость — не более $3'/с$. Среднеквадратическое отклонение центров снимков от точек трассы для трех серий изображений составляет около 125, 160 и 265 м. Соответственно, применение правила 3σ позволяет ограничить амплитуду возможных колебаний величиной ± 800 м или $\pm 7'$. В зависимости от тренда и максимально возможного полного смещения, связанного с колебаниями всех частот, наибольшее смещение оси визирования составит $\approx 22'$. Эта оценка позволяет частично компенсировать относительно малую статистику, обусловленную трудоемкостью обработки изображений.

Заключение. Несмотря на относительную простоту и наличие большого числа источников систематических и случайных погрешностей, предложенная методика исследования движения оси визирования позволяет выделить смещения, обусловленные физическими причинами — изменениями ориентации МКС, колебаниями и вибрациями конструкции станции.

В результате обработки серий изображений, полученных в сеансах первого этапа КЭ «Пеликан» с помощью научной аппаратуры ФСС, были выделены смещения оси визирования, значимые с точки зрения проведения эксперимента по беспроводной передаче энергии на следующих этапах КЭ. Максимальная величина смещения оси

визирования за характерное время 1...4 мин составило 15...22', требуемая точность наведения излучателя НА «Пеликан» на приемник составляет 10''. Найденная скорость смещения — не более 3'/с. Таким образом, полученные оценки параметров движения оси визирования позволили уточнить требования к системе наведения НА «Пеликан».

При условии повышения временного разрешения и объема временных выборок разработанная методика может быть использована в других КЭ, в частности для исследования динамики конструкции МКС.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Chertok B.E., Evdokimov R.A., Legostaev V.P., Lopota V.A., Sokolov B.A., Tugaenko V.Yu. Remote Electric Power Transfer Between Spacecrafts by Infrared Beamed Energy. *AIP Conference Proceedings*, 2011, vol. 1402 (1), pp. 489–496. DOI: 10.1063/1.3657057
- [2] Kapranov V.A., Evdokimov R.A., Matsak I.S., Tugaenko V.Yu. Demonstration of ISS based IR WPT system and capabilities of atmospheric researches. *Proceedings of the 64th International Astronautical Congress*, Beijing, China, 2013, vol. 9, pp. 6661–6663.
- [3] Грибков А.С., Евдокимов Р.А., Синявский В.В., Соколов Б.А., Тугаенко В.Ю. Перспективы использования беспроводной передачи электрической энергии в космических транспортных системах. *Известия РАН. Энергетика*, 2009, № 10, с. 118–123.
- [4] Евдокимов Р.А., Корнилов В.А., Лобыкин А.А., Тугаенко В.Ю. Космическая технологическая система с дистанционным энергоснабжением по лазерному каналу. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2018, № 9, с. 82–92.
- [5] Matsak I.S., Kapranov V.A., Tugaenko V.Yu., Suhareva N.A. Super narrow beam shaping system for remote power supply at long atmospheric path. *Proc. SPIE*, 2017, p. 100900U. DOI: 10.1117/12.2250752
- [6] Прутько А.А., Сумароков А.В. Использование спектральных методов для анализа собственных частот колебаний конструкции МКС и амплитуды шумов измерителя угловой скорости. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2018, № 4 (121), с. 59–68. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-4-59-68
- [7] Korn G.A., Korn T.M. *Mathematical handbook for scientists and engineers: Definitions, theorems, and formulas for reference and review*. Mineola, New York, USA, Dover Publications, Inc., 2000, 1152 p.
- [8] Кобзарь А.И. *Прикладная математическая статистика*. Москва, Физматлит, 2006, 816 с.
- [9] Боровков А.А. *Математическая статистика*. Москва, Физматлит, 2007, 704 с.
- [10] Эдвардс Р. *Ряды Фурье в современном изложении*. В 2 т. Москва, Мир, 1985, т. 1. 264 с.; т. 2. 400 с.
- [11] Бендат Дж., Пирсол А. *Прикладной анализ случайных данных*. Москва, Мир, 1989, 500 с.
- [12] Айвазян С.А., Мхитарян В.С. *Прикладная статистика и основы эконометрики*. Москва, ЮНИТИ, 1998, 650 с.

Статья поступила в редакцию 23.03.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Евдокимов Р.А., Тугаенко В.Ю., Смирнов А.В. Методика исследования колебаний оси визирования при наблюдениях земной поверхности с борта Российского сегмента Международной космической станции. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 10. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-10-2024>

Евдокимов Роман Александрович — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник ПАО «РКК «Энергия», специалист в области проектирования и конструкции космических аппаратов, системного анализа.
e-mail: evdokimovrom@yandex.ru; Roman.Evdokimov@rsce.ru

Тугаенко Вячеслав Юрьевич — д-р техн. наук, начальник отдела ПАО «РКК «Энергия», специалист в области проектирования и конструкции космических аппаратов. e-mail: Vjatcheslav.Tugaenko@rsce.ru

Смирнов Алексей Викторович — ведущий инженер-математик ПАО «РКК «Энергия», специалист в области космической баллистики.
e-mail: Alexey.Smirnov@rsce.ru

Methods of studying sighting axis oscillations when observing the Earth's surface from the Russian segment of the International Space Station

© R.A. Evdokimov, V.Yu. Tugaenko, A.V. Smirnov

S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia,
Korolyov, Moscow Region, 141070, Russia

The study introduces a method for determining the characteristics of long-period oscillations of the International Space Station structure by analyzing the displacement of the sighting axis of scientific equipment relative to the calculated position when observing the Earth's surface from the Russian segment. The technique makes it possible to identify long-term oscillations through noise caused by high-frequency oscillations and measurement errors, as well as long-term trends associated with a change in the orientation of the station. The work was carried out as part of the first stage of the Pelican space experiment to develop the technology of wireless energy transmission in space. After processing the measurement results performed in the experiment sessions, it was possible to determine the maximum values of the amplitudes and angular velocities of the displacement of the sighting axis in order to clarify the requirements for the guidance system of scientific equipment used in the subsequent stages of the experiment.

Keywords: *space experiment, wireless power transmission, guidance system, oscillations, time series, harmonic analysis*

REFERENCES

- [1] Chertok B.E., Evdokimov R.A., Legostaev V.P., Lopota V.A., Sokolov B.A., Tugaenko V.Yu. Remote Electric Power Transfer between Spacecrafts by Infrared Beamed Energy. *AIP Conference Proceedings*, 2011, vol. 1402 (1), pp. 489–496. DOI: 10.1063/1.3657057
- [2] Kapranov V.A., Evdokimov R.A., Matsak I.S., Tugaenko V.Yu. Demonstration of ISS-based IR WPT system and capabilities of atmospheric researches. *Proceedings of the 64th International Astronautical Congress*, Beijing, China, 2013, vol. 9, pp. 6661–6663.
- [3] Gribkov A.S., Evdokimov R.A., Sinyavskiy V.V., Sokolov B.A., Tugaenko V.Yu. *Izvestiya RAN. Energetika (Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy)*, 2009, no. 10, pp. 118–123.
- [4] Evdokimov R.A., Kornilov V.A., Lobykin A.A., Tugaenko V.Yu. *Poverkhnost. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya — Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2018, no. 9, pp. 82–92.
- [5] Matsak I.S., Kapranov V.A., Tugaenko V.Yu., Suhareva N.A. Super narrow beam shaping system for remote power supply at long atmospheric path. *Proc. SPIE*, 2017, p. 100900U. DOI: 10.1117/12.2250752
- [6] Prutko A.A., Sumarokov A.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2018, no. 4 (121), pp. 59–68. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-4-59-68
- [7] Korn G.A., Korn T.M. *Mathematical handbook for scientists and engineers: Definitions, theorems, and formulas for reference and review*. Mineola, New York, USA, Dover Publications, Inc., 2000, 1152 p.

- [8] Kobzar A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika* [Applied mathematical statistics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006, 816 p.
- [9] Borovkov A.A. *Matematicheskaya statistika* [Mathematical statistics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007, 704 p.
- [10] Edwards R.E. *Fourier Series: a Modern Introduction*. Holt Rinehart & Winston Publ., 208 p. [In Russ.: Edwards R.E. Ryady Fure v sovremennom izlozhenii. V 2 tomakh. Moscow, Mir Publ., 1985].
- [11] Bendat J.S., Piersol A.G. *Random data: analysis and measurement procedures*. Wiley, 4th ed., 640 p. [In Russ.: Bendat J.S., Piersol A.G. Prikladnoy analiz sluchaynykh dannykh. Moscow, Mir Publ., 1989, 500 p.].
- [12] Aivazyan S.A., Mkhitaryan V.S. *Prikladnaya statistika i osnovy ekonometriki* [Applied statistics and foundations of econometrics]. Moscow, UNITY Publ., 1998, 650 p.

Evdokimov R.A., Dr. Sc. (Eng.), Lead Research Fellow, S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, specialist in the field of design and construction of spacecraft, systems analysis. e-mail: evdokimovrom@yandex.ru; Roman.Evdokimov@rsce.ru

Tugaenko V.Yu., Dr. Sc. (Eng.), Head of the Department, S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, specialist in the field of design and construction of spacecraft. e-mail: Vjatcheslav.Tugaenko@rsce.ru

Smirnov A.V., Engineer-Mathematician, S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, specialist in the field of design and construction of spacecraft. e-mail: Alexey.Smirnov@rsce.ru