

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВОРОТОВ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА. ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ

В. А. ОВЧАРЕНКО<sup>1</sup>, А. В. ПИЛЕЦКИЙ<sup>2</sup>, С. Г. БУРЛУЦКИЙ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>АО „КБ „Арсенал“, 195009, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: vaovcharenko@mail.ru

<sup>2</sup>ОАО „МЗ „Арсенал“, 195009, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,  
190000, Санкт-Петербург, Россия

Выполнена проверка на адекватность математической модели, одновременно показывающей влияние основных баллистических параметров полета искусственного спутника Земли на углы ориентации его солнечных батарей.

**Ключевые слова:** параметры полета, панели солнечных батарей, ориентация, адекватность

Космические аппараты (КА) применяют разные способы зондирования Земли с высоты рабочей орбиты (видеосъемка, инфракрасная съемка, радиолокация и т.д.). При зондировании используется различная аппаратура, в разных сочетаниях размещаемая как внутри КА, так и на его внешней поверхности. Размещаемая внутри КА аппаратура должна отвечать задачам центровки, теплосъема, обеспечения эргономичности и т.д. Аппаратура, размещаемая снаружи, определяет и внешний облик КА, необходимо оптимально ее разместить, соблюдая условие определенной ориентации КА в процессе целевого функционирования. Эта особенность внешней аппаратуры требует от проектировщиков КА выбирать место размещения внешнего оборудования так, чтобы в максимальной степени достичь целевых характеристик, т.е. высоких частных показателей эффективности бортовых систем при их максимальной надежности. К аппаратуре, целевое функционирование которой значительно зависит от ориентации КА, и одновременно влияющей на облик КА, можно отнести звездные датчики, излучающие участки тепловых труб или радиаторы систем обеспечения тепловых режимов, направленные антенны радиолиний и системы спутниковой навигации, лазерной межспутниковой системы передачи информации, другие антенны и приборы целевых и обеспечивающих систем.

В процессе выбора места установки того или иного наружного оборудования КА выполняются расчеты нацеливания на определенный объект (Земля, Солнце, спутники) [1], в настоящей работе — расчет нацеливания на Солнце панелей солнечных батарей (ПСБ) при текущей ориентации КА, движущегося по круговым орбитам.

В полете постоянно меняется положение ПСБ относительно внешних объектов (Солнце, звезды, другие спутники). Соответственно изменяется эффективность функционирования ПСБ в течение орбитального полета КА, изменяется снимаемая с ПСБ электрическая энергия. Для солнечных батарей (СБ) изменяется освещенность Солнцем. Батареи должны устанавливаться на корпусе КА с учетом его орбитального движения, разворотов при целевом функционировании, изменения положения Солнца относительно Земли и КА, положения связанных с КА других спутников, звездного неба [1].

Расчет нацеливания ПСБ может быть осуществлен разными способами. В настоящей статье задача решается с применением математического аппарата кватернионов.

При решении целевых задач КА ДЗЗ используется система дискретной ориентации ПСБ на Солнце, которая предполагает установку ПСБ в фиксированное положение во время паузы

в работе бортового специального комплекса (БСК) с независимой ориентацией по двум осям (углы крена и тангажа) на относительно длительное время. Для обеспечения эффективности системы управления положением СБ необходимо получение максимального количества электрической энергии в этом фиксированном положении. Для установки ПСБ в фиксированные положения необходимо заранее определить значения углов крена и тангажа исходя из параметров полета и максимального получения электрической энергии. Эти значения необходимы для выдачи команд в бортовой комплекс управления.

Ранее [2] разработан метод, основанный на применении кватернионов, для составления математических соотношений, связывающих параметры полета КА. К параметрам полета отнесены: наклонение ( $i$ ) и высота орбиты ( $h$ ), угол между направлением Земля—Солнце и плоскостью земного экватора ( $\varepsilon$ ), долгота восходящего узла ( $\Omega$ ), угол между направлением на точку весеннего равноденствия и линией Земля—Солнце ( $\Psi$ ), аргумент широты КА ( $U$ ).

Целью настоящей работы является проверка адекватности одного из соотношений [3], моделирующего поворот ПСБ в последовательности: сначала на угол тангажа  $+\beta$  (В), затем на угол крена  $+\varphi$  (Ф). Углы поворотов ПСБ приведены на рис. 1 (положение ПСБ нейтральное).

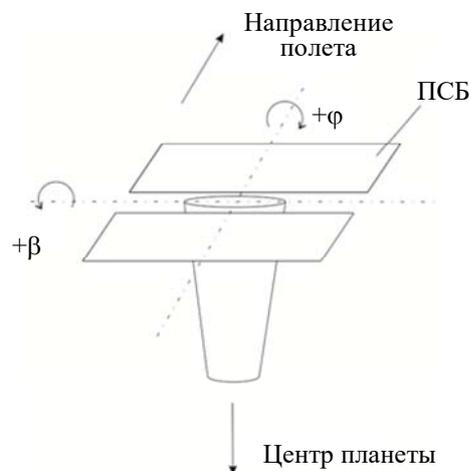


Рис. 1

Непротиворечивость модели проверялась сравнением графика освещенности с ожидаемой освещенностью на масштабной модели. Для проверки точности модели проведен ряд вычислительных экспериментов в частных случаях сочетаний параметров полета. Под частными случаями подразумеваются такие сочетания параметров, при которых Солнце освещает плоскость орбиты под прямым углом (рис. 2) и правильность вычислительного эксперимента легко проверить формулами геометрии.

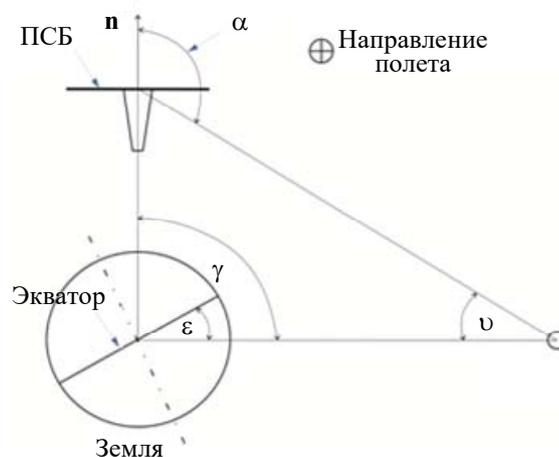


Рис. 2

Для этого по формуле [3] вычислялся угол  $\alpha$  при разных углах  $\varphi$  в любой выбранный момент времени, угол  $\gamma$  выводился для контроля как промежуточный результат [4], а угол  $\nu$  находился по теореме синусов. Затем  $\alpha$  рассчитывался по очевидной для этого частного случая формуле  $\alpha = \gamma + \nu - \varphi$ , где  $\gamma = 90^\circ$ ,  $\nu = 0,2697^\circ$  для орбиты КА высотой 700 км (рис. 2), а угол крена  $\varphi$  увеличивался от 0 до  $90^\circ$  с шагом в  $10^\circ$ . Полученные по разным формулам значения угла  $\alpha$  сравнивались, и определялась ошибка вычислений  $\Delta\alpha$ .

В таблице приведены результаты сравнения одного из частных случаев сочетаний параметров, когда Солнце освещает Землю со стороны южного полушария в день зимнего солнцестояния ( $\psi = 270^\circ$ ), в этот день угол  $\varepsilon$  между направлением Земля—Солнце и земным экватором составляет  $23^\circ 26'$ . Солнце расположено справа по отношению к направлению полета КА ( $\Omega = 180^\circ$ ,  $i = 66^\circ 34'$ ) и не освещает ПСБ, находящиеся в нейтральном положении (рис. 1).

$\varphi, \dots^\circ$	Расчетный эксперимент			Ожидаемый результат			$\Delta\alpha, \dots^\circ$
	$\gamma_{\text{экс}}, \dots^\circ$	$\nu_{\text{экс}}, \dots^\circ$	$\alpha_{\text{экс}}, \dots^\circ$	$\gamma, \dots^\circ$	$\nu, \dots^\circ$	$\alpha, \dots^\circ$	
0	90	0,2697	90,2697	90	0,2697	90,2697	0
10	80	0,2658	80,2658	90	0,2697	80,2697	0,0039
20	70	0,2538	70,2538	90	0,2697	70,2697	0,0159
30	60	0,2341	60,2341	90	0,2697	60,2697	0,0356
40	50	0,2072	50,2072	90	0,2697	50,2697	0,0625
50	40	0,1740	40,1740	90	0,2697	40,2697	0,0957
60	30	0,1354	30,1354	90	0,2697	30,2697	0,1343
70	20	0,0926	20,0926	90	0,2697	20,2697	0,1771
80	10	0,0470	10,0470	90	0,2697	10,2697	0,2227
90	0,0000029576	0,00000013986	0,0000029715	90	0,2697	0,2697	0,26969
90,2697	0,2697	0,0013	0,2710	90	0,2697	0	0,2710

Из рис. 2 видно, что при повороте нормали  $\mathbf{n}$  на  $90^\circ$  к Солнцу угол  $\alpha$  должен равняться углу  $\nu$  и составлять  $0,2697^\circ$  ( $0,0047$  рад). Но в результате вычислительного эксперимента получается значение, близкое к нулю, и не только для угла  $\alpha$ , но и для  $\gamma$  и  $\nu$ , т.е. модель совмещает нормаль  $\mathbf{n}$  к ПСБ с линией Земля—Солнце, что быть не должно, так как КА находится на орбите.

При анализе погрешности выявлено, что она зависит от высоты орбиты и расстояния от КА до Солнца. Например, на высоте 700 км она составит от 0 до  $0,2697^\circ$  ( $0,0047$  рад), а на высоте 40 000 км это уже от 0 до  $1,7679^\circ$ . По мнению авторов, погрешность возникает вследствие отсутствия математического описания совмещения орбитальной подвижной и геоцентрической систем координат в алгоритме составления модели.

Примечание: определение таким же образом точности расчета угла  $\alpha$ , при изменении  $\beta$ , вызывает затруднения, поскольку угол тангажа  $\beta$  можно изобразить на плоскости только при взгляде на КА со стороны Солнца, но тогда нельзя построить треугольник Земля—Солнце—КА и определить угол на Солнце в выбранный момент времени.

В результате экспериментов:

— подтверждена непротиворечивость математической модели, то есть она дает не противоречащие логике результаты при вариации величин важнейших параметров;

— установлена реалистичность модели, то есть результаты расчета дают хорошее совпадение с теми частными случаями, для которых уже имеются фактические данные;

— определены точностные характеристики:

а) при нейтральном положении ПСБ ( $\beta = 0$  и  $\varphi = 0$ ) погрешности в расчете угла  $\alpha$  нет;

б) при изменении угла крена  $\varphi$  от 0 до  $90^\circ$  модель проявляет прогнозируемую неточность, которая выражается в уменьшении угла  $\alpha$  на величину от 0 до значения угла  $\nu$  (рис. 2), т.е. чем больше угол крена  $\varphi$ , тем ближе неточность  $\Delta\alpha$  к значению угла  $\nu$ .

Для доказательства адекватности математической модели требуется убедиться в обеспечении не только свойств непротиворечивости, но и точности. Точность означает, что обобщенная характеристика рассогласования соответствующего параметра модели и оригинала должна быть

не больше заранее заданного значения приемлемой погрешности [5]. В нашем случае приемлемая погрешность заранее не задана вследствие отсутствия альтернативных многокритериальных аналитических моделей для решения задачи ориентации ПСБ. Поэтому имеющуюся погрешность считаем приемлемой и утверждаем, что модель достаточно адекватна. Однако желаемый уровень точности — это значение, превышающее уровень точности существующих приборов ориентации на Солнце. Требуется дополнительная объемная и кропотливая работа по доведению математической модели до необходимого уровня адекватности [6].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шилов Л. Б. Методика выбора мест установки и пространственной ориентации внешних устройств космических аппаратов дистанционного зондирования Земли учетом целевых разворотов: Дис.... канд. техн. наук, Самара, 2016. 187 с.
2. Овчаренко В. А., Пилецкий А. В. Вариант повышения эффективности системы электроснабжения КА // Инновационный арсенал молодежи. Тр. 7-й науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов ФГУП „КБ „Арсенал“. 2016. С. 186—188.
3. [Электронный ресурс]: <<https://drive.google.com/open?id=1Hkx3Kp5Qlr0hQ85nj2TjNn492-7lmNJB>>.
4. Овчаренко В. А., Пилецкий А. В., Бурлуцкий С. Г. Разработка способа получения дополнительной энергии для электропитания космического аппарата с солнечными батареями // Сб. докл. науч. сессии ГУАП. Ч. 1. Технические науки. 2017. С. 144—146.
5. Кубланов М. С. Математическое моделирование. Методология и методы разработки математических моделей механических систем и процессов. Ч. 1. Моделирование систем и процессов. М.: МГТУ ГА, 2004. 108 с.
6. Кубланов М. С. Об адекватности математических моделей и задаче идентификации // Науч. вестн. МГТУ ГА. Сер. Аэромеханика и прочность. 2009. № 138. С. 101—106.
7. Куренков В. И. Методы исследования эффективности ракетно-космических систем. Методические вопросы. Самара, 2012. 201 с.
8. Куренков В. И., Салмин В. В., Абрамов Б. А. Моделирование целевого функционирования космических аппаратов наблюдения с учетом энергобаланса. Самара: СГАУ, 2007. 160 с.
9. Ашихмин В. Н., Гетман М. Б., Келлер И. Э. и др. Введение в математическое моделирование. М.: Логос, 2015. 440 с.
10. Антонов А. В. Системный анализ. М.: ИНФРА-М, 2017. 366 с.
11. Сазонов В. В. Алгоритм определения освещенности солнечных батарей Российского сегмента Международной космической станции // Изв. МГТУ „МАМИ“. Сер. „Химическое машиностроение и инженерная экология“. 2014. Т. 3, № 2(20). С. 63—68.
12. Виссарионов В. И., Дерюгина Г. В., Кузнецова В. А. и др. Солнечная энергетика, М.: МЭИ, 2008. 320 с.
13. Боровкин А. Г., Бурдыгов Б. Г., Гордийко С. В. и др. Бортовые системы управления космическими аппаратами. М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. 304 с.
14. Васильев В. Н. Системы ориентации космических аппаратов. М.: ФГУП „ВИИЭМ“, 2009. 310 с.
15. Райкунов Г. Г., Комков В. К., Сысов В. М. и др. Космические солнечные электростанции — проблемы и перспективы. М.: РУДН, 2017. 284 с.

#### Сведения об авторах

- Вячеслав Анатольевич Овчаренко** — АО „КБ „Арсенал“; инженер 1-й категории; E-mail: vaovcharenko@mail.ru  
**Андрей Владимирович Пилецкий** — ОАО „МЗ „Арсенал“; инженер 1-й категории; E-mail: avpileckij@mail.ru  
**Сергей Геннадьевич Бурлуцкий** — канд. техн. наук; доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра эксплуатации и управления аэрокосмическими системами; E-mail: sergey\_burluckiy@mail.ru

Поступила в редакцию  
03.03.2020 г.

**Ссылка для цитирования:** Овчаренко В. А., Пилецкий А. В., Бурлуцкий С. Г. Моделирование поворотов солнечных батарей космического аппарата. Проверка адекватности // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 6. С. 522—527.

## MODELLING ROTATIONS OF SOLAR CELLS ON A SPACE VEHICLE. ADEQUACY CHECK

V. A. Ovcharenko<sup>1</sup>, A. V. Piletskiy<sup>2</sup>, S. G. Burlutskiy<sup>3</sup>

<sup>1</sup>JSC „KB Arsenal“, 195009, St. Petersburg, Russia  
E-mail: vaovcharenko@mail.ru

<sup>2</sup>JSC „MZ Arsenal“, 195009, St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup>St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,  
190000, St. Petersburg, Russia

A mathematical model describing the influence of the main ballistic parameters of an artificial Earth satellite flight on orientation of its solar panels is considered. The model adequacy is checked using a presented test.

**Keywords:** flight parameters, solar panels, orientation, adequacy

### REFERENCES

1. Shilov L.B. *Metodika vybora mest ustanovki i prostranstvennoy oriyentatsii vneshnikh ustroystv kosmicheskikh apparatov distantsionnogo zondirovaniya Zemli s uchetom tselevykh razvorotov* (The Methodology for Choosing Installation Sites and Spatial Orientation of External Devices of Spacecraft for Remote Sensing of the Earth, Taking into Account Target Turns), Candidate's thesis, Samara, 2016, 187 p. (in Russ.)
2. Ovcharenko V.A., Piletskiy A.V. *Innovatsionny arsenal molodezhi* (An innovative arsenal of youth), Proceedings of the Seventh Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists of FSUE Arsenal Design Bureau, 2016, pp. 186–188. (in Russ.)
3. <https://drive.google.com/open?id=1Hkx3Kp5Qlr0hQ85nj2TjNn492-7ImNJB>.
4. Ovcharenko V.A., Piletskiy A.V., Burlutskiy S.G. *Nauchnaya sessiya GUAP. Chast' 1 Tekhnicheskiye nauki* (Scientific Session of SUAI. Part 1 Engineering), Collection of reports, 2017, pp. 144-146. (in Russ.)
5. Kublanov M.S. *Matematicheskoye modelirovaniye. Metodologiya i metody razrabotki matematicheskikh modeley mekhanicheskikh sistem i protsessov. Chast' 1. Modelirovaniye sistem i protsessov* (Mathematical Modeling. Methodology and Methods for Developing Mathematical Models of Mechanical Systems and Processes. Part 1. Modeling Systems and Processes), Moscow, 2004, 108 p. (in Russ.)
6. Kublanov M.S. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA, seriya Aeromekhanika i prochnost'*, 2009, no. 138, pp. 101-106. (in Russ.)
7. Kurenkov V.I. *Metody issledovaniya effektivnosti raketno-kosmicheskikh sistem. Metodicheskiye vo-prosy* (Research Methods for the Effectiveness of Space Rocket Systems. Methodological Issues), Samara, 2012, 201 p. (in Russ.)
8. Kurenkov V.I., Salmin V.V., Abramov B.A. *Modelirovaniye tselevogo funktsionirovaniya kosmicheskikh apparatov nablyudeniya s uchetom energobalansa* (Modeling the Target Functioning of Space Observation Vehicles Taking into Account the Energy Balance), Samara, 2007, 160 p. (in Russ.)
9. Ashikhmin V.N., Getman M.B., Keller I.E. et al. *Vvedeniye v matematicheskoye modelirovaniye* (Introduction to Mathematical Modeling), Moscow, 2015, 440 p. (in Russ.)
10. Antonov A.V. *Sistemnyy analiz* (System Analysis), Moscow, 2017, 366 p. (in Russ.)
11. Sazonov V.V. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2014, no 2(3), pp. 63–68. (in Russ.)
12. Vissarionov V.I., Deryugina G.V., Kuznetsova V.A. et al. *Solnechnaya energetika* (Solar Power), Moscow, 2008, 320 p. (in Russ.)
13. Borovkin A.G., Burdygov B.G., Gordiyko S.V. et al. *Bortovyye sistemy upravleniya kosmicheskimi apparatami* (Onboard Spacecraft Control Systems), Moscow, 2010, 304 p. (in Russ.)
14. Vasil'yev V.N. *Sistemy oriyentatsii kosmicheskikh apparatov* (Spacecraft Orientation Systems), Moscow, 2009, 310 p. (in Russ.)
15. Raykunov G.G., Komkov V.K., Sysoyev V.M. *Kosmicheskiye solnechnyye elektrostantsii – problemy i perspektivy* (Space Solar Power Plants – Problems and Prospects), Moscow, 2017, 284 p. (in Russ.)

### Data on authors

**Vyacheslav A. Ovcharenko** — JSC „KB Arsenal“, Category 1 Engineer;  
E-mail: vaovcharenko@mail.ru

**Andrey V. Piletskiy** — JSC „MZ Arsenal“, Category 1 Engineer; E-mail: avpileckij@mail.ru

**Sergey G. Burlutskiy**

— PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Operation and Management of Aerospace Systems; E-mail: sergey\_burluckiy@mail.ru

**For citation:** Ovcharenko V. A., Piletskiy A. V., Burlutskiy S. G. Modelling rotations of solar cells on a space vehicle. Adequacy check. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 6. P. 522—527 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-6-522-527