

УДК 629.78

МЕТОДИКА РАЗМЕЩЕНИЯ ВНЕШНИХ УСТРОЙСТВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ С УЧЁТОМ ЦЕЛЕВОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

© 2015 Р. Н. Ахметов¹, Л. Б. Шилов¹, В. И. Куренков², А. А. Якищук²¹АО «РКЦ «Прогресс», г. Самара²Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Показано, что одной из важных задач на начальных этапах проектирования космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является размещение внешних устройств на корпусе, оказывающих существенное влияние на проектный облик КА и целевые характеристики космической системы, а также на частные показатели эффективности обеспечивающих бортовых систем. Разработаны модели и алгоритмы для оценки частных показателей эффективности, используемых для выбора мест и углов установки внешних устройств КА ДЗЗ: солнечных батарей (СБ), радиаторов охлаждения, звёздных датчиков, антенн высокоскоростной радиолинии, передающих устройств межспутниковой лазерной системы передачи информации, антенн системы спутниковой навигации. Оценка частных показателей эффективности, используемых при размещении внешних устройств КА, осуществляется с помощью разработанного программного обеспечения, в основу которого положен метод имитационного моделирования орбитального движения, оценки условий функционирования, программных разворотов КА ДЗЗ по целевому назначению, взаимодействия с другими объектами орбитальной группировки. Приведены некоторые результаты апробации предлагаемой методики. В качестве примера показано, что для КА ДЗЗ, функционирующих на солнечно-синхронных орбитах, среднесуточный косинус угла между нормалью к плоскости панели СБ и направлением на Солнце существенно зависит от долготы восходящего узла орбиты.

Космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, целевые характеристики, проектные характеристики, внешние устройства, критериальные параметры, моделирование, целевое функционирование, программное обеспечение.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-4-38-48

Современные космические аппараты детального оперативного дистанционного зондирования Земли характеризуются наличием большого количества внешних устройств: солнечные батареи, радиаторы охлаждения, звёздные датчики, антенны высокоскоростной радиолинии, передающие устройства межспутниковой лазерной системы передачи информации, антенны системы спутниковой навигации.

Одной из важных задач на начальных этапах проектирования является размещение внешних устройств на корпусе КА, оказывающих существенное влияние на его проектный облик и целевые характеристики космической системы (КС) (производительность съёмки, оперативность доставки видеoinформации на Землю, точность привязки координат снимка), а также на частные показатели эффек-

тивности бортовых систем (среднесуточная мощность солнечной батареи, мощность системы терморегулирования).

Решение задачи размещения внешних устройств на КА зависит от множества факторов, в том числе и от особенностей его целевого функционирования. Особенности задачи заключаются в сложном программном угловом движении КА вокруг центра масс в процессе орбитального полёта, поскольку снимаемые участки земной поверхности произвольным образом расположены относительно трассы полёта КА в полосе обзора. В результате в процессе полёта стохастически меняется положение ВУ относительно внешних объектов (ВО) как астрофизических (Солнце, звёзды), так и искусственных (спутник-ретранслятор, навигационные спутники). Соответственно изменяется и

эффективность функционирования внешних устройств в течение орбитального полёта. Для солнечных батарей и радиаторов охлаждения (РО) изменяется освещённость Солнцем, для антенных устройств (АУ) – зона радиовидимости, для звёздных датчиков (БОКЗ) – зона обзора звёздного неба. Поэтому возникает задача выбора мест установки ВУ на КА с учётом их функционирования в условиях переменного положения.

Аналитическим путём решить такую задачу практически не удаётся и поэтому на начальных этапах проектирования КА, как правило, используется эмпирический подход. Отметим, что известны аналитические модели для выбора оптимального угла установки неориентируемых солнечных батарей КА [1], но они пригодны только для солнечно-синхронных орбит и не учитывают стохастический характер разворотов КА при целевом функционировании. Существующие методики решения данной задачи имеют ограничения по номенклатуре рассматриваемых внешних устройств КА, по количеству учитываемых факторов и не позволяют проводить оценку критериальных параметров в динамике, в том числе не учитывают стохастический характер разворотов КА в процессе целевого функционирования. Предлагаемый алгоритмический подход к размещению внешних устройств на низкоорбитальных КА наблюдения в известной литературе не встречается.

Целью работы является создание методического и программного обеспечения для выбора на начальных этапах проектирования мест установки и пространственной ориентации внешних устройств на КА ДЗЗ на основе моделирования орбитального движения и разворотов аппарата по целевому функционированию с учётом назначения каждого отдельного устройства, взаимного экранирования и критериев выбора.

В качестве критериев приняты:

- максимальное среднесуточное значение косинуса угла между нормалью к

плоскости панели СБ и направлением на Солнце ($\overline{\cos \alpha} \rightarrow \max$);

- максимальное среднесуточное значение относительного времени нахождения антенны высокоскоростной радиолинии (ВРЛ) в зоне радиовидимости с наземных пунктов приёма информации (НППИ) ($T_{ВРЛ}^{Оmn} \rightarrow \max$);

- максимальное среднесуточное значение относительного времени нахождения оптических головок межспутниковой лазерной системы передачи информации (МЛСПИ) в зоне радиовидимости со спутником-ретранслятором ($T_{МЛСПИ}^{Оmn} \rightarrow \max$);

- максимальное среднесуточное значение относительного времени попадания звёздного неба в поле зрения оптического блока звёздного координатора ($T_{БОКЗ}^{Оmn} \rightarrow \max$);

- максимальное среднесуточное значение относительного времени видимости с борта КА не менее заданного количества (k) навигационных спутников ($\overline{T_{\geq k}^{ps}} \rightarrow \max$).

Ниже представлены сведения о некоторых разработанных моделях для выбора мест и углов установки внешних устройств КА ДЗЗ.

1. Математические модели и алгоритм для оценки среднесуточного косинуса угла (альфа) между направлением на Солнце и нормалью к плоскости панели солнечных батарей

Разработаны модели для неподвижных панелей СБ, расположенных произвольно на корпусе КА, в том числе модели для неориентированного полёта. Расчётные схемы представлены на рис. 1. Введены следующие обозначения: \vec{n} – единичный вектор (вектора) нормали к плоскости панели СБ; \vec{S} – единичный вектор направления на Солнце; ϑ и γ – углы тангажа и крена КА; γ_{Π} – угол поворота панели по крену; $O_B x_B y_B z_B$ – базовая система координат КА. Оптическая ось телескопа совпадает с осью $O_B x_B$.

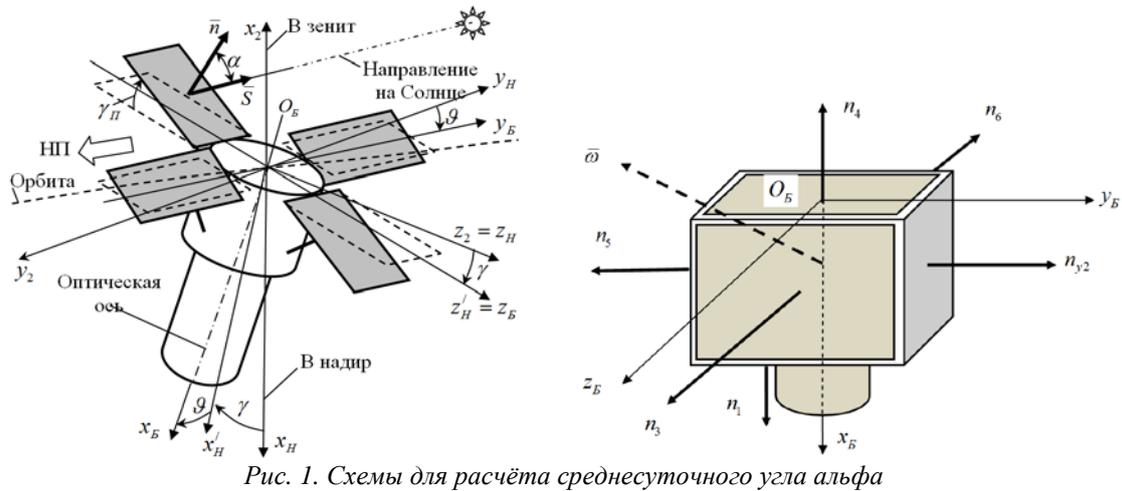


Рис. 1. Схемы для расчёта среднесуточного угла альфа

В качестве базовых были выбраны известные модели, которые усовершенствованы, во-первых, с точки зрения привязки к конкретным конструктивным схемам и базовым координатам КА и, во-вторых, с точки зрения осуществления расчёта среднего косинуса угла альфа в базовой системе координат КА, а не в неподвижной геоцентрической (что сокращает количество пересчёта координат точек конструкции КА).

2. Математические модели и алгоритмы для оценки критериального параметра при выборе предпочтительных мест установки радиаторов охлаждения

Расчётные схемы КА с радиатором охлаждения показаны на рис. 2.

На каждом шаге имитационного моделирования орбитального полёта и программных разворотов КА в базовой системе координат определяются косинусы углов ε между единичным вектором направления на Солнце \vec{S} и векторами \vec{n}_{ij} . В конце оценивается относительное время воздействия Солнца на РО (со средним косинусом угла ε в каждый момент времени) за время (t) имитации полёта КА:

$$T_{PO}^{Omn}(t) = \frac{1}{t} \sum_{i=0}^t (\Delta t \overline{\cos \varepsilon_{PO}}) = \frac{1}{t \cdot F_{PO}} \sum_{i=0}^t \left(\Delta t \sum_{j=1}^k \sum_{i=0}^m F_{ij} \cos \varepsilon_{ij} \right).$$

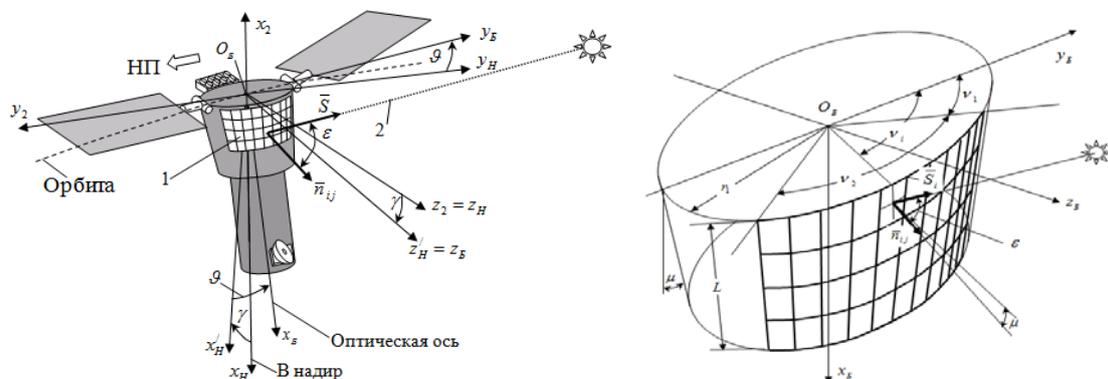


Рис. 2. Расчётные схемы КА с радиатором охлаждения

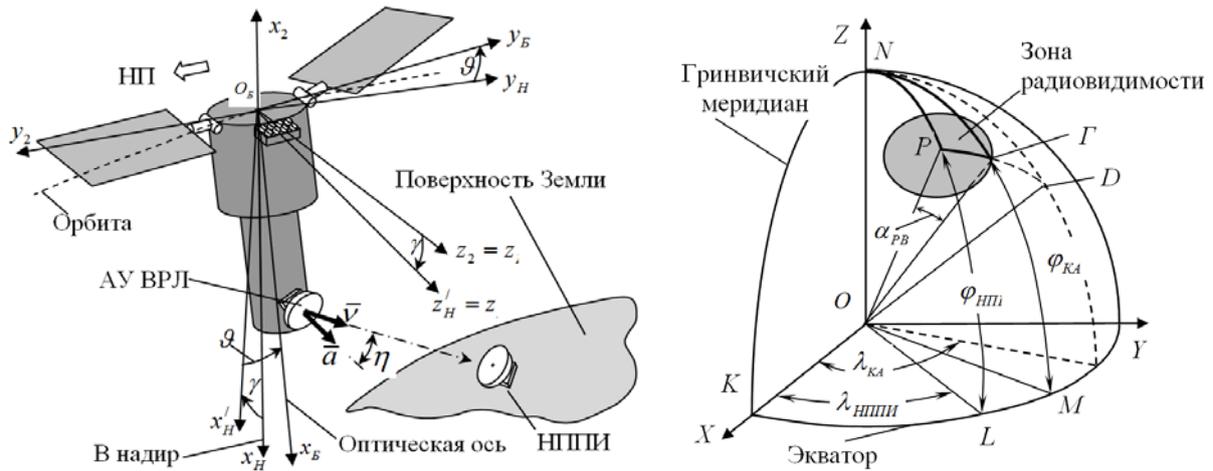


Рис. 3. Расчётные схемы КА с ВРЛ и видимости НППИ

3. Модели и алгоритмы для оценки критериального параметра при выборе мест установки устройств высокоскоростной радиолинии

Расчётные схемы КА с ВРЛ и видимости наземных пунктов приёма информации показаны на рис. 3.

В базовой системе координат строится единичный вектор \bar{a} к плоскости полупространства, в котором антенны не затенены элементами конструкции КА. В каждый момент времени имитации орбитального движения рассчитываются координаты единичного вектора \bar{v} направления луча от КА ДЗЗ к НППИ и проверяется условие их взаимной видимости с учё-

том степени затенения антенн корпусом КА и его элементами. Рассчитывается относительное время нахождения направленной антенны КА наблюдения и НППИ в условиях взаимной видимости $T_{PB}^{omn} = t_{PB} / t$.

4. Модели и алгоритмы для оценки относительного времени взаимной видимости передающих устройств МЛСПИ и спутника-ретранслятора

Расчётная схема КА с оптическими головками МЛСПИ и схема орбитального движения спутника-ретранслятора (СР) показаны на рис. 4.

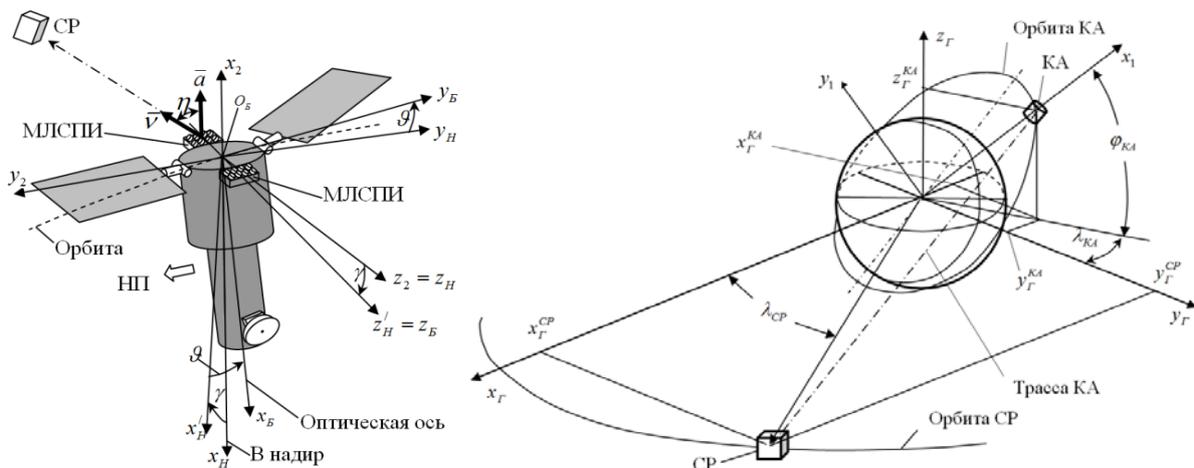


Рис. 4. Расчётная схема КА с МЛСПИ и схема орбитального движения СР

В базовой системе координат строятся единичные векторы \bar{a} к плоскости полупространства, в котором головки МЛСПИ не затенены элементами конструкции КА. Если условие взаимной видимости выполняется, то определяются координаты СР и КА ДЗЗ в геоцентрической гринвичской системе координат и рассчитываются координаты единичного вектора \bar{v} направления луча от КА ДЗЗ к СР. Определяется относительное время

радиовидимости КА ДЗЗ и СР $T_{СР}^{omn} = t_{СР}/t$.

5. Модели и алгоритмы для оценки критериального параметра при выборе мест и углов установки звёздных датчиков (БОКЗ)

Расчётная схема КА с БОКЗ и схема для оценки попадания Земли в апертуру звёздного датчика показаны на рис. 5.

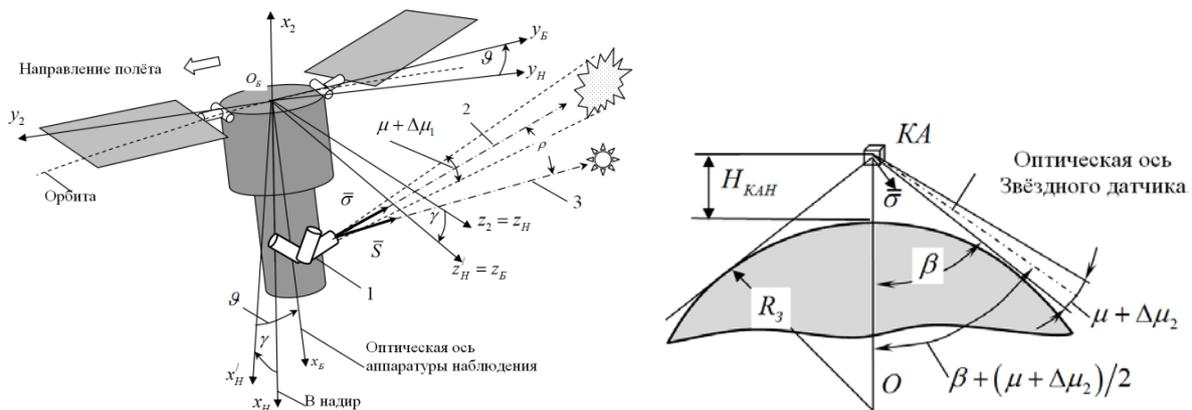


Рис. 5. Расчётная схема КА с БОКЗ и схема затенения звёздного датчика

Рассчитывается относительное время попадания звёздного неба в поле зрения БОКЗ:

$$T_{БОКЗ}^{Omni} = \frac{t - \sum_{i=0}^t \Delta t_{Ci} - \sum_{i=0}^t \Delta t_{3i}}{t},$$

где Δt_{Ci} и Δt_{3i} – соответственно шаги расчёта по времени, когда солнечные лучи и Земля попадали в поле зрения БОКЗ.

Расчёт производится с учётом возможности попадания Солнца и Земли в поле зрения БОКЗ (с помощью расчётов координат вектора направления оптической оси датчика $\bar{\sigma}$ и единичного вектора направления на Солнце α).

6 Модели и алгоритм для оценки критериального параметра при выборе предпочтительных мест установки

антенн системы спутниковой навигации (ССН)

Расчётная схема КА с антеннами ССН и схема для оценки видимости навигационных спутников (НС) показаны на рис. 6.

Построены модели для оценки факта взаимной видимости антенн ССН КА и НС. Рассчитывается относительное время видимости с антенных устройств КА наблюдения не менее k НС: $\bar{T}_{\geq k}^{pe} = (\sum \Delta t_{\geq k})/t$, где $\Delta t_{\geq k}$ – приращение только тех шагов расчёта по времени, в которых выполнялось условие видимости числа НС большего заданного.

Для использования моделей, приведённых выше, проведено совершенствование методического обеспечения моделирования целевого функционирования КА ДЗЗ. Некоторые из таких моделей приведены ниже.

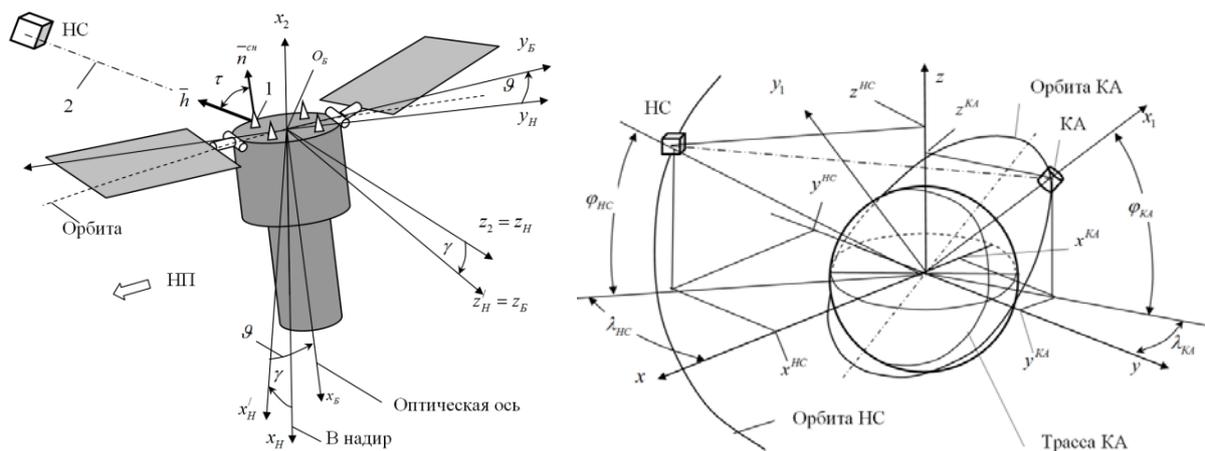


Рис. 6. Расчётная схема КА с антеннами СЧН и видимости СР

Модели для определения факта нахождения КА в световом пятне

Ранее использовалась модель, в которой для определения границ светового пятна следовало проводить многочисленные дополнительные расчёты. На рис. 7 слева представлена схема для построения более экономичной модели. Область поверхности Земли, находящейся в световом

пятне, располагается внутри подвижного конуса с вершиной в центре Земли и образующими, направленными на границу светового пятна. Получено условие нахождения точки D на поверхности Земли с координатами φ_D и λ_D в световом пятне с углом полураствора, равным центральному углу Земли $\alpha_{СП}$:

$$|\arccos[\sin(\varphi_Z) \cdot \sin(\varphi_D) + \cos(\varphi_Z) \cdot \cos(\varphi_D) \cdot \cos(\lambda_D - \lambda_Z)]| < \alpha_{СП},$$

где φ_Z и λ_Z – координаты центра светового пятна.

Модель для определения факта нахождения КА в тени Земли

Расчётная схема представлена на рис. 7 справа. Учитывая, что центр свето-

вого пятна (точка Z) и центр области тени (точка T) находятся на диаметрально противоположных сторонах поверхности Земли, получаем условие нахождения КА в тени:

$$|\arccos[\sin(\varphi_T) \cdot \sin(\varphi_{КА}) + \cos(\varphi_T) \cdot \cos(\varphi_{КА}) \cdot \cos(\lambda_{КА} - \lambda_T)]| < \alpha_T.$$

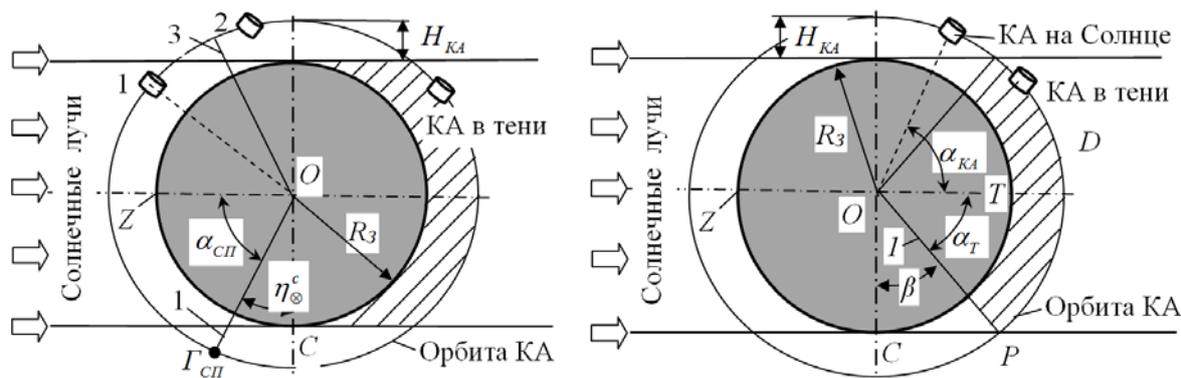


Рис. 7. Схемы для оценки нахождения КА в световом пятне и в тени

Модели и алгоритмы для оценки взаимной видимости КА

В математических моделях и алгоритмах для оценки взаимной видимости КА не требуется определять пространственные координаты спутника-ретранслятора и решать трансцендентные уравнения. Такие модели относительно просты и применимы в составе комплекса для имитационного моделирования орбитального полёта и целевого функционирования КА.

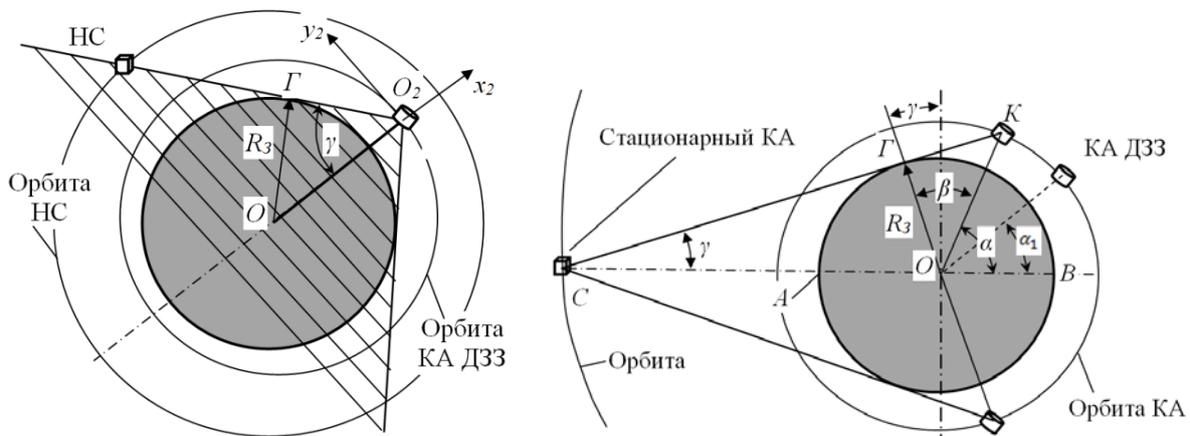


Рис. 8. Расчётные схемы для оценки взаимной видимости КА

Разработано программное обеспечение (ПО) для расчёта критериальных параметров при размещении внешних устройств КА ДЗЗ. В качестве базового использовано программное обеспечение [2], разработанное для оценки целевых показателей эффективности КА ДЗЗ. Программа разработана в среде программирования Delphi XE2 с использованием объектно-ориентированного подхода и может быть использована только в операционной среде Windows. Для трёхмерной визуализации использовалась платформа создания приложений FireMonkey.

С помощью разработанного ПО можно проводить оценки критериальных параметров для установки СБ, РО и внешних устройств ВРЛ, МЛСПИ, БОКЗ и ССН и количества НС, видимых с борта

Построены следующие модели и алгоритмы для оценки:

- взаимной видимости КА ДЗЗ и навигационного спутника;
- видимости спутника-ретранслятора с низкоорбитальным КА ДЗЗ;
- взаимной видимости двух КА на основе трассировки луча видимости.

Расчётные схемы приведены на рис. 8.

КА ДЗЗ. ПО предусматривает возможность построения твёрдотельных моделей КА и внешних устройств, визуализацию процесса полёта, программных разворотов и разворотов КА, имеющих стохастический характер. Результаты расчёта представляются в окнах программы в виде интегральных значений критериальных параметров и в виде графиков в зависимости от времени имитации орбитального полёта и целевого функционирования КА ДЗЗ, в том числе в виде математического ожидания, дисперсии, функций распределения и плотности распределения, а также в виде динамически изменяющихся диаграмм. На рис. 9 приведены окно редактора для создания упрощённой твёрдотельной модели КА и окно задания параметров орбит КА, СР и НС.

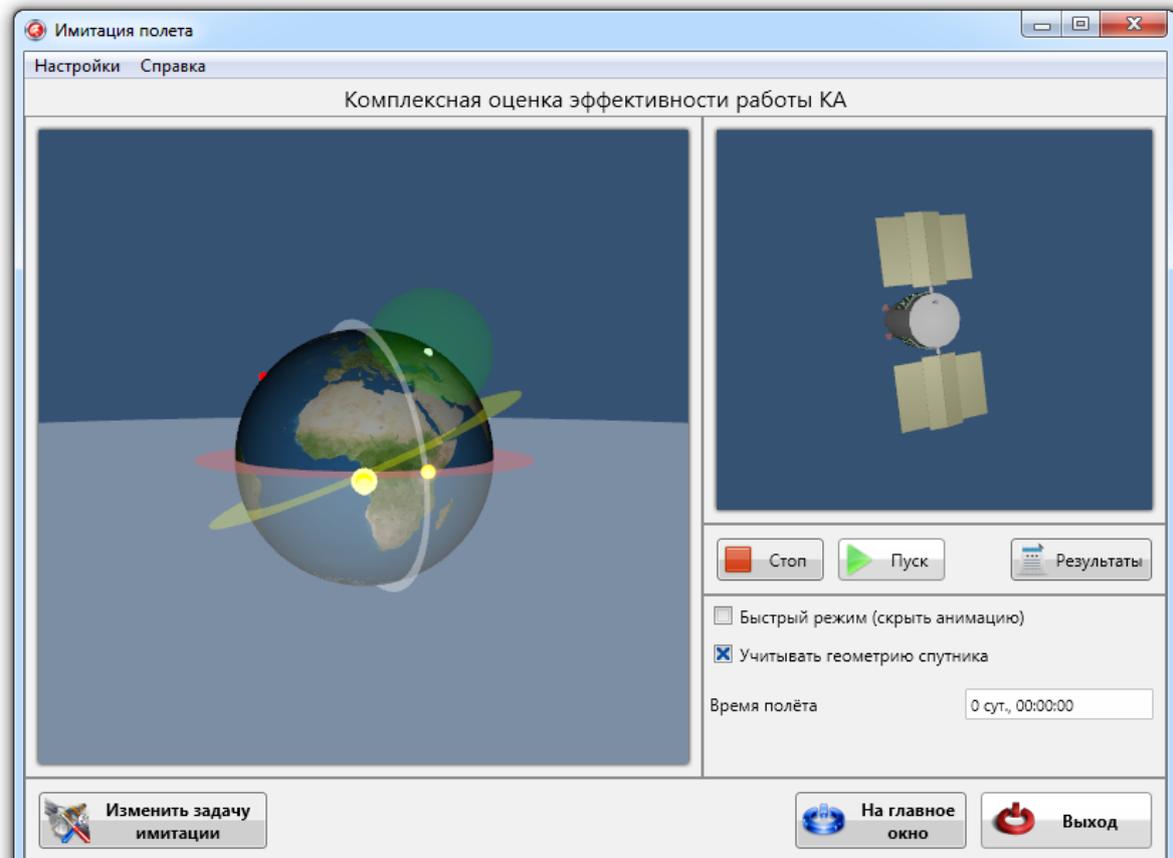
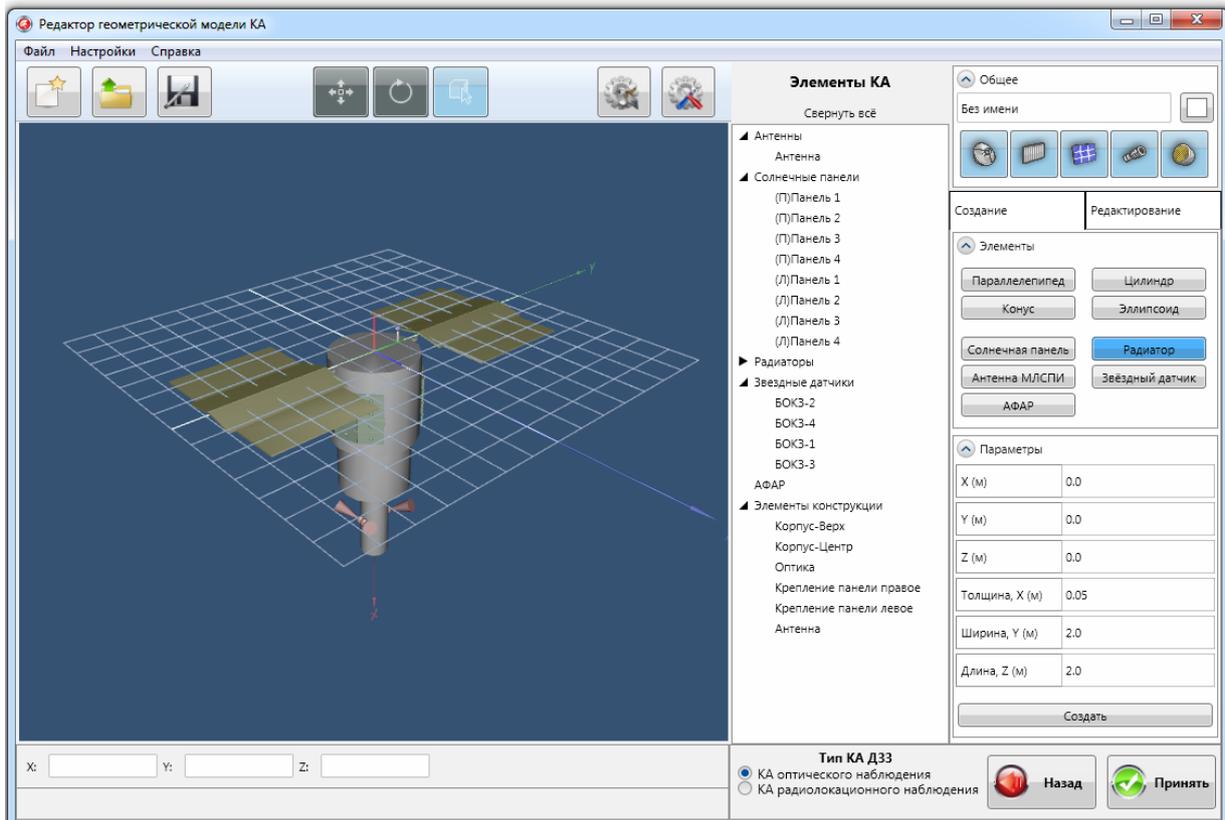


Рис. 9. Окна редактора модели КА и задания параметров орбит

Проведено тестирование программного обеспечения и показана адекватность используемых моделей на основе:

- проверок совпадения результатов расчёта с помощью разработанных программ и вручную для многих частных расчётных случаев;
- визуализации трёхмерных моделей КА, орбитального полёта и целевых разворотов;
- проверок непротиворечивости результатов при отслеживании изменения результатов при смещении исходных данных.

На рис. 10 в качестве примера приведены твёрдотельные упрощённые модели КА ДЗЗ с различной ориентацией па-

нелей СБ. Схемы поворотов панелей солнечной батареи КА изображены на рис. 10. Углы установки плоскости панелей СБ равны 0 (рис. 10, а), $+30^\circ$ (рис. 10, б) и -30° (рис. 10, в).

Анализ результатов показывает, что лучший угол установки панелей СБ зависит от параметров орбиты. Например, при долготе восходящего узла орбиты 30° (табл. 1) лучший угол установки панелей СБ равен $+30^\circ$.

Разработанная методика выбора мест установки и ориентации внешних устройств КА внедрена в практику проектирования АО «РКЦ «Прогресс».

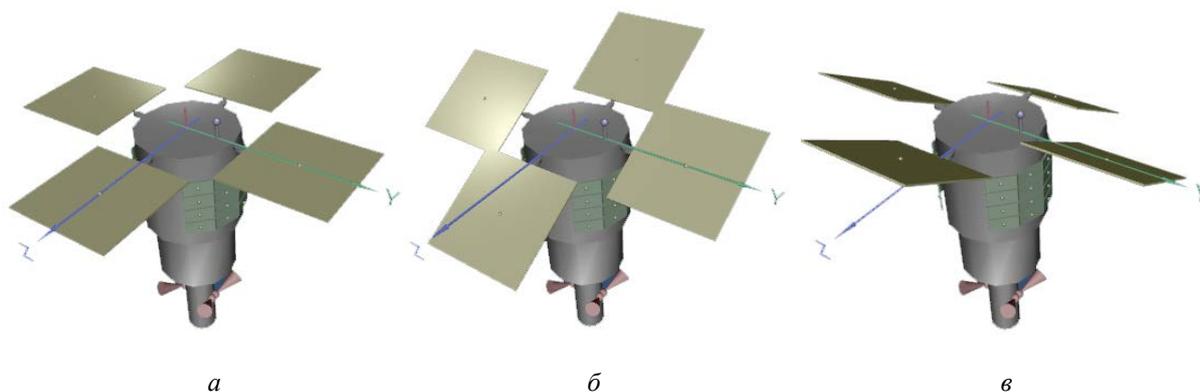


Рис. 10. Схемы расположения панелей СБ на КА

Табл. 1. Значения среднего косинуса угла альфа

$\Omega, ^\circ$	Вид съёмки	Среднесуточное значение $\overline{\cos \alpha}$		
		$\gamma_{II} = -30^\circ$	$\gamma_{II} = 0^\circ$	$\gamma_{II} = +30^\circ$
30	На восходящем витке после полудня	0.220	0.371	0.429
210	На нисходящем витке после полудня	0.224	0.360	0.424
0	На восходящем витке в полдень	0.324	0.388	0.349
180	На нисходящем витке в полдень	0.309	0.386	0.343
-30	На восходящем витке до полудня	0.425	0.380	0.256
150	На нисходящем витке до полудня	0.428	0.368	0.249

Библиографический список

1. Дмитриев Г.А. Выбор оптимального угла установки неориентируемых солнечных батарей КА, находящегося на круговой солнечно-синхронной орбите // Материалы второй всероссийской конфе-

ренции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: Институт космических исследований РАН, 2004. С. 91.

2. Куренков В.И., Салмин В.В., Абрамов Б.А. Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения: уч.

пособие. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2006. 296 с.

Информация об авторах

Ахметов Равиль Нургалиевич, доктор технических наук, первый заместитель Генерального директора – генеральный конструктор АО «РКЦ «Прогресс», г. Самара. E-mail: csdb@samtel.ru. Область научных интересов: проектирование, конструирование, отработка и эксплуатация ракетно-космической техники.

Шилов Лев Борисович, заместитель главного конструктора – заместитель начальника отделения АО «РКЦ «Прогресс», г. Самара. E-mail: shillev58@yandex.ru. Область научных интересов: проектирование космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.

Куренков Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры космического маши-

ностроения, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kvi.48@mail.ru. Область научных интересов: проектирование, моделирование целевого функционирования, надёжность ракет-носителей и космических аппаратов наблюдения.

Якишик Артём Андреевич, аспирант кафедры космического машиностроения, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: yakischnik@mail.ru. Область научных интересов: моделирование целевого функционирования космических аппаратов наблюдения.

PROCEDURE OF ACCOMODATION OF EARTH REMOTE SANSING SATELLITE EXTERNAL DEVICES WITH REGARD FOR THE SATELLITE TARGET OPERATION

© 2015 R. N. Akhmetov¹, L. B. Shilov¹, V.I.Kurenkov², A. A. Yakischik²

¹Samara Space Center «Progress»

²Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The paper deals with the problem of accommodation of external devices of the Earth remote sensing satellite (ERSS). It is shown that it has a significant influence on the ERSS conceptual design and target characteristics of a space system as well as partial efficiency indices of the support systems. Models and algorithms have been developed which allow estimating partial efficiency indices used for choosing the sites and angles of installing the devices. Among these devices are solar cell battery panels, radiators, star trackers, laser intersatellite link devices, satellite navigation system antennas, etc. Partial efficiency indices used for the appropriate accommodation of the external devices are assessed with the help of the software based on the simulation of the satellite orbital motion, conditions of its operation, target turns, and interaction with other objects of the orbital constellation. Some results of testing the proposed procedure are given. As an example, it is shown that for ERSS with sun synchronous orbits the average cosine of the angle between the Sun line and normal to the plane of the solar cell battery depends upon the longitude of ascending node to a great extent.

Spacecraft, Earth remote monitoring, target efficiency, design parameters, external devices, criterial parameters, simulation, target operation, software

References

1. Dmitriev G.A. Selection of the optimum installation angle of the non-orientable solar panels of the spacecraft, located in a circular sun-synchronous orbit. *Proceedings of the second Russian conference «Modern problems of remote sensing of the Earth from space»*. Moscow: Space Research Institute of Russian Academy Sciences Publ., 2004. P. 91. (In Russ.)
2. Kurenkov V.I., Salmin V.V., Abramov B.A. *Osnovy ustroystva i modelirovaniya tselevogo funktsionirovaniya kosmicheskikh apparatov nablyudeniya: uch. posobie* [Basics of arrangement and modeling of target functioning of observation spacecraft]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2006. 296 p.

About the authors

Ahmetov Ravil Nurgalieovich, Doctor of Science (Engineering), First Deputy General Director – General Designer of JSC «Space Rocket Center «Progress», Samara, Russian Federation. E-mail: csdb@samtel.ru. Area of Research: design, engineering, development and operation of space hardware.

Shilov Lev Borisovich, Deputy Chief Designer, Deputy Head of Department, JSC «Space Rocket Center «Progress», Samara, Russian Federation. E-mail: shillev58@yandex.ru. Area of Research: designing Earth remote sensing spacecraft.

Kurenkov Vladimir Ivanovich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Pro-

fessor of the Department of Space Engineering, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: kvi.48@mail.ru. Area of Research: design, simulation of target functioning, reliability of boosters and observation spacecraft.

Yakishchik Artem Andreevich, post-graduate student of the Department of Space Engineering, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: yakischik@mail.ru. Area of Research: modeling of target functioning of observation spacecraft.