

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС АПРИОРНОГО РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ

А. О. Бабаков, С. А. Новоселов

Рассмотрен программный комплекс для априорного расчета основных тактико-технических характеристик космического аппарата линейного разрешения на местности, погрешностей определения координат точек на местности, ширины полосы захвата и обзора при ограниченном перечне параметров оптико-электронной аппаратуры. Продемонстрирован пример расчета для GeoEye-1 с сопутствующими результатами.

Ключевые слова: оптико-электронная аппаратура, космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, линейное разрешение на местности, функция передачи модуляции, погрешности определения координат точек на местности, ширина полосы обзора, ширина полосы захвата.

На ранних этапах проектирования космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), имея ограниченный перечень параметров оптико-электронной аппаратуры (ОЭА), а также предполагаемой высоты ведения съемки, одним из важных направлений разработок, связанных с оценкой эффективности КА, является априорная оценка линейного разрешения на местности (ЛРМ), погрешностей определения координат точек на местности (ПОКТ) и вычисление ширин полос захвата и обзора (ШПО/ШПЗ). Проведение данных оценок позволяет определить общую целесообразность проектируемого КА, обозначить его цели и задачи. Также такой подход позволяет избежать ошибок при проектировании, тем самым устранив или снизив издержки на ранних этапах разработки.

Основная цель разработки программного комплекса является объединение алгоритмов вычисления определенных выше параметров, а именно ЛРМ, ПОКТ и ШПО/ШПЗ в единый продукт, который получает доступно визуализированные выходные данные в зависимости от текущего положения КА и его ориентации на определенный момент времени. Кроме того, данный программный комплекс позволяет визуализировать движение КА и процесс съемки местности.

Еще одной целью было создание программного комплекса с минимально возможным количеством элементов графического интерфейса, в свою очередь, упрощающего эксплуатацию данного продукта.

Задачи при разработке программного комплекса заключались в выборе и отладке алгоритмов, установлении взаимодействия между алгоритмами вычисления ЛРМ, ПОКТ и ШПО/ШПЗ и графической визуализации орбитального движения и имитации фокальной плоскости с последующим выводом вы-

ходных данных в зависимости от координаты точки на фокальной плоскости.

Новизна работы заключается в создании программного комплекса, объединяющего алгоритмы вычисления ЛРМ, ПОКТ и ШПО/ШПЗ, а также интегрирования орбиты и имеющего доступную визуализацию выходных параметров, – положение КА на карте и снимаемую поверхность Земли с учетом углов ориентации и текущего момента времени; имитацию фокальной плоскости с последующим выводом выходных данных в зависимости от координаты точки на фотоприемное устройство (ФПУ). При этом в созданном продукте априорного расчета вышеуказанных величин унифицирован перечень необходимых входных данных, что облегчило его эксплуатацию.

Ближайшим аналогом данного программного комплекса является SIRIUS-S, описанный в [1]. Однако SIRIUS-S предназначен для расчетно-экспериментальных задач, где, в том числе, учитываются конструкция КА, его поступательное и угловое движение, тогда как описываемый КА в данной статье – для априорных, где КА принимается за материальную точку и учитывается лишь поступательное движение с возможностью изменения углов ориентации.

Интегрирование орбиты проводится по алгоритму Рунге – Кутты с шагом в 1 секунду по системе уравнений ускорения [2, 3]:

$$\ddot{a}_x = -\frac{\mu x}{r^3} + \delta x;$$

$$\ddot{a}_y = -\frac{\mu y}{r^3} + \delta y;$$

$$\ddot{a}_z = -\frac{\mu z}{r^3} + \delta z,$$

где δx , δy , δz – возмущающие функции.

Линейное разрешение на местности рассчитывается по формуле [4]:

$$L = \frac{D_s}{2\nu f_{об} \cos(\alpha)},$$

где D_s – дальность съемки; ν – разрешающая способность матрицы (лин/мм); $f_{об}$ – фокусное расстояние оптической системы; α – угол наклона фокальной плоскости.

На рис. 1 показано главное окно программы, которое отображается при запуске.

Главное окно состоит из следующих элементов:

1. Кнопка «Параметры» – открывает дополнительное окно, где представлены входные данные, используемые при расчете.

2. Кнопка «Замедлить движение».

3. Кнопка «Пауза/Продолжить».

4. Кнопка «Ускорить движение».

5. Ползунки для углов ориентаций позволяют изменять углы крена (R), тангажа (P) и курса (Y) во время работы программы.

6. Поле, имитирующее фокальную плоскость (ФП) – при работе программы в зависимости от координат на ФП будут отображаться такие данные, как ЛРМ и погрешности координат dB , dL , dh .

7 – 10. Окна вывода следующих данных момента времени по шкале UTC, координат подспутниковой точки, углов ориентации, ширины полосы обзора и захвата.

11. Карта Земли. В данном случае для отображения движения КА была использована система координат WGS-84 и географическая проекция.

На рис. 2 показано окно «Параметры», где в данном случае показаны параметры орбиты.

Также в исходные данные были включены: для вкладки «Ориентация» – текущие углы крена и максимального крена, тангажа и курса и их погрешности; для вкладки «Оптика» – размеры пикселя, фокусное расстояние, полуразмеры ФП и их погрешности; для вкладки «Приборные СК» – углы ориентации между СК аппарата и визирной СК и для вкладки «С/Ш и ФПМ» – соотношение сигнал/шум (С/Ш) – отношение мощности полезного сигнала к мощности шума, и параметры для вычисления функции передачи модуляции (ФПМ), характеризующей качество системы, воспроизводящей изображения.

После ввода исходных данных, нужно нажать кнопку «Пуск», дав старт процессу моделирования. Один из моментов работы программы показан на рис. 3.

При работе программы на карту проецируется сам КА, обозначенный красным цветом, и проекция снимаемой поверхности, показанная желтым цветом. Пример анимации показан на рис. 4.

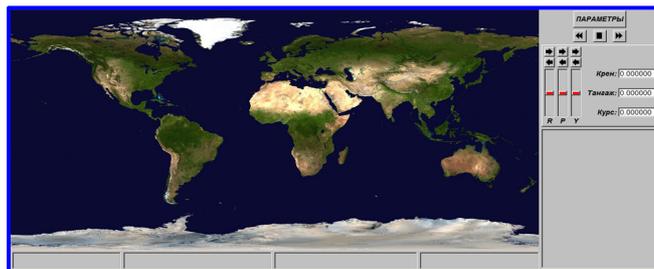


Рис. 1. Запуск программы. Главное окно

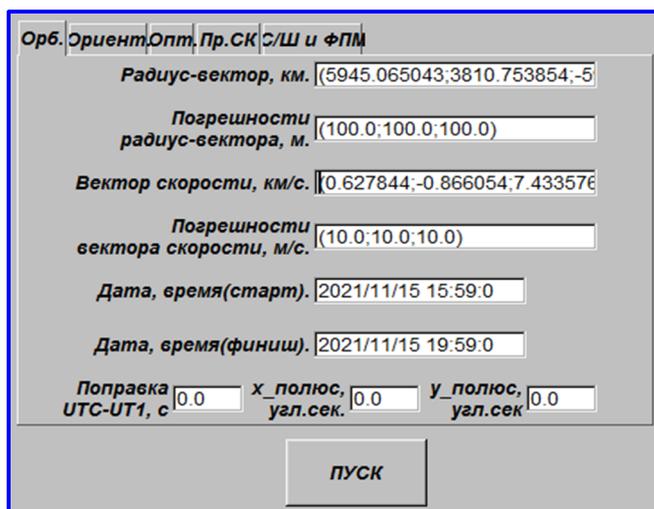


Рис. 2. Окно «Параметры». Исходные данные для орбиты космического аппарата

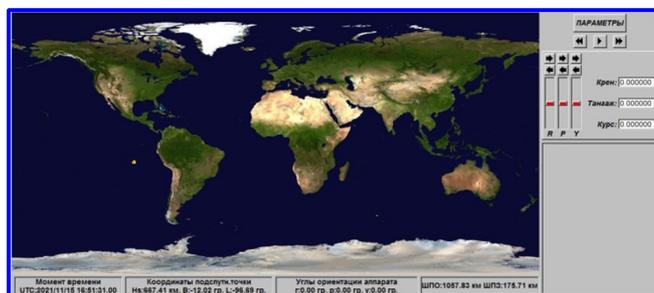


Рис. 3. Запуск процесса моделирования



Рис. 4. Пример анимации движения космического аппарата и съемки местности

Обратив внимание на правую нижнюю часть рис. 3, можно заметить выделенную площадь, которая имитирует ФП. В зависимости от координат на ФП будут отображаться вычисленные параметры, а именно момент времени в UTC, текущие координаты на ФП, дальность КА, геодезические координаты и их погрешности определения и линейное разрешение на местности. Образцы показаны на рис. 5 и 6.

Для проверки работоспособности программы были взяты параметры КА GeoEye-1 [5], а также [6].

В таблице приведены исходные данные.

Согласно данным на рис. 6 и 7, несмотря на большие значения углов наклона, значения ЛРМ (в данном случае наземный интервал дискретизации, так как С/Ш и ФПМ не заданы) различаются

на 0,07 м. Погрешности по долготе будут увеличиваться по мере движения КА от экватора до полярной зоны, а именно при $B = 49,06$ $dL = 560,88$ м и при $B = -76,13$ $dL = -1359$ м. Ширина полосы обзора колеблется от 15,1 до 15,3 км при съемке в надир и от 17,2 до 17,8 км при заданных углах крена согласно рис. 8.

Анализируя результаты работы программы на основе исходных данных КА GeoEye-1, можно сделать вывод, что определяемые основные характеристики КА в результате работы представленного программного комплекса практически совпадают с опубликованными в открытом доступе материалами. Что фактически является апробацией данного программного комплекса.

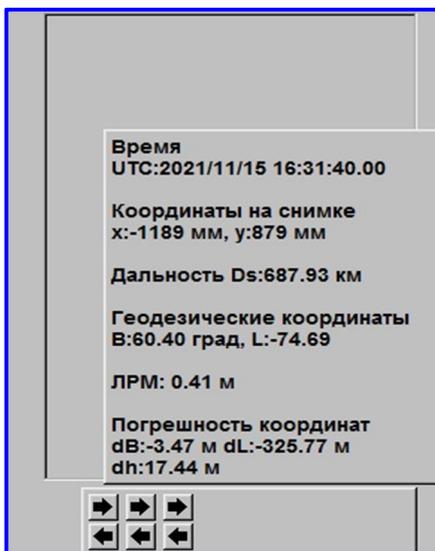


Рис. 5. Диалоговое окно с рассчитанными параметрами для $x = -1189$ мм и $y = 879$ мм на фокальной плоскости

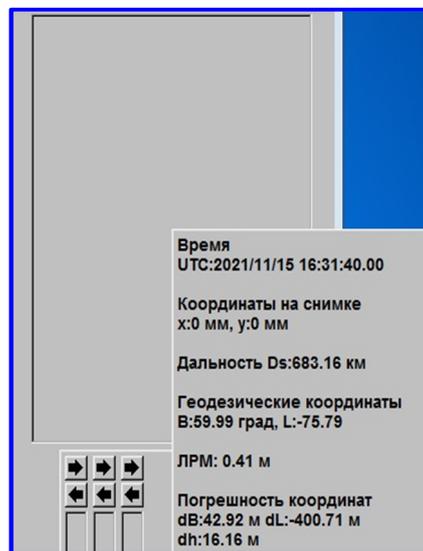


Рис. 6. Диалоговое окно с рассчитанными параметрами для $x = 0$ мм и $y = 0$ мм на фокальной плоскости

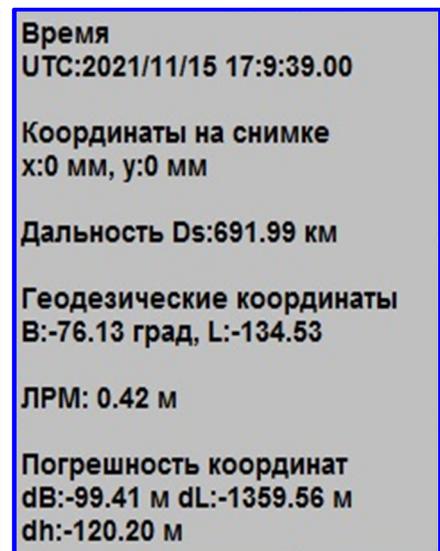


Рис. 7. Результаты моделирования съемки в надир при $B = -76,13^\circ$ и $L = -134,53^\circ$

Таблица

Исходные данные космического аппарата GeoEye-1

Вектор состояния на 15/11/2022 15:59:00 UTC					
Км			Км\с		
X	Y	Z	\dot{X}	\dot{Y}	\dot{Z}
5945,065	3810,753	-59,576	0,627	-0,866	7,434
ΔX	ΔY	ΔZ	$\Delta \dot{X}$	$\Delta \dot{Y}$	$\Delta \dot{Z}$
100 м	100 м	100 м	10 м/с	10 м/с	10 м/с
Фокусное расстояние, м	Угол обзора, °	Размер пикселя, мкм	Полоса захвата (в надир), км		GSD, м
13,3	1,28	8,00	15,2		0,41

Время UTC:2021/11/15 16:11:59.00	Время UTC:2021/11/15 16:11:59.00
Координаты на снимке x:0 мм, y:0 мм	Координаты на снимке x:-148 мм, y:148 мм
Дальность Ds:753.18 км	Дальность Ds:748.09 км
Геодезические координаты B:49.06 град, L:87.48	Геодезические координаты B:48.97 град, L:87.37
ЛРМ: 0.49 м	ЛРМ: 0.49 м
Погрешность координат dB:143.01 м dL:560.88 м dh:162.74 м	Погрешность координат dB:145.97 м dL:542.77 м dh:162.74 м

Рис. 8. Результаты съемки в центре фокальной плоскости и на краю при углах крена 10° , тангажа 20° и курса 2°

Заключение

Разработанный программный комплекс позволяет вычислять основные характеристики КА ДДЗ с ОЭА, а именно ЛРМ, ПОКТ и ШПО/ШПЗ, в зависимости от текущего положения КА и его ориентации на определенный момент времени, а также проведение тестового расчета для подтверждения правильного функционирования.

Данный программный комплекс возможно использовать в работах АО «Корпорация «ВНИИЭМ» на ранних этапах проектирования космических аппаратов и космических систем ДЗЗ, позволяя минимизировать число возможных ошибок. При разработке программы дополнительно учитывались [7, 8].

Поступила в редакцию 16.12.2021

Алексей Олегович Бабаков, инженер, т. 8 (495) 366-16-01, e-mail: babakovalexey@yandex.ru.

Сергей Александрович Новоселов, инженер.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

SOFTWARE COMPLEX FOR PRIOR CALCULATION OF MAIN CHARACTERISTICS OF THE SPACECRAFT OF OPTO-ELECTRONIC EARTH OBSERVATION

A. O. Babakov, S. A. Novoselov

The software complex for a prior calculation of the main tactical and technical characteristics of a spacecraft with a linear resolution on the area, errors in determining the coordinates of points on the area, width of the swath and survey with a limited list of parameters of opto-electronic equipment, is considered. An example of calculation for GeoEye-1 with corresponding results is shown.

Keywords: opto-electronic equipment, spacecraft, Earth remote sensing, linear resolution on the area, modulation transfer function, errors in determining the coordinates of points on the area, width of the survey, width of the swath.

References

1. Computer technologies for simulating and animating the movement of Earth survey satellite / Somov S. E [et al.] // Analytical mechanics, stability and control : Proceedings of X International Chetaev Conference. – Kazan : Kazan National Re-

Литература

1. Компьютерные технологии имитации и анимации движения спутника землеобзора / С. Е. Сомов, Т. Е. Сомова, С. А. Бутырин // Аналитическая механика, устойчивость и управление : Труды X международной Четаевской конференции. – Казань : КНИУ им. А. Н. Туполева, 2012. – Т. 4. – С. 278 – 281.
2. Крылов В. И. Космическая геодезия / В. И. Крылов. – Москва : Недра, 2002. – 170 с.
3. Урмаев М. С. Орбитальные методы космической геодезии / М. С. Урмаев. – Москва : Недра, 1981. – 256 с.
4. Еремеев В. В. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / В. В. Еремеев. – Москва : Физматлит, 2015. – 460 с.
5. GeoEye-1 (OrbView-5) / ESA [сайт]. – 2002. – URL : <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/g/geoeye-1> (дата обращения: 10.11.2021).
6. Формирование требований к динамике космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / К. А. Занин, М. Н. Хайлов // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2009. – № 5. – С. 32 – 37.
7. Априорная оценка кинематических смещений и погрешностей координат точек изображения при сканерной съемке Земли с КА / В. Я. Геча, М. Ю. Жилнев, А. О. Бабаков // Материалы шестой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». Приложение за 2018 год. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2018. – С. 110 – 118.
8. Формулы расчета кинематических параметров орбитальной съемки планеты бортовой оптико-электронной аппаратурой космического аппарата / В. Я. Геча, М. Ю. Жилнев, С. Ю. Горчаков [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2019. – Т. 173. – № 6. – С. 23 – 32.

- search Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, 2012. – Vol. 4. – P. 278 – 281.
2. Krylov V. I. Space geodesy / V. I. Krylov. – Moscow : Nedra, 2002. – 170 p.
 3. Urmaev M. S. Orbital methods of space geodesy / M. S. Urmaev. – Moscow : Nedra, 1981. – 256 p.
 4. Ereemeev V. V. Modern technologies of data processing of Earth remote sensing / V. V. Ereemeev. – Moscow : Fizmatlit, 2015. – 460 p.
 5. GeoEye-1 (OrbView-5) / ESA [website]. – 2002. – URL : <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/g/geoeye-1> (date of access: 10.11.2021).
 6. Formation of requirements to the dynamics of Earth remote sensing spacecrafts / K. A. Zanin, M. N. Khailov // All-Russian Scientific-Technical Journal ‘Polyot’ (‘Flight’). – 2009. – No. 5. – P. 32 – 37.
 7. Prior estimation of kinematic displacements and errors of the image points coordinates during Earth scanner imaging from spacecraft / V. IA. Gecha, M. IU. Zhilenev, A. O. Babakov // Proceedings of the Sixth International Scientific and Technical Conference ‘Current problems of creating space systems for Earth remote sensing’. Appendix from 2018. – Moscow : VNIEM Corporation JSC, 2018. – P. 110 – 118.
 8. Formulas for calculating the kinematic parameters of the planet orbital imaging by onboard opto-electronic equipment of the spacecraft / V. IA. Gecha, M. IU. Zhilenev, S. IU. Gorchakov [et. al] // Matters of Electromechanics. VNIEM Proceedings. – 2019. – Vol. 173. – No. 6. – P. 23 – 32.

*Aleksei Olegovich Babakov, Engineer, tel. +7 (495) 366-16-01,
e-mail: babakovalexey@yandex.ru.
Sergei Aleksandrovich Novoselov, Engineer.
(JC «VNIEM Corporation»).*