

УДК 520.62

ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ ИЗОБРАЖЕНИЙ АВАРИЙНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А.И. Алтухов^а, Д.С. Коршунов^а, Е.И. Шабakov^а

^а Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация
Адрес для переписки: Korshunov.Denis@rambler.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 26.03.15, принята к печати 23.04.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-3-405-410

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Алтухов А.И., Коршунов Д.С., Шабakov Е.И. Требования к качеству изображений аварийных космических аппаратов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 3. С. 405–410.

Аннотация

Предмет исследования. Предложен метод формирования требований к качеству изображений аварийных космических аппаратов. Изображения получаются средствами дистанционного зондирования околоземного космического пространства орбитального базирования в видимом диапазоне электромагнитного излучения. Метод базируется на совместном учете условий космической съемки, характеристик аппаратуры наблюдения, основных конструктивных особенностей наблюдаемых космических аппаратов и задачах орбитальной инспекции.

Метод. Показателем качества является прогнозируемое линейное разрешение изображения, которое позволяет сформировать полное представление об изобразительных свойствах космического снимка, полученного оптико-электронной системой наблюдающего спутника. Формулирование требований к численному значению данного показателя предлагается выполнять с учетом свойств системы дистанционного зондирования, формирующей изображения в условиях космического пространства, и свойств наблюдаемого аварийного космического аппарата: габаритных размеров, конструкции платформы спутника, мест размещения бортовой аппаратуры. Для реализации метода авторами разработана модель прогнозирования требований к линейному разрешению изображений аварийных космических аппаратов, позволяющая выбрать интервалы космической съемки и получить космические снимки необходимо для интерпретации качества.

Основные результаты. С целью проверки работоспособности предложенной модели проведены расчеты численного значения линейного разрешения изображения, обеспечивающего успешное решение задач определения грубых повреждений конструкции космических аппаратов и выявления изменений их пространственной ориентации. В качестве исходных данных использовались габаритные размеры и геометрические примитивы, соответствующие форме условно инспектируемых космических аппаратов «Ресурс-П», «Канопус-В», «Электро-Л». Получены численные значения линейного разрешения изображений, обеспечивающие успешное решение задач определения грубых повреждений конструкции космических аппаратов.

Практическая значимость. Метод может найти применение в системе планирования работы средств орбитальной инспекции, в частности, при решении баллистических задач. Это позволит оптимизировать рабочую программу бортовой оптико-электронной аппаратуры и продлит срок эксплуатации космической техники.

Ключевые слова

орбитальная инспекция, линейное разрешение изображения, идентификация объекта, прогнозирование качества космического снимка.

REQUIREMENTS FOR IMAGE QUALITY OF EMERGENCY SPACECRAFTS

A.I. Altukhov^a, D.S. Korshunov^a, E.I. Shabakov^a

^а Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation

Corresponding author: Korshunov.Denis@rambler.ru

Article info

Received 26.03.15, accepted 23.04.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-3-405-410

Article in Russian

For citation: Altukhov A.I., Korshunov D.S., Shabakov E.I. Requirements for image quality of emergency spacecrafts. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 3, pp. 405–410.

Abstract

Subject of research. The paper deals with the method for formation of quality requirements to the images of emergency spacecrafts. The images are obtained by means of remote sensing of near-earth space orbital deployment in the visible range

of electromagnetic radiation. The method is based on a joint taking into account conditions of space survey, characteristics of surveillance equipment, main design features of the observed spacecrafts and orbital inspection tasks.

Method. Quality score is the predicted linear resolution image that gives the possibility to create a complete view of pictorial properties of the space image obtained by electro-optical system from the observing satellite. Formulation of requirements to the numerical value of this indicator is proposed to perform based on the properties of remote sensing system, forming images in the conditions of outer space, and the properties of the observed emergency spacecraft: dimensions, platform construction of the satellite, on-board equipment placement. For method implementation the authors have developed a predictive model of requirements to a linear resolution for images of emergency spacecrafts, making it possible to select the intervals of space shooting and get the satellite images required for quality interpretation.

Main results. To verify the proposed model functionality we have carried out calculations of the numerical values for the linear resolution of the image, ensuring the successful task of determining the gross structural damage of the spacecrafts and identifying changes in their spatial orientation. As input data were used with dimensions and geometric primitives corresponding to the shape of deemed inspected spacecrafts: Resurs-P", "Canopus-B", "Electro-L". Numerical values of the linear resolution images have been obtained, ensuring the successful task solution for determining the gross structural damage of spacecrafts.

Practical significance. The method is usable in the system of work planning tools for orbital inspection, in particular, the solution of ballistic tasks. This gives the possibility to optimize the working program for on-board opto-electronic equipment and prolongs the lifetime of space-system engineering.

Keywords

orbital inspection, line image resolution, object identification, quality prediction of space survey.

Введение

С увеличением количества неуправляемых объектов искусственного происхождения в околоземном космическом пространстве, столкновение с которыми приводит к повреждению дорогостоящей космической техники, особую важность приобретает задача инспекции космических аппаратов (КА) оптико-электронными средствами наблюдения орбитального базирования [1–3]. Цель орбитального инспектирования состоит в оценивании технического состояния спутников, своевременном обнаружении грубых повреждений их конструкции, возникших вследствие физического воздействия техногенного характера, а также в выявлении изменений пространственной ориентации КА [1, 4]. Успешный опыт применения космических систем дистанционного зондирования Земли для поиска повреждений космической техники и большой объем исследований в этой сфере свидетельствуют о том, что космические снимки высокого разрешения могут служить одним из источников информации о техническом состоянии КА (рис. 1, а). Сегодня технологии получения снимков высокого разрешения с помощью средств наблюдения в видимом диапазоне электромагнитного излучения орбитального базирования активно создаются и развиваются в России, США, Франции и в других странах.

Процесс получения снимка одного КА с другого требует учета целого ряда факторов, таких как фазовый угол Солнца [5, 6], взаимное баллистическое построение орбит спутников [3], скорость движения оптического изображения в фокальной плоскости оптико-электронной системы наблюдающего КА [2], и других особенностей съемки. Например, при чрезмерном сближении КА увеличиваются искажения, вызванные увеличением относительной скорости движения оптического изображения в фокальной плоскости оптико-электронной системы (рис. 1, б). В случае большой дальности съемки линейное разрешение космического снимка может оказаться недостаточным (рис. 1, в) для его тематической обработки.

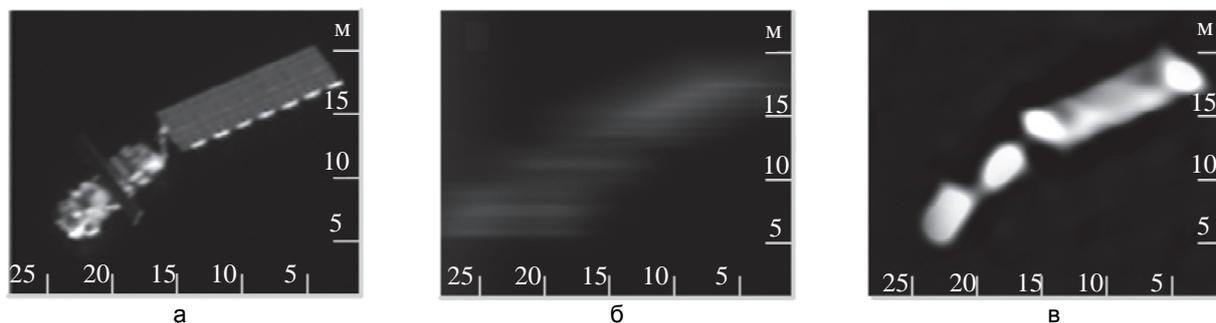


Рис. 1. Результаты моделирования космического снимка аварийного спутника «ENVIAT»: изображение пригодное для обработки (а); «смазанное» изображение (б); изображение с низким пространственным разрешением (в)

Влияние особенностей космической съемки на качество получаемого изображения можно оценить по частотно-контрастной характеристике звеньев оптико-электронной системы, построенной с учетом реальных условий наблюдения [3, 7–13]. Практическое использование такого подхода позволяет решить задачу прогнозирования качества космического снимка по численному значению линейного разрешения на изображении [2, 3, 14]. Данный показатель характеризует изобразительные свойства системы форми-

рования изображения, но при этом никак не характеризует качество интерпретации полученного снимка. На результат интерпретации космического снимка оказывают влияние габаритные размеры наблюдаемого КА, которые могут изменяться от десятков сантиметров до десятков метров, многообразие конструкторских решений, определяющие форму КА и места размещения бортовой аппаратуры. В работах [3, 7–13] данные параметры при прогнозировании качества получаемого снимка не учитываются.

В настоящей работе предложен метод формирования требований к качеству космических снимков аварийных КА, получаемых средствами орбитальной инспекции, который учитывает условия космической съемки, характеристики аппаратуры наблюдения, основные конструктивные особенности наблюдаемого КА и задачи орбитальной инспекции.

Модель прогнозирования линейного разрешения изображений аварийных космических аппаратов

Оценить качество космического снимка КА, полученного в реальных условиях наблюдения средствами орбитальной инспекции, можно с помощью линейного разрешения изображения (ЛРИ) $L_{\text{ЛРИ}}$ [2, 3, 10–12], характеризующего линейный размер наименьшего объекта, различимого на снимке. Данный показатель вычисляется по формуле

$$L_{\text{ЛРИ}} = \frac{D_{\text{н}}}{2R_{\text{ОЭС}}f}, \quad (1)$$

где $D_{\text{н}}$ – дальность до объекта съемки; f – фокусное расстояние; $R_{\text{ОЭС}}$ – разрешающая способность оптико-электронной системы.

В формуле (1) разрешающая способность и фокусное расстояние оптико-электронной системы показывают, как аппаратура наблюдения КА-инспектора передает изображение объекта в реальных условиях съемки. Численное значение разрешающей способности определяется с использованием частотно-контрастной характеристики и порога контрастной чувствительности фотоприемного устройства [3, 13]. Частотно-контрастная характеристика показывает изменение контраста изображения с учетом освещенности объекта, скорости движения оптического изображения в фокальной плоскости объектива и времени экспонирования фотоприемного устройства [2]. Дальность съемки $D_{\text{н}}$ позволяет учесть баллистическое построение орбит спутников.

Связать конструктивные особенности наблюдаемого КА, задачи орбитальной инспекции с условиями космической съемки и характеристиками бортовой аппаратуры наблюдения можно, используя выражение

$$P = \exp\left[-\left(B\frac{L_{\text{ЛРИ}}}{A}\right)^2\right], \quad (2)$$

где P – вероятность опознавания объекта съемки; A – геометрический размер объекта съемки; B – коэффициент опознавания формы объекта съемки.

Аргументы формулы (2) и их соотношения позволяют учесть влияние самых важных факторов, определяющих качество результатов интерпретации снимка. Вероятность опознавания объекта P характеризует изменение возможности идентификации элементов конструкции КА с учетом их формы и взаимного размещения. Геометрический размер A – это один из признаков, используемых при интерпретации космических снимков. Соотношение аргументов A и $L_{\text{ЛРИ}}$ выражает закономерность: чем больше геометрические размеры наблюдаемого КА и чем лучше изображение воспроизводит мелкие детали, тем достовернее результат интерпретации снимка.

Другой важный признак – форма инспектируемого КА. Спутники, схожие по габаритным размерам, но отличающиеся по форме конструкции, на снимке воспринимаются по-разному и идентифицируются с различной степенью достоверности. Влияние этого фактора принято выражать через коэффициент опознавания формы B . Придавая различные значения коэффициенту B , удается количественно характеризовать возможность идентификации объектов при равенстве других параметров (A и L).

Габаритные размеры опознаваемого КА известны и могут быть получены из технической документации. В качестве аргумента A принимается размер геометрической фигуры, которая минимально описывает форму платформы КА: диаметр окружности, диагональ прямоугольника или длина наибольшей его стороны и т.п. (рис. 2, а).

Величина коэффициента опознавания формы B определяется расчетным способом. Суть способа заключается в учете соотношений геометрических размеров простых объектов. Формула для расчета коэффициента опознавания формы B имеет следующий вид:

$$B = \sqrt{\frac{GR}{S}},$$

где G – периметр, рассчитываемый по контуру простого объекта; S – площадь простого объекта (рис. 2, б); R – среднее между радиусами окружностей, вписанной в контур и описанной вокруг контура простого объекта (рассчитывается по формуле [2]):

$$R = \frac{R_B + R_O}{2}.$$

Здесь R_B – радиус окружности, вписанной в контур простого объекта, R_O – радиус окружности, описанной вокруг контура простого объекта (рис. 2, в).

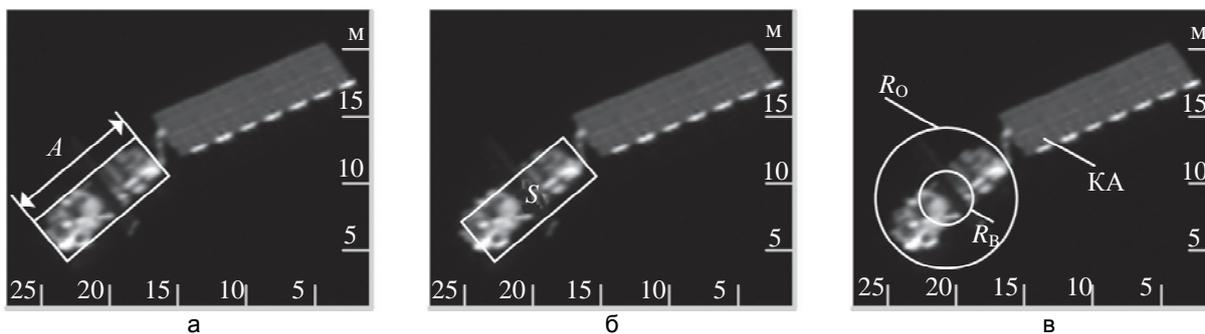


Рис. 2. К определению вероятности опознавания формы объекта: определение геометрического размера A объекта наблюдения по его изображению (а); определение площади S объекта наблюдения по его изображению (б); определение радиусов вписанной в контур R_B и описанной вокруг контура R_O объекта наблюдения окружностей по его изображению (в)

Из теории известно [2], что достоверное опознавание формы простого объекта возможно, если численное значение вероятности опознавания составляет $P \geq 0,75$. Таким образом, можно предположить, что при известных геометрических размерах A наблюдаемого КА, коэффициенте опознавания формы B и численном значении вероятности опознавания $P \geq 0,75$ можно найти требуемое (достаточное) для достоверной интерпретации снимка линейное разрешение. Для этого выражение (2) приведем к виду

$$L_{\text{ЛРИ треб}} = \sqrt{-\ln P} \cdot A/B,$$

где $L_{\text{ЛРИ треб}}$ – минимальное ЛРИ, необходимое для решения задачи инспектирования.

Проверка работоспособности модели

С целью проверки работоспособности предложенной модели проведены расчеты численного значения ЛРИ, обеспечивающего успешное решение задач определения грубых повреждений конструкции КА и определения изменения пространственной ориентации КА. В качестве исходных данных использовались габаритные размеры и геометрические примитивы, соответствующие форме условно инспектируемых КА «Ресурс-П», «Канопус-В», «Электро-Л» (рис. 3).

Результаты расчетов, приведенные в таблице, можно интерпретировать следующим образом. Оптико-электронная система КА-инспектора в заданных условиях наблюдения позволяет получить космические снимки инспектируемых КА с прогнозируемым линейным разрешением изображения $L_{\text{ЛРИ}} = 1,6$ м. Космическая съемка каждого КА выполняется на дальности $D_H = 200$ км. Так как значения аргументов формулы (1) постоянны, прогнозируемое качество снимка не меняется. Оптико-электронная система КА-инспектора применяется для съемки спутников разных размеров и геометрической формы, следовательно, требования к качеству снимка должны быть разными. Данное предположение подтверждается расчетами, выполненными по формуле (2). Например, численное значение ЛРИ, обеспечивающее успешное решение задач определения грубых повреждений конструкции КА «Ресурс-П» и выявления изменений его пространственной ориентации, должно быть не хуже $L_{\text{ЛРИ треб}} \leq 2,65$ м. В случае съемки КА «Канопус-В» при таких же условиях съемки $L_{\text{ЛРИ треб}} \leq 0,82$ м, а КА «Электро-Л» – $L_{\text{ЛРИ треб}} \leq 2,42$ м.



Рис. 3. Внешний вид инспектируемых космических аппаратов

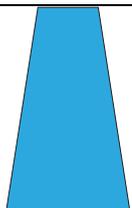
№ п/п	КА	Геометрическая фигура, соответствующая форме КА		Габаритные размеры, м	Требуемое линейное разрешение $L_{ЛРИ\text{ треб.}}$, м	Прогнозируемое линейное разрешение $L_{ЛРИ}$, м
1	«Ресурс-П»	Трапеция		Ширина – 2,8 Длина – 8,0	2,65	1,6
2	«Канопус-В»	Прямоугольник		Ширина – 0,9 Длина – 0,75	0,82	1,6
3	«Электро-Л»	Прямоугольник		Ширина – 2,5 Длина – 5,5	2,42	1,6

Таблица. Результаты расчетов линейного разрешения изображения

Сравнивая показатели прогнозируемого и требуемого качества изображений, можно сделать вывод, что в заданных условиях наблюдения съемка КА «Канопус-В» не позволит получить изображения, пригодные для интерпретации. Таким образом, съемку КА «Канопус-В» из плана рабочей программы бортовой аппаратуры КА-инспектора можно исключить, а освободившийся ресурс направить для решения других задач.

Заключение

Предложенный метод формирования требований к качеству изображений, в основе которого лежит учет условий космической съемки, характеристик аппаратуры наблюдения, основных конструктивных особенностей наблюдаемых космических аппаратов и задач орбитальной инспекции, позволяет выбирать интервалы космической съемки, обеспечивающие получение космических снимков аварийных космических аппаратов высокого качества. Достоинством метода является то, что при прогнозировании качества снимка учитываются не только свойства системы, формирующей изображения в космосе, но и свойства наблюдаемых космических аппаратов: габаритные размеры, конструкции платформы спутника, места размещения бортовой аппаратуры. Исходя из своего назначения, метод может применяться в системе планирования работы средств орбитальной инспекции, в частности, при решении баллистических задач. Это позволит оптимизировать рабочую программу бортовой оптико-электронной аппаратуры и продлит срок эксплуатации космической техники.

Литература

1. Кучейко А.А. Уникальное применение спутника ДЗЗ – орбитальная инспекция [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.scanex.ru/ru/news/News_Preview.asp?id=n15525031, свободный. Яз. рус. (дата обращения 28.02.2013).
2. Алтухов А.И., Коршунов Д.С., Шабakov Е.И. Метод повышения качества снимков космических объектов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 4 (92). С. 35–40.
3. Алтухов А.И., Гнусарев Н.В., Коршунов Д.С. Прогнозирование качества изображений космических объектов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 3 (85). С. 36–41.
4. Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года. М.: Федеральное космическое агентство, 2006. 72 с.
5. Емельянов С.Г., Атакищев О.И., Алтухов А.И., Гнусарев Н.В., Коршунов Д.С. К вопросу учета условий освещенности при съемке космических объектов фотографическими средствами // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 3–1 (42). С. 58а–62.
6. Гнусарев Н.В. Геодезическое и баллистическое обеспечение космических систем дистанционного зондирования. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2008. 220 с.

7. Chertov A.N., Gorbunova E.V., Korotaev V.V., Peretyagin V.S., Serikova M.G. Simulation of the multicomponent radiation source with the required irradiance and color distribution on the flat illuminated surface // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2012. V. 8429. Art. 84290D. doi: 10.1117/12.922104
8. Korotaev V.V., Timofeev A.N., Ivanov A.G. Problems in the development of optoelectronic systems for monitoring displacements of large-sized objects // Journal of Optical Technology. 2000. V. 67. № 4. С. 336–339.
9. Алтухов А.И., Дудин Е.А., Титков Б.В. Технология компрессии изображений больших размеров // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2009. Т. 1. № 72. С. 46–51.
10. Авдеев С.П. Анализ и синтез оптико-электронных приборов. СПб.: Правда, 2000. 680 с.
11. Хартов В.В., Ефанов В.В., Занин К.А. Основы проектирования орбитальных оптико-электронных комплексов: Учеб. пособие. М.: Издательство МАИ, 2011. 127 с.
12. Занин К.А. Выбор параметров оптико-электронной космической системы наблюдения по качеству изображения // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2007. №11. С. 30–37.
13. Цыцулин А.К. Телевидение и космос: Учеб. пособие. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003. 228 с.
14. Григорьев А.Н., Коршунов Д.С., Беляев А.С. Прогнозирование качества космических снимков космических систем дистанционного зондирования // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2010. № 629. С. 143–147.

<i>Алтухов Александр Иванович</i>	– кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, aai_51@mail.ru
<i>Коршунов Денис Сергеевич</i>	– кандидат технических наук, старший преподаватель, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, Korshunov.Denis@rambler.ru
<i>Шабakov Евгений Иванович</i>	– кандидат технических наук, доцент, доцент, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, shabakov.evgeniy@mail.ru
<i>Alexander I. Altukhov</i>	– PhD, Associate professor, Department head, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, aai_51@mail.ru
<i>Denis S. Korshunov</i>	– PhD, Senior lecturer, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, Korshunov.Denis@rambler.ru
<i>Evgeniy I. Shabakov</i>	– PhD, Associate professor, Associate professor, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, shabakov.evgeniy@mail.ru