

Метод определения интервалов съемки аварийных космических аппаратов

Method to define imaging time frames for faulty space vehicles

Алтухов / Altuchov A.

Александр Иванович

(aai_51@mail.ru)

кандидат технических наук, доцент.

ФГКВОУ ВПО «Военно-космическая академия

имени А. Ф. Можайского» МО РФ

(ВКА им. А. Ф. Можайского),

заведующий кафедрой физики.

г. Санкт-Петербург

Коршунов / Korshunov D.

Денис Сергеевич

(Korshunov.Denis@rambler.ru)

кандидат технических наук.

ВКА им. А. Ф. Можайского,

старший преподаватель кафедры

оптико-электронных средств.

г. Санкт-Петербург

Шабakov / Shabakov E.

Евгений Иванович

кандидат технических наук, доцент.

ВКА им. А. Ф. Можайского,

доцент кафедры оптико-электронных средств.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: орбитальная инспекция – orbital inspection; линейное разрешение изображения – linear image resolution; идентификация объекта – target identification; прогнозирование качества космического снимка – quality forecast of space images.

В статье предложен метод определения интервалов съемки аварийных космических аппаратов в космосе с целью обнаружения повреждений, полученных в результате столкновений с космическим мусором. В основу метода положена идея выбора времени съемки по результатам сравнения прогнозируемого и требуемого линейного разрешения изображения. Научная новизна метода определяется возможностью прогнозирования качества снимка и формулирования требований к нему с учетом условий съемки, характеристик аппаратуры, конструктивных особенностей наблюдаемых объектов. Практическая значимость метода определяется возможностью его применения для планирования работы средств орбитальной инспекции.

The article describes a method to define time frames for imaging faulty space vehicles in flight needed to detect damage suffered in the result of colliding with space debris. The method is based on the idea of choosing the time frame according to results of comparing the forecasted vs. needed linear resolution of the image. Scientific novelty of the method lies with a possibility to forecast image quality and formulate its requirements with the account of imaging conditions, equipment features and design particularities of vehicles tracked. Practical validity of the method is that it may be used to plan the functioning of orbital inspection instrumentation.

Введение

Увеличение количества случаев повреждения космических систем в результате столкновений с неуправляемыми объектами искусственного происхождения является свидетельством того, что техногенные орбитальные частицы и фрагменты на сегодняшний день представляют собой реальную угрозу для орбитальных группировок. В этих условиях становится актуальной задача инспектирования космических аппаратов (КА) с целью своевременного обнаружения внешних повреждений вследствие физического воздействия техногенного характера и принятия мер по их устранению [1]. Одним из решений данной задачи является получение детальных изображений КА в видимом диапазоне спектра средствами наблюдения орбитального базирования (рис. 1).

Процесс съемки одного КА другим требует учета многих факторов: фазового угла Солнца [2], баллистического построения орбит спутников [3], скорости движения изображения в фокальной плоскости оптико-электронной системы КА-инспектора [4] и др. Так, например, при чрезмерном сближении КА из-за увеличения относительной скорости движения на изображении появляется «смаз» (рис. 1а). В случае большой дальности съемки линейное разрешение полученного снимка (рис. 2б) сильно затрудняет его интерпретацию.

Влияние условий космической съемки на качество получаемого снимка можно оценить по частотно-контрастной характеристике оптико-электронной системы КА-инспектора [2–9]. Потому такой подход

может быть положен в основу прогнозирования качества космических снимков и формирования требований к нему.

Модель прогнозирования качества изображений

В различных условиях наблюдения оптико-электронная система формирует снимки различного качества с точки зрения передачи структуры и формы объекта съемки (ОС). С целью прогнозирования качества будущего снимка применим модель прогнозирования линейного разрешения изображения (рис. 3).

Суть прогнозирования заключается в оценивании передаточных свойств звеньев оптико-электронной системы по частотно-контрастной характеристике (ЧКХ). Определить ЧКХ системы $T_{ОЭС}(v)$ возможно, используя выражение [10, 11]:

$$T_{ОЭС}(v) = T_{Об}(v)T_{ФПУ}(v)T_C(v), \quad (1)$$

где $T_{Об}(v)$ – ЧКХ объектива; $T_{ФПУ}(v)$ – ЧКХ фотоприемного устройства; $T_C(v)$ – ЧКХ сдвига изображения.

Сдвиг изображения является одной из главных причин снижения качества космического снимка. Уменьшить «смаз» возможно путем правильного выбора времени экспонирования фотоприемного устройства (ФПУ) в процессе космической съемки [5, 6].

Выбор времени экспонирования фотоприемного устройства

При высоких взаимных скоростях наблюдающего и наблюдаемого КА сдвиг изображения, величина которого определяется по формуле [3]:

$$H_C = V_{И} T_Э, \quad (2)$$

где H_C – сдвиг изображения; $V_{И}$ – скорость движения изображения в плоскости ФПУ; $T_Э$ – время экспонирования. Из формулы (2) следует, что сдвиг изображения можно уменьшить сокращением времени экспонирования. С другой стороны, из выражения [12, 13]:

$$H_Э = E T_Э \quad (3)$$

следует, что сокращение времени экспонирования $T_Э$ при неизменной освещенности ФПУ E уменьшает экспозицию $H_Э$. Это приводит к получению снимков с малым контрастом и уменьшает вероятность их правильной интерпретации. Выбрать параметры съемки, обеспечивающие минимальный «смаз» на изображении, можно с использованием ЧКХ сдвига, которая определяется по формуле [10]:

$$T_C = \left[\frac{\sin \pi H_C \eta_0 v}{\pi H_C \eta_0 v} \frac{\sin \pi H_C (1 - \eta_0) v}{\pi H_C (1 - \eta_0) v} \right], \quad (4)$$

где T_C – ЧКХ сдвига изображения; η_0 – оптический коэффициент полезного действия фотозатвора; v – пространственная частота штрихов в поле полосовой миры.

Выбрать параметры съемки, обеспечивающие получение контрастного изображения, можно, используя выражение порогового контраста КПОР, регистрируемого ФПУ, значение которого вычисляется по формуле [13]:

$$K_{ПОР}^2 = \frac{2 \cdot \Psi_{ПОР}^2}{E_0 \cdot (k_0 + k_\Phi) \cdot (D/f)^2 \cdot \tau \cdot N_\Phi \cdot \eta \cdot \Delta \cdot T_Э}, \quad (5)$$

где $\Psi_{ПОР}$ – пороговое отношение сигнал/шум, при котором возможна интерпретация изображения; D – диаметр

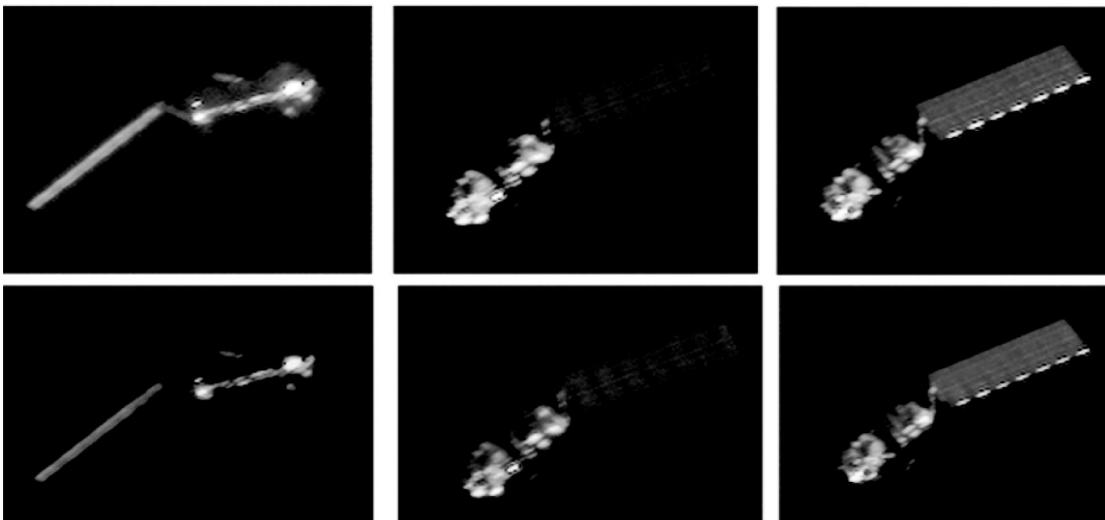


Рис. 1. Снимки аварийного КА «ENVISAT»

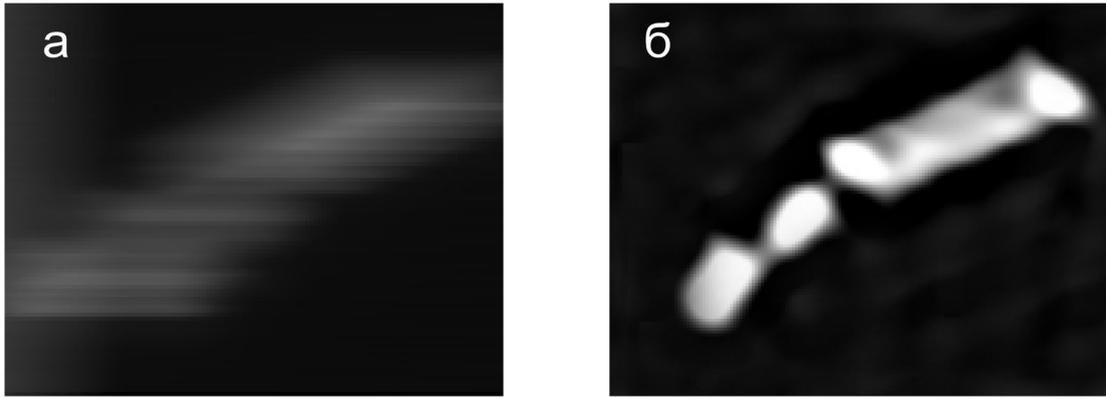


Рис. 2. Результаты моделирования космического снимка КА «ENVISAT»



Рис. 3. Звенья оптико-электронной системы

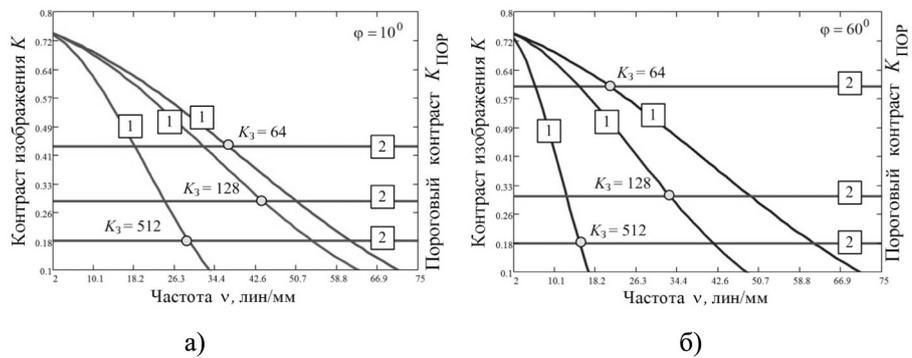


Рис. 4. Результаты моделирования разрешающей способности оптико-электронной системы

входного отверстия объектива; k_f – коэффициент отражения фона (фонового элемента ОС); k_o – коэффициент отражения элемента ОС; η – квантовый выход ФПУ; N_f – потенциально доступное число фотонов; Δ – площадь элемента ФПУ; τ – коэффициент пропускания света объективом; f – фокусное расстояние.

Совместный учет влияния на сдвиг и контраст изображения времени экспонирования ФПУ позволяет повысить качество снимка, что подтверждается результатами моделирования, представленными на рисунках 4а, 4б.

Результаты моделирования подтверждают предположение о том, что сокращение времени экспонирования повышает передаточные характеристики звеньев бортовой аппаратуры наблюдения (кривые 1) в результате уменьшения сдвига изображения. Вместе с этим повышается пороговый контраст, регистрируемый ФПУ (кривые 2), вследствие уменьшения экспозиции. По результатам анализа разрешающей способности оптико-электронной системы, которая определяется значением пространственной частоты в точке пересечения ЧКХ системы и порогового контраста, позволяет выбрать время экспонирования, обеспечивающее наилучшее прогнозируемое качество снимка. Оценить прогнозируемое качество снимка, полученного в реальных условиях эксплуатации, возможно с помощью линейного разрешения изображения (ЛРИ). Значение данного показателя вычисляется по формуле [12, 14]:

$$L_{\text{ЛРИ}} = \frac{D_H}{2 R_{\text{ОЭС}} f}, \quad (6)$$

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

Показатель качества ЛРИ также может использоваться при формировании требований к качеству снимка. Наличие численных значений прогнозируемого и требуемого ЛРИ позволяет сформировать интервалы съемки ОС.

Модель формирования требований к линейному разрешению изображений

Требования к качеству снимка зависят от габаритных размеров наблюдаемого КА, многообразия конструктивных решений, определяющих форму КА, и мест размещения бортовой аппаратуры. Связать задачи орбитальной инспекции с конструктивными особенностями наблюдаемого КА, с условиями космической съемки и характеристиками бортовой аппаратуры наблюдения возможно, используя выражение:

$$P = \exp \left[- \left(B \frac{L_{\text{ЛРИ}}}{A} \right)^2 \right], \quad (7)$$

где P – вероятность решения задачи, A – геометрический размер объекта съемки, B – коэффициент формы объекта съемки.

Аргументы формулы (7) и их соотношения позволяют учесть влияние самых важных факторов, определяющих результаты интерпретации снимка. Вероятность решения задачи 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 формы B . Придавая различные значения коэффициенту B , удается количественно характеризовать возможность идентификации объектов при равенстве других параметров (A и L).

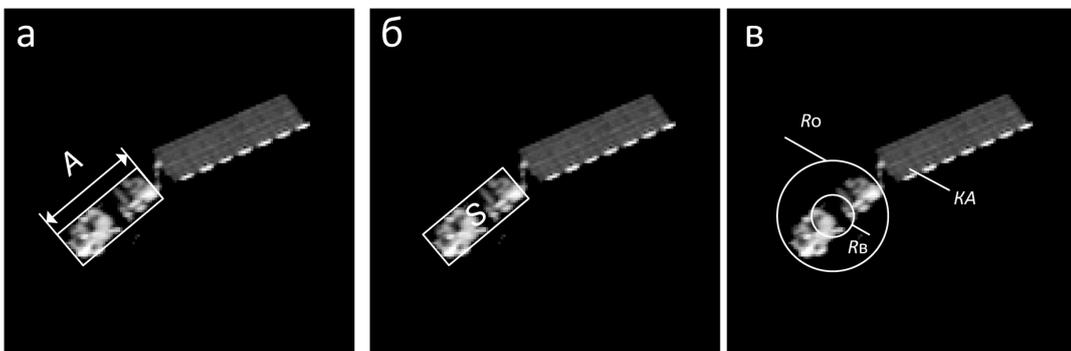


Рис. 5. К определению вероятности решения задачи

Габаритные размеры 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. 5а).

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

$$B = \sqrt{\frac{GR}{S}}, \quad (8)$$

где G – периметр, рассчитываемый по контуру простого объекта, S – площадь простого объекта (рис. 5б), R – среднее между радиусами окружностей, вписанной в контур и описанной вокруг контура простого объекта [6]:

$$R = \frac{R_B + R_O}{2}. \quad (9)$$

Здесь R_B – радиус окружности, вписанной в контур простого объекта, R_O – радиус окружности, описанной вокруг контура простого объекта (рис. 5 в).

Из теории известно [6], что достоверное опознавание ОС по его снимку возможно, если численное значение вероятности решения задачи составляет $P \geq 0,75$. Таким образом, при известных аргументах формулы (7), можно найти требуемое (необходимое для достоверной интерпретации снимка) ЛРИ. Для этого выражение (7) приведем к виду:

$$L_{\text{ЛРИ треб}} = \sqrt{-\ln P} \cdot A/B, \quad (10)$$

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

С целью проверки работоспособности предложенного подхода проведены расчеты ЛРИ, обеспечивающего успешный поиск грубых повреждений конструкции КА и определения изменений в пространственной ориентации КА. В качестве исходных данных использовались габаритные размеры КА «Ресурс-П», «Канопус-В», «Электро-Л» (рис. 6). Для описания формы использовались геометрические примитивы, максимально соответствующие форме условно инспектируемых КА. Результаты вычислений приведены в таблице 1.

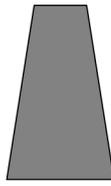
Результаты расчетов, приведенные в таблице 1, можно интерпретировать следующим образом. Оптико-электронная система КА-инспектора в заданных условиях наблюдения позволяет получить космические снимки инспектируемых КА с прогнозируемым ЛРИ $L_{\text{ЛРИ}} = 1.6$ м (форм. 6). Космическая съемка каждого КА выполняется на дальности $D_H = 200$ км. Значения аргументов формулы (6) 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 (10). Например, численное значение ЛРИ, обеспечивающее успешное определение грубых повреждений конструкции КА «Ресурс-П» и выявления изменений в 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.

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



Рис. 6. Внешний вид инспектируемых КА

Результаты формирования требований к ЛРИ инспектируемых КА

№ п/п	КА	Геометрическая фигура, соответствующая форме КА		Габаритные размеры, м	Требуемое линейное разрешение L треб, м	Прогноз. линейное разрешение L , 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

КА-инспектора следует исключить, а освободившийся ресурс направить для решения других задач.

Используя выражение:

$$L_{\text{ЛРИ}}(T_3) \leq L_{\text{ЛРИ треб}}(P), \quad (10)$$

можно сформировать интервалы съемки КА, в пределах которых ЛРИ не хуже требуемого значения, что позволяет получить снимки пригодные для интерпретации.

Выводы

В статье предложен подход к формированию интервалов съемки аварийных космических аппаратов средствами дистанционного зондирования околоземного космического пространства орбитального базирования в видимом диапазоне электромагнитного излучения. В рамках подхода сформулирована модель прогнозирования качества изображений, в которой выполняется оценивание передаточных свойств оптико-электронной системы и расчет показателей качества изображений с учетом условий орбитальной съемки, а именно с учетом относительных скоростей движения наблюдающего и наблюдаемого космических аппаратов.

Обоснован подход к повышению качества снимков, который базируется на идее совместного учета скорости

движения оптического изображения и времени экспонирования фотоприемного устройства при выборе экспозиции. Это позволяет путем допустимого сокращения времени экспонирования повысить передаточные характеристики информационного тракта оптико-электронной системы наблюдения, уменьшить величину «смаза», повысить резкость космических снимков, получить контрастное изображение.

Сформулирована модель формирования требований к линейному разрешению изображений, в основе которой лежит учет условий космической съемки, характеристик аппаратуры наблюдения, основных конструктивных особенностей наблюдаемых космических аппаратов и задач орбитальной инспекции.

Практическое применение предложенного подхода позволяет формировать интервалы съемки, обеспечивающие получение снимков аварийных КА необходимого для обработки качества и оптимизировать рабочую программу бортовой аппаратуры наблюдения средств дистанционного зондирования околоземного космического пространства орбитального базирования.

Литература

1. Кучейко, А. А. Уникальное применение спутника ДЗЗ – орбитальная инспекция [Электронный ресурс] / А.А. Кучейко.

– Режим доступа: http://www.scanex.ru/ru/news/News_Preview.asp?id=n15525031, свободный. – Загл. с экрана.

2. Алтухов, А. И. К вопросу учета условий освещенности при съемке космических объектов фотографическими средствами / А.И. Алтухов, Н.В. Гнусарев, Д.С. Коршунов // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2012. – Вып. 3. – С. 14–19.

3. Алтухов, А. И. Метод повышения качества снимков космических объектов / А.И. Алтухов, Д.С. Коршунов, Е. И. Шабаков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – № 4 (92). – С. 35–41.

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

5. Алтухов, А. И. Прогнозирование качества изображений космических объектов / А.И. Алтухов, Н.В. Гнусарев, Д.С. Коршунов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 3 (85). – С. 36–41.

6. Гнусарев, Н. В. Геодезическое и баллистическое обеспечение космических систем дистанционного зондирования / Н.В. Гнусарев. – СПб.: ВКА, 2008. – 220с.

7. Simulation of the multicomponent radiation source with the required irradiance and color distribution on the flat illuminated surface / Aleksandr N. Chertov [et al.] // Proc. of SPIE. – 2012. – Vol. 8429. – P. 84290d.

8. Korotaev, V. Problems in the development of optoelectronic systems for monitoring displacements of large-sized objects / V. Korotaev, A. Timofeev, A. Ivanov // Journal of Optical Technology. – 2000. – Vol. 67. – No. 4. – P. 336–339.

9. Алтухов, А. И. Технология компрессии изображений больших размеров / А.И. Алтухов, Е.А. Дудин, Б.В. Титков // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2009. – Т. 1. – № 72. – С. 46–51.

10. Хартов, В. В. Основы проектирования орбитальных оптико-электронных комплексов: учебное пособие / В.В. Хартов, В.В. Ефанов, К.А. Занин – М: Издательство МАИ, 2011. – 127с.

11. Занин, К. А. Выбор параметров оптико-электронной космической системы наблюдения по качеству изображения / К.А. Занин // Полет. – 2007. – № 11. – С. 30–37.

12. Цыцулин, А. К. Телевидение и космос: учебное пособие / А.К. Цыцулин. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003. – 228 с.

13. Григорьев, А. Н. Прогнозирование качества космических снимков космических систем дистанционного зондирования / А.Н. Григорьев, Д.С. Коршунов // Труды ВКА А. Ф. Можайского. – 2010. – Вып. 629. – Ч. 1. – С. 143–147.