

УДК 520.62

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СНИМКОВ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

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

^а Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия, Korshunov.Denis@rambler.ru

Аннотация. Представлен подход к повышению качества снимков космических объектов, получаемых бортовой аппаратурой наблюдения космических средств орбитальной инспекции в видимом диапазоне спектра электромагнитных волн. Подход базируется на совместном учете скорости движения космического аппарата наблюдения и наблюдаемого космического объекта в околоземном космическом пространстве при выборе времени экспонирования фотоприемного устройства, который осуществляется с использованием светосигнальной характеристики, определяющей оптимальную величину зарядового пакета, формируемого в приборе с зарядовой связью при его облучении. Это позволяет выбрать параметры работы бортовой аппаратуры наблюдения, обеспечивающие получение космических снимков, пригодных для интерпретации. В качестве показателя качества космических снимков используется линейное разрешение, дающее полное представление о геометрических свойствах объекта на снимке. Моделирование сценариев наблюдения космического объекта спутником-инспектором показало возможность повышения линейного разрешения космических снимков на 10–20% при движении космического аппарата по орбитам с углом некомпланарности менее 6° и на 40–50% при движении по орбитам с углом некомпланарности 45°. Предложенный подход к повышению качества снимков обеспечивает получение резких и контрастных изображений космических объектов опико-электронными средствами дистанционного зондирования космического базирования. Использование таких снимков позволяет своевременно обнаружить неисправности космической техники, полученные в результате ее эксплуатации в околоземном космическом пространстве. Также предложенный подход может найти применение на стадии проектирования космических систем опико-электронного наблюдения в моделях, используемых для оценивания возможностей информационного тракта съемочной аппаратуры.

Ключевые слова: орбитальная инспекция, качество космического снимка, экспозиция, смещение изображения, светосигнальная характеристика.

METHOD OF IMAGE QUALITY ENHANCEMENT FOR SPACE OBJECTS

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

^a Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia, Korshunov.Denis@rambler.ru

Abstract. The paper deals with an approach for image quality improvement of the space objects in the visible range of electromagnetic wave spectrum. The proposed method is based on the joint taking into account of both the motion velocity of the space supervisory apparatus and a space object observed in the near-earth space when the time of photo-detector exposure is chosen. The timing of exposure is carried out by light-signal characteristics, which determines the optimal value of the charge package formed in the charge-coupled device being irradiated. Thus, the parameters of onboard observation equipment can be selected, which provides space images suitable for interpretation. The linear resolving capacity is used as quality indicator for space images, giving a complete picture for the image contrast and geometric properties of the object on the photo. Observation scenario modeling of the space object, done by sputnik-inspector, has shown the possibility of increasing the linear resolution up to 10% - 20% or up to 40% - 50% depending on the non-complanarity angle at the movement along orbits. The proposed approach to the increase of photographs quality provides getting sharp and high-contrast images of space objects by the optical-electronic equipment of the space-based remote sensing. The usage of these images makes it possible to detect in time the space technology failures, which are the result of its exploitation in the near-earth space. The proposed method can be also applied at the stage of space systems design for optical-electronic surveillance in computer models used for facilities assessment of the shooting equipment information tract.

Keywords: orbital inspection, space photograph quality, exposure, image shift, light-signal feature.

Введение

Рост количества неуправляемых объектов искусственного происхождения в околоземном космическом пространстве (ОКП) и увеличение случаев повреждения космических систем в результате столкновений с ними является свидетельством того, что техногенные орбитальные частицы и фрагменты на сегодняшний день представляют собой реальную угрозу для орбитальных группировок. В этих условиях особо актуальной становится задача инспектирования космических аппаратов (КА) с целью своевременного обнаружения технических неисправностей вследствие физического воздействия техногенного характера для принятия мер по их устранению [1, 2]. Возможным решением данной задачи является получение детальных изображений КА в видимом диапазоне спектра средствами наблюдения орбитального базирования. Технологии получения снимков высокого разрешения с помощью космических средств наблюдения в настоящее время активно развиваются в России, США, Франции и в других странах [3–9].

Одной из проблем, возникающей при освоении технологий орбитальной инспекции, являются искажения, получаемые в результате смещения оптического изображения в плоскости приемника электромагнитного излучения (ЭМИ) за время полной выдержки при поступательном и угловом перемещении бортовой аппаратуры наблюдения или наблюдаемого космического объекта (КО), что приводит к получению «смазанных» космических снимков и снижению качества интерпретации [10, 11]. В современных

условиях уменьшить величину «смаза» можно путем выбора параметров орбит КА при планировании сеансов наблюдения, обеспечивающих минимальный угол некомпланарности между плоскостями орбит и требуемую дистанцию съемки. Другим способом уменьшения «смаза» изображения является сокращение времени выдержки в процессе космической съемки [11, 12]. Выбор параметров орбит спутников позволяет произвести космическую съемку в моменты времени, когда относительная скорость перемещения наблюдаемого КО и наблюдающего КА мала и практически не влияет на качество изображения. Однако выбрать такие моменты времени в реальных условиях полета КА сложно. Периодичность наблюдений при этом падает. Сокращение времени выдержки позволяет снизить величину «смаза», уменьшая экспозицию, но одновременно с этим ведет к уменьшению отношения сигнал/шум, что также ухудшает качество изображения.

В работе предложен подход к повышению качества снимков космических объектов путем выбора времени экспонирования приемника ЭМИ с учетом скорости относительного перемещения наблюдающего КА и наблюдаемого КО в ОКП. Выбор времени экспонирования позволяет уменьшить смещение оптического изображения при прогнозировании линейного разрешения изображения и выбрать параметры съемки, обеспечивающие получение космического снимка, пригодного для интерпретации.

Выбор экспозиции фотоприемного устройства при наблюдении космических объектов

Современные космические оптико-электронные системы дистанционного зондирования позволяют получать снимки КО в «динамическом» и «упреждающем» режимах съемки. В «динамическом» режиме съемки оптическая ось аппаратуры совпадает с наклонной дальностью на всем интервале наблюдения. В «упреждающем» режиме бортовая аппаратура ориентируется в пространстве таким образом, чтобы в момент съемки наблюдаемый КО попал в кадр. При высоких взаимных скоростях КА в обоих случаях наблюдается смещение изображения КО, величина которого определяется по формуле [10, 11]:

$$H_c = V_{и} T_{э}, \tag{1}$$

где H_c – смещение изображения; $V_{и}$ – скорость движения изображения в плоскости приемника электромагнитного излучения (ЭМИ) или скорость движения оптического изображения; $T_{э}$ – время полной выдержки. В выражении (1) скорость движения оптического изображения известна и зависит от угловой скорости относительного перемещения наблюдающего КА и наблюдаемого КО, а также от скорости разворота бортовой аппаратуры наблюдения при сопровождении КО. В соответствии с приведенной формулой, смещение изображения, полученное в результате его перемещения в плоскости приемника ЭМИ, может быть уменьшено путем сокращения времени полной выдержки. Данное предположение подтверждается графическими характеристиками (рис. 1), полученными при определении величины смещения изображения для времени полной выдержки 0,004–0,0001 с.

С другой стороны [10, 11], из выражения

$$H_c = E T_{э}$$

следует, что сокращение времени полной выдержки $T_{э}$ для заданной освещенности приемника электромагнитного излучения E уменьшает экспозицию H_c , что приводит к получению снимков с малой яркостью и низким контрастом и, как результат, снижает качество интерпретации. Для разрешения данного противоречия время полной выдержки предлагается выбрать таким образом, чтобы, с одной стороны достигалась достаточная экспозиция для получения снимка КО с необходимым для успешной интерпретации контрастом, а другой – смещение изображения не оказывало существенного влияния на качество космического снимка.

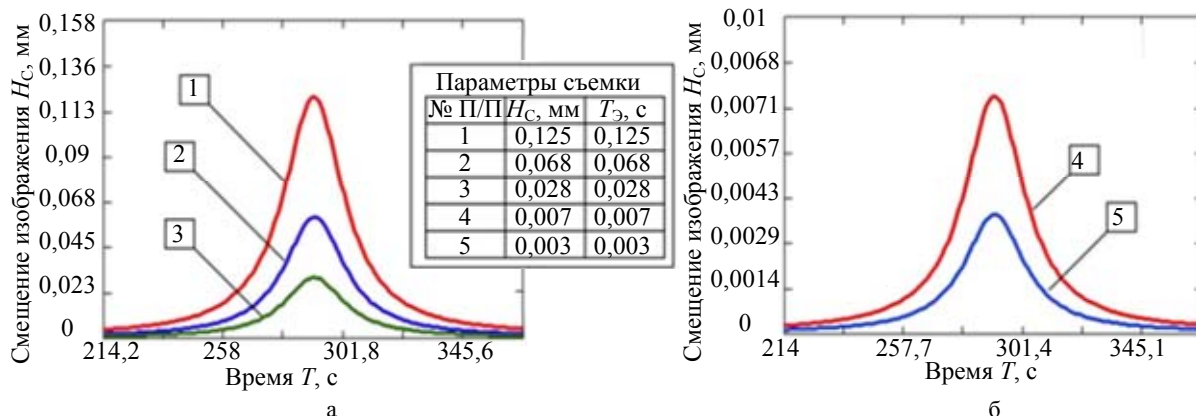


Рис. 1. Зависимость смещения изображения от времени экспонирования: $T_{э} = 0,004$ (1), $T_{э} = 0,002$ (2), $T_{э} = 0,001$ (3) (а); $T_{э} = 0,0002$ (4), $T_{э} = 0,0001$ (5) (б)

Оценить качество снимка с учетом контрастных свойств и величины смещения изображения предлагается с помощью показателя качества изображений – линейного разрешения оптико-электронной системы $L_{ЛР}$ [13–16]. Под линейным разрешением (ЛР) понимается максимальная частота штрихов поля на изображении полосовой миры, воспринимаемых отдельно. Численное значение ЛР возможно определить с помощью частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) передаточных звеньев бортовой аппаратуры наблюдения и порога контрастной чувствительности приемника ЭМИ [17–19].

Величина смещения изображения учитывается в выражении [2, 20]

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

где T_C – ЧКХ смещения изображения; η_o – оптический коэффициент полезного действия фотозатвора; v – пространственная частота штрихов в поле полосовой миры. Результирующая ЧКХ оптико-электронной системы имеет вид кривых, представленных на рис. 2, которые показывают изменение отношения между контрастом тест-объекта на снимке и контрастом реального тест-объекта с учетом изменения частоты штрихов в поле полосовой миры.

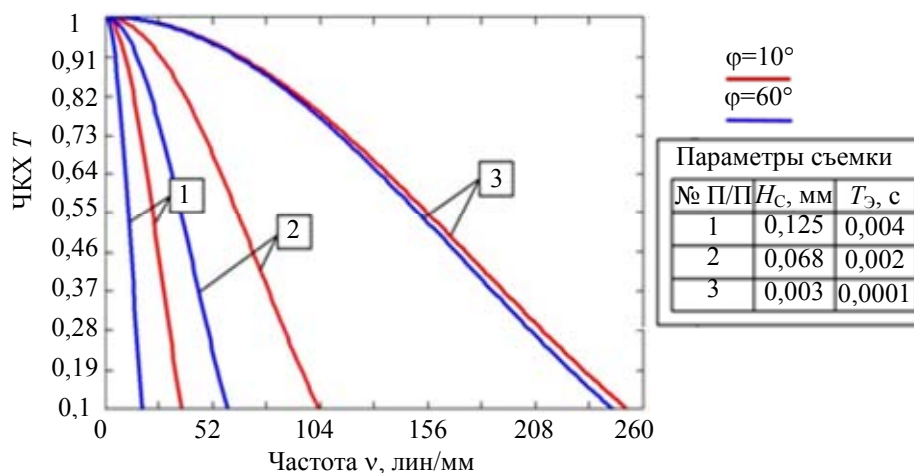


Рис. 2. ЧКХ оптико-электронной системы

Из рис. 2 видно, что уменьшение смещения изображения с 0,125 до 0,003 мм в результате сокращения времени полной выдержки с 0,004 до 0,0001 позволяет увеличить число воспринимаемых отдельно линий тест-объекта с 22–25 до 240–250. Построение графических зависимостей выполнено для значений фазового угла $\phi = 10^\circ$ и $\phi = 60^\circ$, так как условия освещенности сильно влияют на контраст получаемого изображения [11, 17, 21]. Для определения контраста, передаваемого оптико-электронной системой, требуется выражение

$$T = K / K_{Об}$$

привести к виду

$$K = T \cdot K_{Об},$$

где T – ЧКХ оптико-электронной системы; K – контраст КО на снимке; $K_{Об}$ – контраст реального КО, который может быть получен с использованием коэффициентов отражения материалов, применяемых в конструкции [20].

Другим важным параметром при определении ЛР является пороговый контраст $K_{ПОР}$, регистрируемый приемником ЭМИ, который вычисляется по следующей формуле [13, 20]:

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

где $\Psi_{ПОР}$ – пороговое отношение сигнал/шум, при котором возможна интерпретация изображения; E_0 – освещенность поверхности КО; D – диаметр входного отверстия объектива; k_ϕ – коэффициент отражения фона (фонового элемента КО); k_0 – коэффициент отражения элемента КО; η – квантовый выход приемника ЭМИ; N_ϕ – потенциально доступное число фотонов; Δ – площадь элемента фотоприемного устройства (ФПУ); τ – коэффициент пропускания света объективом; f – фокусное расстояние. Таким образом, порог контрастной чувствительности зависит от условий освещенности КО, отражательных характеристик материалов, параметров объектива аппаратуры наблюдения, накопительных свойств приемника ЭМИ.

В реальных условиях орбитальной съемки управление численными значениями большинства параметров формулы (2) невозможно. Регулируемым параметром, влияющим на ЛР, является время полной выдержки, выбрать которое можно с помощью светосигнальной характеристики (рис. 3).

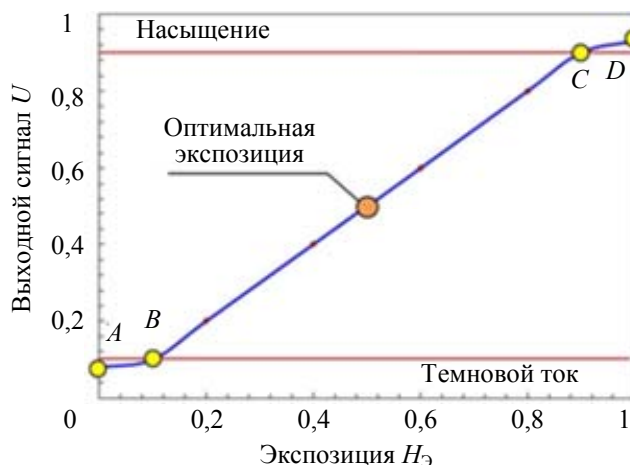


Рис. 3. Светосигнальная характеристика

Светосигнальная характеристика показывает зависимость выходного сигнала от экспозиции и описывается тремя характерными участками: *AB* – генерация электронов выполняется под действием темнового тока; *BC* – формирование полезного сигнала в результате фотоэффекта; *CD* – зарядовый пакет растекается в результате избыточной освещенности.

Время полной выдержки должно обеспечить получение числа электронов в результате фотоэффекта, превышающее число электронов, полученных под действием темнового тока, но не достаточное для заполнения всей потенциальной ямы элементарной ячейки приемника ЭМИ. Для обеспечения регулирования величины зарядового пакета участку светосигнальной характеристики *BC* предлагается сопоставить динамический диапазон яркости изображения, связывающий экспозицию приемника ЭМИ с его контрастной чувствительностью. Таким образом, точка *B* соответствует минимальному значению яркости, а точка *C* – максимальному. Контрастная чувствительность приемника ЭМИ выражается числом дискретных значений яркости K_{Π} на участке *BC*. Заряд, необходимый для получения требуемого числа дискретных значений яркости K_3 , находится по формуле

$$N_E = \frac{N_{\max} - N_{\min}}{K_{\Pi}} \cdot K_3,$$

где N_{\max} – максимальное число электронов в одном элементе приемника ЭМИ; N_{\min} – минимальное число электронов в одном элементе приемника ЭМИ; N_E – число электронов, соответствующих яркости K_3 .

Влияние времени полной выдержки на качество космических снимков

Возможность повышения качества снимков КО с помощью предложенного в настоящей работе подхода доказывают результаты расчетов, которые показывают, что выбор времени полной выдержки с учетом контрастной чувствительности приемника ЭМИ и контраста, необходимого для качественной интерпретации, позволяет уменьшить смещение изображения и повысить качество космических снимков (рис. 4).

На рис. 4 графические зависимости наглядно демонстрируют повышение ЧКХ (кривые 1) при уменьшении яркости изображения. Расчеты выполнены для значений фазового угла 10° (рис. 4, а) и 60° (рис. 4, б) [10], что соответствует различным условиям освещенности при наблюдении КО. Полученные результаты подтверждают предположение о том, что сокращение времени полной выдержки повышает передаточные характеристики звеньев бортовой аппаратуры наблюдения в результате уменьшения смещения изображения в фокальной плоскости объектива. Вместе с этим повышается порог контрастной чувствительности приемника ЭМИ (кривые 2) вследствие уменьшения экспозиции. Анализ ЛР оптико-электронной системы, которое определяется значением пространственной частоты в точке пересечения ЧКХ и порога контрастной чувствительности приемника ЭМИ, позволил выбрать время полной выдержки, обеспечивающее наилучшее качество снимка КО с учетом его контрастных свойств и смещения изображения в разных условиях освещения.

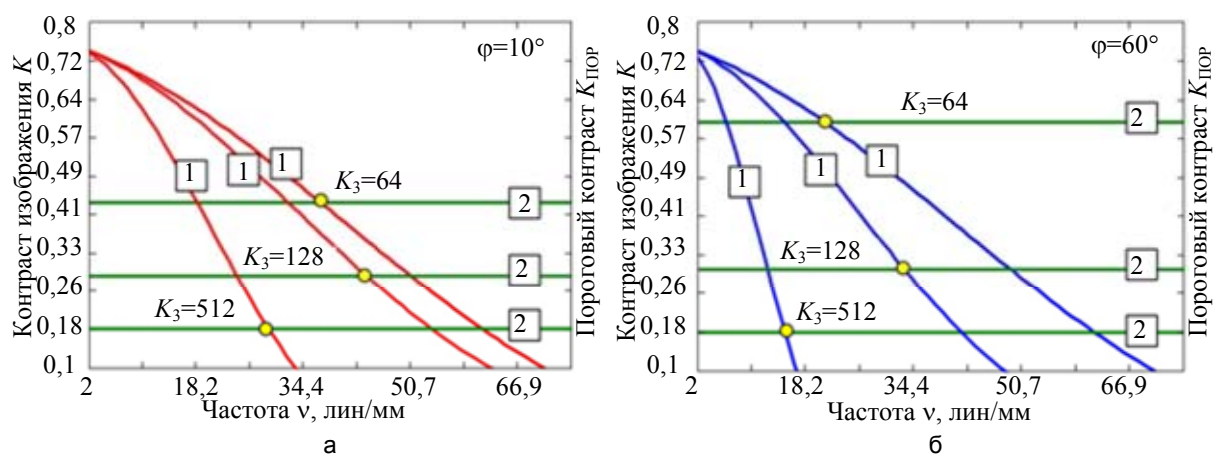


Рис. 4. Разрешающая способность оптико-электронной системы, определяемая точкой пересечения ЧКХ системы (кривая 1) и порогом контрастной чувствительности ФПУ (кривая 2), для значений фазового угла: 10° (а); 60° (б)

Оценить качество космического снимка, полученного в реальных условиях наблюдения, можно с помощью линейного разрешения на объекте, характеризующего линейный размер наименьшего элемента КО, различимого на изображении. Данный показатель качества изображения вычисляется по следующей формуле [13]:

$$L_{\text{ЛРО}} = \frac{D_{\text{Н}}}{2 L_{\text{ЛР}} f},$$

где $D_{\text{Н}}$ – дальность съемки; f – фокусное расстояние; $L_{\text{ЛР}}$ – линейное разрешение оптико-электронной системы; $L_{\text{ЛРО}}$ – линейное разрешение на объекте.

Моделирование сценариев наблюдения КО спутником-инспектором с учетом типичных условий наблюдения и предложенного подхода к выбору времени полной выдержки показало возможность повышения линейного разрешения космических снимков на 10–20% при движении КА по орбитам с углом некомпланарности менее 6° на 40–50% при движении КА по орбитам с углом некомпланарности 45°.

Заключение

Предложенный подход к повышению качества снимков космических объектов, получаемых средствами орбитальной инспекции, базируется на идее совместного учета скорости движения оптического изображения и времени полной выдержки при выборе экспозиции фотоприемного устройства бортовой аппаратуры наблюдения. Результаты расчетов показывают, что данный подход позволяет путем сокращения времени полной выдержки повысить передаточные характеристики информационного тракта оптико-электронной системы, уменьшить величину «смаза», что увеличивает резкость космических снимков. Учет величины зарядового пакета и порога контрастной чувствительности фотоприемного устройства обеспечивает необходимое количество распознаваемых градаций яркости в изображении. Таким образом, достигается выбор экспозиции, обеспечивающей получение космических снимков космических объектов, пригодных для интерпретации. Предложенный подход позволяет выбрать наилучшие параметры работы бортовой аппаратуры наблюдения и находит применение при планировании использования средств орбитальной инспекции, а также при обосновании требований в процессе создания и эксплуатации новых орбитальных систем получения изображений космических объектов.

References

1. Kucheiko A.A. *Unikal'noe primeneniye sputnika DZZ – orbital'naya inspektsiya* [Unique applications of remote sensing satellite D33 - orbital inspection]. Available at: http://www.scanex.ru/ru/news/News_Preview.asp?id=n15525031 (accessed 28.02.2013).
2. Altukhov A.I., Gnusarev N.V., Korshunov D.S. Prognozirovaniye kachestva izobrazhenii kosmicheskikh ob"ektov [Image quality forecasting for space objects]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 3 (83), pp. 36–41.
3. Ogilvie A., Allport J., Hannah M., Lymer J. Autonomous satellite servicing using the orbital express demonstration manipulator system. *Proc. 9th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*. LA, 2008.
4. Dornheim M. Express Service. *Aviation Week and Space Technology (New York)*, 2006, vol. 164, no. 23, pp. 46–50.
5. Vallado D.A., Griesbach J.D. Simulating space surveillance networks. *Advances in the Astronautical Sciences*, 2012, vol. 142, pp. 2769–2787.
6. Stokes G.H., von Braun C., Sridharan R., Sharma J. The space-based visible program. *Space 2000 Conference and Exposition*. Long Beach, USA, 2000.

7. *Kontsepsiya Razvitiya Rossiiskoi Kosmicheskoi Sistemy Distsionnogo Zondirovaniya Zemli na Period do 2025 Goda* [The Concept of Development of the Russian Space Remote Sensing System until 2025]. Moscow, Federal'noe Kosmicheskoe Agentstvo Publ., 2006, 72 p.
8. Astashkin A.A., Lyubchenko F.N., Mal'chenko A.N., Novikova N.P. Kontsepsiya razvitiya kosmicheskikh sredstv distantsionnogo razvitiya zemli do 2040 goda [The concept of development of remote space development of the Earth until 2040]. *Kosmonavtika i Raketostroenie*, 2010, vol. 4, no. 61, pp. 118–124.
9. Lavrent'ev V.G., Oleinikov I.I. *Avtomatizirovannaya Sistema Preduprezhdeniya ob Opasnykh Situatsiyakh v Okolozemnom Kosmicheskome Prostranstve* [Automated System for Warning of Dangerous Situations in Near-Earth Space]. Moscow, TsNIImash Publ., 2010, 44 p.
10. Avdeev S.P. *Analiz i Sintez Optiko-Elektronnykh Priborov* [Analysis and Synthesis of Optoelectronic Devices]. St. Petersburg, Pravda Publ., 2000, 680 p.
11. Gnusarev N.V. *Geodezicheskoe i Ballisticheskoe Obespechenie Kosmicheskikh Sistem Distsionnogo Zondirovaniya* [Geodetic and Ballistic Software of Remote Sensing Space Systems]. St. Petersburg, VKA n.a. A.F. Mozhaiskogo Publ., 2008, 220 p.
12. Baklanov A.I. *Sistemy Nablyudeniya i Monitoringa* [Observation and Monitoring Systems]. Moscow, Binom Publ., 2009, 234 p.
13. Khartov V.V., Efanov V.V., Zanin K.A. *Osnovy Proektirovaniya Orbital'nykh Optiko-Elektronnykh Kompleksov* [Basis of Design Orbital Optoelectronic Systems]. Moscow, MAI Publ., 2011, 127 p.
14. Zanin K.A. Vybory parametrov optiko-elektronnoi kosmicheskoi sistemy nablyudeniya po kachestvu izobrazheniya [Image quality based selection of parameters of optical-electronic space observation system]. *Polet. Obshcherossiiskii Nauchno-Tekhnicheskii Zhurnal*, 2007, no. 11, pp. 30–37.
15. Zanin K.A. Metody proektirovaniya optiko-elektronnykh kompleksov kosmicheskikh apparatov [Methods of designing optoelectronic complexes spacecraft]. In: *Proektirovanie Avtomaticheskikh Kosmicheskikh Apparátov Dlya Fundamental'nykh Nauchnykh Issledovaniy* [Designing an Unmanned Spacecraft for Fundamental Research] Eds. V.V. Efanov, K.M. Pichkhadze. Moscow, MAI Publ., 2012, vol. 1, pp. 285–360.
16. Zanin K.A. Razrabotka metodicheskogo apparata povysheniya kachestva proektirovaniya kosmicheskikh sistem optiko-elektronnogo nablyudeniya [Methods for quality growth of optoelectronic observation space systems design]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2011, no. 2, pp. 32–39.
17. Tsytsulin A.K. *Televidenie i Kosmos* [Television and Space]. St. Petersburg, SPbGETU «LETI» Publ., 2003, 228 p.
18. Campbell J.B., Wynne R.H. *Introduction to Remote Sensing*. 5th ed. Guilford Press, 2011, 667 p.
19. Schowengerdt R.A. *Remote Sensing. Methods and Models of Image Processing*. 3rd ed. Academic Press, 2007, 558 p.
20. Grigor'ev A.N., Korshunov D.S., Belyaev A.S. Prognozirovanie kachestva kosmicheskikh snimkov kosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya [Forecasting quality satellite images of space remote sensing systems]. *Trudy Voennno-Kosmicheskoi Akademii im. A.F. Mozhaiskogo*, 2010, no. 629, pp. 143–147.
21. Emelyanov S.G., Atakishev O.I., Altuchov A.I., Gnusarev N.V., Korshunov D.S. K voprosu ucheta uslovii osveshchennosti pri s"emke kosmicheskikh ob"ektov fotograficheskimi sredstvami [On accounting lighting conditions to survey space objects photographic means]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 2012, no. 3 (42), pp. 58–62.

- Алтухов Александр Иванович** — кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия, aai_51@mail.ru
- Коршунов Денис Сергеевич** — кандидат технических наук, старший преподаватель, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия, Korshunov.Denis@rambler.ru
- Шабakov Евгений Иванович** — кандидат технических наук, доцент, доцент, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия, eish@br.ru
- Alexander I. Altukhov** — PhD, Associate Professor, Department head, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia, aai_51@mail.ru
- Denis S. Korshunov** — PhD, Senior lecturer, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia, Korshunov.Denis@rambler.ru
- Evgeniy I. Shabakov** — PhD, Associate professor, Associate professor, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia, eish@br.ru

Принято к печати 14.05.14
Accepted 14.05.14