

УДК 528.067

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ЗИМНИЙ ФЕНОЛОГИЧЕСКИЙ ПЕРИОД

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

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 10.11.18, принята к печати 24.12.18

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-39-46

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Алтухов А.И., Шабakov Е.И., Коршунов Д.С. Метод повышения качества космических снимков при наблюдении земной поверхности в зимний фенологический период // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 1. С. 39–46. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-39-46

Аннотация

В зимний фенологический период наибольшая часть потока солнечного излучения отражается от земной поверхности. Причиной является наличие на земной поверхности снежного покрова, обладающего высоким коэффициентом отражения потока излучения. В этих условиях, например, невозможно использовать режим съемки Земли из космоса с длительным временем накопления заряда фотоприемным устройством оптико-электронного комплекса космического аппарата. Низкое качество получаемых снимков существенно затрудняет их интерпретацию. Предложенный метод обеспечивает получение снимков земной поверхности, пригодных для интерпретации, с учетом особенностей космической съемки в зимний фенологический период. Актуальность данного метода подтверждается результатами оценивания контраста космических снимков. В основу метода положена идея совместной обработки серии космических снимков, полученных с разным временем накопления заряда фотоприемным устройством оптико-электронного комплекса космического аппарата. Результатом обработки является снимок с расширенным динамическим диапазоном яркости, обладающий высоким контрастом в области темных и светлых полутонов. Такой снимок лучше отображает границы и детали объектов местности, что существенно облегчает его интерпретацию. Проведен анализ влияния баллистических условий космической съемки на результаты применения метода повышения качества космических снимков, полученных в зимний фенологический период. Сделан вывод о том, что результаты совместной обработки серии космических снимков с разной экспозицией могут быть некорректны. Причиной этого являются геометрические искажения, возникающие вследствие непрерывного взаимного перемещения наблюдаемого участка местности и космического аппарата. Предложен вариант технического усовершенствования фотоприемного устройства. Метод обработки данных дистанционного зондирования Земли позволяет получать пригодные для интерпретации снимки объектов, расположенных на земной поверхности в любой фенологический период. Результаты могут быть использованы для топогеодезического обеспечения и картографирования территорий.

Ключевые слова

синтез изображений, динамический диапазон яркости изображений, контраст

METHOD OF SPACE IMAGES QUALITY IMPROVEMENT AT EARTH-VIEWING IN WINTER PHENOLOGICAL PERIOD

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

Mozhaiskiy Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation
Corresponding author: korshunov.denis@rambler.ru

Article info

Received 10.11.18, accepted 24.12.18

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-39-46

Article in Russian

For citation: Altukhov A.I., Shabakov E.I., Korshunov D.S. Method of space images quality improvement at earth-viewing in winter phenological period. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 39–46 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-39-46

Abstract

Subject of research. During the winter phenological period, the largest part of the solar radiation flux is reflected from the earth's surface. The reason is the presence of snow cover on the earth's surface, which has high reflectance of the radiation flux. Under these

conditions, the choice of shooting modes of the Earth from space is limited. Long exposure modes cannot be selected. As a result, the pictures have low quality and their interpretation is difficult. The proposed method provides the images of the earth's surface suitable for processing in view of the space survey features in winter phenological period. The method significance is confirmed by the results of the contrast evaluation of satellite images. **Method.** The method is based on the idea of co-processing of a series of space images with different exposures. The result of processing is a snapshot with an extended dynamic brightness range possessing high contrast in the areas of dark and pale halftones. Such snapshot displays better the borders and details of geographic area objects and that simplifies significantly its interpretation. **Main results.** We analyzed the effect of space survey ballistic conditions on the results of method application for image quality improvement in winter phenological period. The conclusion was drawn that the results of joint processing of images with different exposures can be ill-posed. The cause lies in geometric distortions due to continuous relative motion of the observed area and a spacecraft. The variant to eliminate geometric distortions by camera engineering development is proposed. **Practical relevance.** The processing method for the Earth's remote sensing data provides obtaining suitable for interpretation satellite images of the objects located on the earth surface in any phenological period. The results are applicable for the information accuracy increase in survey and cartography support.

Keywords

image synthesis, image brightness dynamic range, contrast

Введение

Для решения задач картографии используются космические снимки с высоким пространственным разрешением. Однако высокое пространственное разрешение не всегда обеспечивает отображение мелких деталей и границ объектов в зимний фенологический период [1–3]. Вследствие высоких отражательных характеристик снежного покрова контраст между объектами на снимке мал, что затрудняет интерпретацию полученного изображения. Обеспечить одновременно высокие пространственное разрешение и контраст возможно, выбрав правильные параметры съемки на этапе планирования применения бортового оптико-электронного комплекса (ОЭК). Высокое пространственное разрешение достигается путем сокращения наклонной дальности между ОЭК и наблюдаемым участком земной поверхности. Высокий контраст снимка обеспечивается правильным выбором времени накопления заряда фотоприемным устройством (ФПУ) [4–6].

Важно отметить, что в зимний период возможность выбора времени накопления заряда ФПУ ограничена. При попадании в поле зрения регистрирующей аппаратуры объектов с различными оптическими характеристиками на снимке появляются «засвеченные» и «недоэкспонированные» области. Избежать такой ситуации возможно, используя метод расширения динамического диапазона яркости изображения путем совмещения серии космических снимков земной поверхности, полученных с разным временем накопления заряда ФПУ [7–10]. В результате применения такого метода возможно получить снимок, который отображает границы и мелкие детали элементов местности с высоким контрастом в любое время года.

Необходимым условием расширения динамического диапазона яркости изображения путем синтирования серии космических снимков земной поверхности является точное совмещение соответствующих фрагментов обрабатываемых снимков. Обеспечить это можно при съемке стационарных объектов с неподвижного ОЭК. В условиях космической съемки ОЭК установлен на платформу движущегося по орбите космического аппарата, а перемещение объектов обусловлено вращением Земли вокруг своей оси. В этих условиях задача расширения динамического диапазона яркости изображения может быть решена только, если режимы работы бортового ОЭК, обеспечивают получение снимков с разным временем накопления заряда в единой системе координат и проекции на земную поверхность. В статье предложен модернизированный вариант ОЭК, обеспечивающий указанный режим работы.

Расширение динамического диапазона яркости космических снимков

Получение космического снимка с расширенным динамическим диапазоном яркости подразумевает совместную обработку «недоэкспонированного», «нормально экспонированного» и «переэкспонированного» снимков. В результате такой обработки из исходных изображений формируется новое контрастное изображение, значения яркости элементов которого рассчитываются по формуле

$$\begin{aligned}
 &B_{\text{рез}} = 1/3 \cdot M, \\
 &\text{if } (N_e \leq N_{e1}) \{M = B_1 + B_2 + B_3\}, \\
 &\text{if } (N_{e1} < N_e \leq N_{e2}) \{M = B_1 + B_2 + B_{\text{max}}\}, \\
 &\text{if } (N_{e2} < N_e \leq N_{e3}) \{M = B_1 + B_{\text{max}} + B_{\text{max}}\},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где $B_{\text{рез}}$ – яркость пиксела результирующего изображения; B_1, B_2, B_3 – яркость соответствующих пикселов на «переэкспонированном», «нормально экспонированном» и «недоэкспонированном» изображениях; M – коэффициент пропорциональности; N_{e1}, N_{e2}, N_{e3} – экспозиция «переэкспонированного», «нормально экспонированного» и «недоэкспонированного» изображений в электронах; N_e – экспозиция объекта наблюдения.

На рис. 1 демонстрируются результаты расчетов значений яркости изображений объектов, часто встречаемых на космических снимках в зимний фенологический период. Рассчитанные значения яркости для соответствующих объектов получены с использованием коэффициентов спектральной яркости (r) их материалов ($\lambda = 0,5$ мкм).

Объекты съемки	Коэффициент яркости
Дороги с асфальтовым покрытием.....	0,09
Дороги с гравийным покрытием.....	0,12
Объекты из древесины.....	0,16
Объекты из красного кирпича.....	0,19
Суглинок.....	0,22
Бетонная площадка.....	0,3
Снежный покров.....	0,91

На рис. 1, *а* желтыми столбцами обозначены величины яркости изображений объектов, рассчитанные по традиционной методике экспонетрического оценивания района съемки, зелеными – значения после расширения динамического диапазона яркости снимка (1). На рис. 1, *б* приведены результаты сравнения контрастов *K* между объектами на исходном и обработанном изображениях.

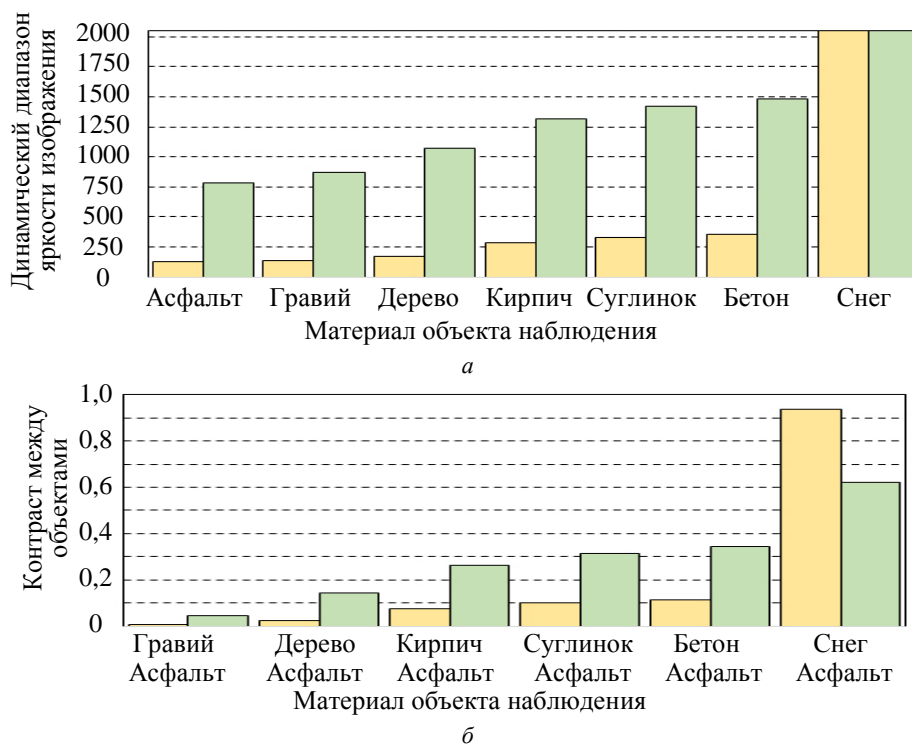


Рис. 1. Яркостная и контрастная характеристики космического снимка: динамический диапазон яркости изображения (*а*); контраст между объектами (*б*)

Из рис. 1, *а* видно, что большинство объектов, попавших в поле зрения ОЭК, расположены на снимке в области темных полутонов. Наиболее яркой является бетонная площадка, яркость изображения которой достигает $B = 426$ у.е. на снимке с радиометрическим разрешением 2^{11} бит/пкс (для примера – яркость изображения снежного покрова достигает $B = 2048$ у.е.). Следствием такого распределения значений яркости изображений объектов по шкале динамического диапазона яркости космического снимка является низкий контраст между большинством объектов на снимке (рис. 1, *б*).

Необходимо отметить, что контраст между объектами гравий/асфальт и древесина/асфальт меньше, чем может воспринять глаз человека $K=0,002$. Другими словами, разница между такими объектами на космическом снимке будет незаметна. Использование при экспонетрическом оценивании района съемки метода расширения динамического диапазона яркости изображений позволило существенно усилить контраст между объектами вследствие изменения значений яркости их изображений (рис. 1, *б*, зеленые столбцы). Следует отметить, что после обработки для объектов гравий/асфальт получено значение $K=0,05$, древесина/асфальт – $K=0,14$. В остальных случаях контраст между объектами усилился более существенно.

Влияние баллистических условий космической съемки на результаты применения метода повышения качества космических снимков

Как отмечалось ранее, расширить динамический диапазон яркости изображения возможно, одновременно используя «недоэкспонированный», «нормально экспонированный» и «переэкспонированный» снимки. Следует отметить, что современные ОЭК не обладают технической возможностью одновременного

формирования нескольких изображений с разной экспозицией. Такие изображения могут быть получены только в ходе многократной съемки при условии постепенного увеличения времени накопления заряда ФПУ. В процессе такой съемки наблюдается непрерывное взаимное перемещение наблюдаемого участка местности и космического аппарата (КА), что выражается в изменении угла визирования ОЭК к плоскости местного горизонта α . Следствием изменения данного угла является изменение проекции поля зрения ОЭК на земную поверхность (рис. 2).

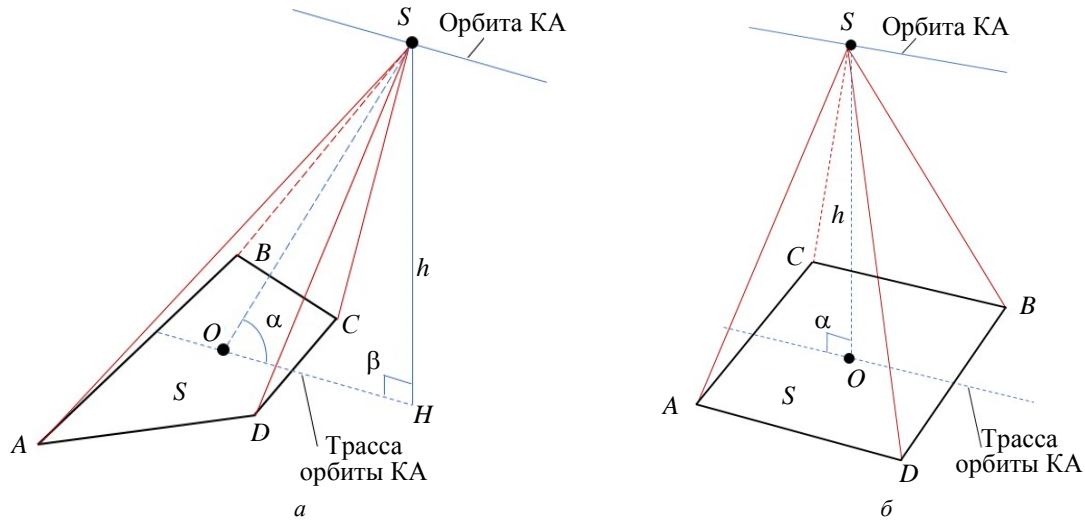


Рис. 2. Изменение проекции поля зрения ОЭК при последовательной съемке земной поверхности: линия визирования направлена в надир (а); линия визирования отклонена от направления в надир (б)

На рис. 2 проекция поля зрения ОЭК на земную поверхность представлена четырехугольником $ABCD$, площадь которого изменяется с изменением угла визирования ОЭК к плоскости местного горизонта α . Рассчитать площадь проекции поля зрения ОЭК S с учетом изменения его ориентации в пространстве [5] возможно по формуле:

$$S = \frac{2h^2 \sin \alpha \sin \beta_{пр} \operatorname{tg} \left(\frac{\beta_{mn}}{2} \right) \cos^2 \left(\frac{\beta_{mn}}{2} \right)}{\sin^2 \left(\alpha + \frac{\beta_{mn}}{2} \right) \sin^2 \left(\alpha - \frac{\beta_{mn}}{2} \right)}, \quad (2)$$

где h – высота полета космического аппарата; β_{mn} и $\beta_{пр}$ – поперечный и продольный углы поля зрения ОЭК.

Расчеты по формуле (2) показывают, что получение «недоэкспонированного», «нормально экспонированного» и «переэкспонированного» космических снимков при последовательной съемке сопровождается существенным изменением площади проекции поля зрения ОЭК на земную поверхность. Например, при съемке в надир (α_1) площадь проекции ОЭК на земную поверхность минимальна ($S_1 = 1720 \text{ км}^2$), а при отклонении оптической оси ($\alpha_2 = 70^\circ$, $\alpha_3 = 50^\circ$) существенно увеличивается ($S_2 = 2074 \text{ км}^2$, $S_3 = 3837 \text{ км}^2$).

Параметры ОЭК

Высота полета космического аппарата – h , км	475
Поперечный угол поля зрения ОЭК – β_{mn} , град	5
Продольный угол поля зрения ОЭК – $\beta_{пр}$, град	5

Изменение площади проекции поля зрения ОЭК [6] оказывает существенное влияние на экспозицию:

$$N_e = \frac{E_o \tau_{атм}^2 \tau_{опт} \rho \sin h_\odot}{4} \frac{D^2}{F^2} (1 - \mu^2) \frac{T_n \eta a_{mn}^2}{h\nu}. \quad (3)$$

Величина экспозиции N_e зависит от оптических характеристик наблюдаемого участка земной поверхности, условий его освещенности и параметров ОЭК. В частности, оптической характеристикой наблюдаемого участка земной поверхности является альbedo ρ . Освещенность характеризуется углом Солнца над плоскостью местного горизонта h_\odot , коэффициентом светопропускания атмосферы $\tau_{атм}^2$ и облученностью поверхности на входе в атмосферу E_o ($h\nu$ – энергия одного кванта излучения длины волны). К параметрам ОЭК относятся: диаметр объектива D , фокусное расстояние F , коэффициент

светопропускания оптической системы τ_{opt} , коэффициент экранирования объектива μ , квантовый выход ФПУ η , размер фоточувствительного элемента $a_{\text{мн}}$ и время накопления заряда $T_{\text{н}}$ (корректируя которое, возможно регулировать экспозицию).

На рис. 3 демонстрируется зависимость экспозиции от угла визирования ОЭК к плоскости местного горизонта α , определяющего изменение площади проекции ОЭК на земную поверхность. Видно, что с увеличением отклонения линии визирования ОЭК от направления в надира экспозиция, полученная в результате регистрации излучения от объектов, увеличивается. В результате при последовательной космической съемке земной поверхности экспозиция «переэкспонированного» снимка может оказаться меньше экспозиции «нормально экспонированного», а в некоторых случаях меньше экспозиции «недоэкспонированного» снимка. Следствием этого является неправильная работа метода расширения динамического диапазона яркости изображения, что подтверждается предварительными расчетами, результаты которых приведены на рис. 4.

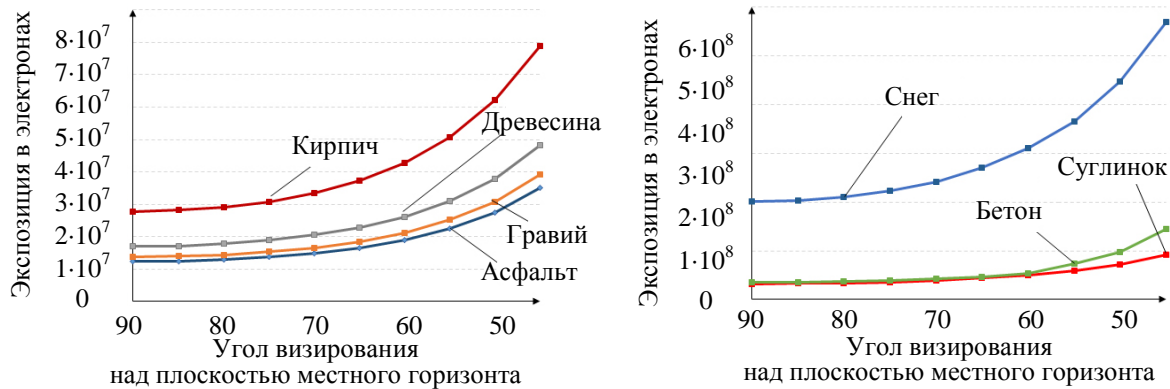


Рис. 3. Зависимость экспозиции от угла визирования оптико-электронного комплекса к плоскости местного горизонта

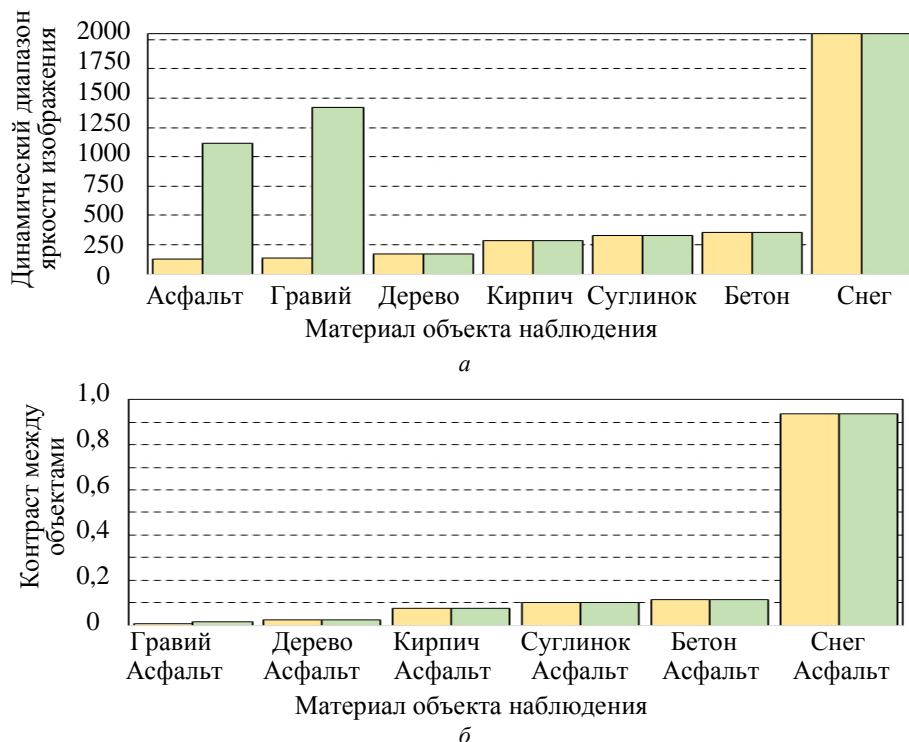


Рис. 4. Яркостная и контрастная характеристики космического снимка: динамический диапазон яркости изображения (а); контраст между объектами (б)

На рис. 4 демонстрируются результаты применения метода расширения динамического диапазона яркости изображения в случае, когда экспозиции снимков соответствуют условию $N_{e3} \leq N_{e2} \leq N_{e1}$. В частности, на рис. 4, а желтыми столбцами обозначены значения яркости изображений объектов, рассчитанные по традиционной методике экспонетрического оценивания района съемки;

зелеными – после расширения динамического диапазона яркости снимка (1). Видно, что неправильное распределение значений экспозиции в формуле (1) ведет к ошибке в вычислениях яркости изображений объектов. Вследствие этого применение метода расширения динамического диапазона яркости изображения не обеспечивает значительного повышения контраста между объектами (рис. 4, б). Расширить динамический диапазон яркости изображения, обеспечив получение снимков с разным временем накопления заряда в единой системе координат и проекции на земную поверхность, возможно путем технической модернизации ФПУ регистрирующей аппаратуры.

**Фотоприемные устройства ОЭК,
обеспечивающие получение космических снимков земной поверхности
с расширенным динамическим диапазоном яркости**

Как отмечалось ранее, получение «недоэкспонированного», «нормально экспонированного» и «переэкспонированного» космических снимков при последовательной съемке сопровождается изменением площади проекции поля зрения ОЭК на земную поверхность и, как следствие, изменением экспозиции. Исключить влияние взаимного перемещения участка местности и космического аппарата на результаты возможно путем технического усовершенствования ФПУ [11–15]. Возможные схемы компоновочных решений приведены на рис. 5.

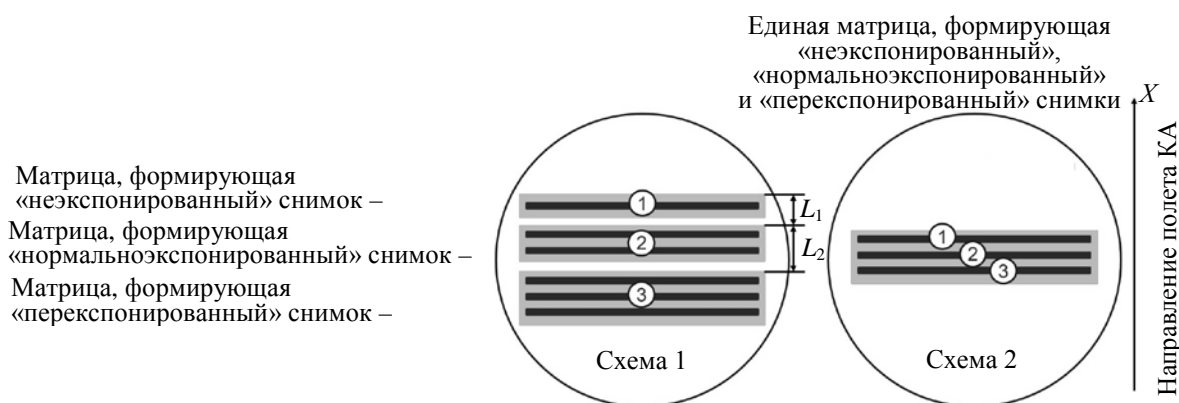


Рис. 5. Варианты компоновочных решений фотоприемного устройства

На рис. 5 представлены ФПУ, расположенные в фокальной плоскости ОЭК. Вариант компоновки ФПУ на схеме 1 подразумевает использование трех независимых светочувствительных матриц линейного типа. Каждая из матриц формирует изображение в режиме временной задержки и накопления заряда. Важно отметить, что снимки с разной экспозицией предлагается формировать не последовательно, а параллельно, исключая искажения, вызванные изменением угла визирования к плоскости местного горизонта. Время накопления заряда ФПУ выбирается для каждой матрицы, после чего не изменяется на протяжении всего периода эксплуатации ОЭК. Матрица 1 предназначена для формирования «недоэкспонированного» снимка, 2 – «нормально экспонированного» снимка, 3 – «переэкспонированного» снимка. Так как матрицы в фокальной плоскости разнесены на некоторое расстояние, совмещение полученных снимков предлагается обеспечить путем задержки времени включения матриц ФПУ. Для простого случая съемки время включения матриц может быть рассчитано по формуле:

$$T_{\text{вкл}} = \frac{L}{V_{\text{img}}},$$

где $T_{\text{вкл}}$ – время включения матрицы; L – расстояние между матрицами; V_{img} – скорость движения оптического изображения в фокальной плоскости.

Второй вариант компоновки ФПУ (рис. 5, схема 2) подразумевает использование единой светочувствительной матрицы линейного типа для формирования снимков с разной экспозицией. Время накопления заряда ФПУ выбирается максимальным на весь период эксплуатации ОЭК. В процессе экспонирования выполняются промежуточное считывание экспозиции и формирование изображений с разной экспозицией. При первом считывании формируется «недоэкспонированный» снимок, при втором – «нормально экспонированный», при третьем – «переэкспонированный».

Заключение

Космические снимки земной поверхности, полученные в зимний фенологический период, характеризуется низкими значениями контраста и пространственного разрешения получаемых снимков. Обеспечить требуемое качество снимков возможно путем применения метода расширения динамического диапазона яркости изображений. В основу метода положена идея совмещения серии космических снимков с

разной экспозицией. Обеспечить корректную работу метода в условиях космической съемки авторы предлагают путем технической модернизации фотоприемного устройства оптико-электронного комплекса. Предложенный подход позволит получить высококонтрастные снимки с высоким пространственным разрешением с учетом влияния взаимного перемещения наблюдаемого участка земной поверхности и космического аппарата на результаты совмещения снимков с разной экспозицией.

Литература

1. Веселов Ю.Г., Островский А.С., Сельвесюк Н.И., Красавин И.В. Оценка предельного разрешения цифровых оптико-электронных систем дистанционного зондирования земли с использованием теории линейных систем // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3 (140). С. 84–89.
2. 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.
3. Григорьев А.Н., Дудин Е.А., Коршунов Д.С., Октябрьский В.В. Концептуальная и аналитическая модели ведения оптико-электронной съемки с априорной экспонетрией на борту космического аппарата // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 128–138.
4. 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.
5. Занин К.А. Выбор параметров оптико-электронной космической системы наблюдения по качеству изображения // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2007. №11. С. 30–37.
6. Баklangov А.И. Системы наблюдения и мониторинга. М.: Бином, 2014. 234 с.
7. 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. С. 35–40.
8. Алтухов А.И., Шабakov Е.И., Коршунов Д.С. Повышение качества изображений путем синтезирования космических снимков с разной экспозицией // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 1. С. 24–30. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-24-30
9. Красильников Н.Н. Цифровая обработка 2D и 3D изображений. СПб: БХВ-Петербург, 2011. 608 с.
10. Васильев А.С., Коротаев В.В., Краснящих А.В., Лашманов О.Ю., Ненарокомов О.Н. Совмещение тепловизионного и телевизионного изображений при обследовании строительных конструкций зданий и сооружений // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 4. С. 12–16.
11. Васильев А.С., Краснящих А.В., Коротаев В.В., Лашманов О.Ю., Лысенко Д.Ю., Ненарокомов О.Н., Широков А.С., Ярышев С.Н. Разработка программно-аппаратного комплекса обнаружения лесных пожаров методом совмещения изображений // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 12. С. 50–55.
12. Lashmanov O.U., Vasilev A.S., Vasileva A.V., Anisimov A.G., Korotaev V.V. High-precision absolute linear encoder based on a standard calibrated scale // Measurement. 2018. V. 123. P. 226–234. doi: 10.1016/j.measurement.2018.03.071
13. Коротаев В.В., Мельников Г.С., Михеев С.В., Самков В.М., Солдатов Ю.И. Основы тепловидения. СПб: НИУ ИТМО, 2012. 122 с.
14. Горбачёв А.А., Коротаев В.В., Ярышев С.Н. Твердотельные матричные фотопреобразователи и камеры на их основе. СПб: НИУ ИТМО, 2013. 98 с.
15. Korotaev V.V., Maraev A.A. Sources and Detectors of Optical Radiation. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2017. 104 p.

References

1. Veselov Yu.G., Ostrovskii A.S., Sel'vesyuk N.I., Krasavin I.V. Estimation of the limiting resolution of digital optoelectronic systems of remote sensing using the theory of linear systems. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie Nauki*, 2013, no. 3, pp. 84–89. (in Russian)
2. Grigor'ev A.N., Korshunov D.S., Belyaev A.S. Forecasting quality satellite images of space remote sensing systems. *Trudy Voenno-Kosmicheskoi Akademii im. A.F. Mozhaiskogo*, 2010, no. 629, pp. 143–147. (in Russian)
3. Grigor'ev A.N., Dudin E.A., Korshunov D.S., Oktjabrskii V.V. The conceptual and analytical models of optoelectronic survey with prior exposure metering on board a spacecraft. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2017, vol. 14, no. 3, pp. 128–138. (in Russian)
4. Altukhov A.I., Gnosarev N.V., Korshunov D.S. Image quality forecasting for space objects. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 3, pp. 36–41. (in Russian)
5. Zanin K.A. Image quality based selection of parameters of optical-electronic space observation system. *Polet. Obshcherossiiskii Nauchno-Tekhnicheskii Zhurnal*, 2007, no. 11, pp. 30–37. (in Russian)
6. Baklanov A.I. *Observation and Monitoring Systems*. Moscow, Binom Publ., 2009, 234 p. (in Russian)
7. Altukhov A.I., Korshunov D.S., Shabakov E.I. Method of image quality enhancement for space objects. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 4, pp. 35–40. (in Russian)
8. Altuho A.I., Shabakov E.I., Korshunov D.S. Increased image quality by synthesizing space photos with different exposures. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 24–30. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-24-30
9. Krasil'nikov N.N. *Digital Processing of 2D and 3D Images*. St. Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2011, 608 p. (in Russian)
10. Vasil'ev A.S., Korotaev V.V., Krasnyashchikh A.V., Lashmanov O.Yu., Nenarokomov O.N. Superposition of thermal and television images in examination of building units and constructions. *Journal of Instrument Engineering*, 2012, vol. 55, no. 4, pp. 12–16. (in Russian)
11. Vasil'ev A.S., Krasnyashchikh A.V., Korotaev V.V., Lashmanov O.Yu., Lysenko D.Yu., Nenarokomov O.N., Shirokov A.S., Yaryshev S.N. Unmanned aerial vehicle computer system for wildfire detection by image superimposing. *Journal of Instrument Engineering*, 2012, vol. 55, no. 12, pp. 50–55. (in Russian)
12. Lashmanov O.U., Vasilev A.S., Vasileva A.V., Anisimov A.G., Korotaev V.V. High-precision absolute linear encoder based on a standard calibrated scale. *Measurement*, 2018, vol. 123, pp. 226–234. doi: 10.1016/j.measurement.2018.03.071
13. Korotaev V.V., Mel'nikov G.S., Mikheev S.V., Samkov V.M., Soldatov Yu.I. *Basics of Thermal Imaging*. St. Petersburg, NRU ITMO Publ., 2012, 122 p. (in Russian)
14. Gorbachev A.A., Korotaev V.V., Yaryshev S.N. *Solid-State Matrix Photoconverters and Cameras Based on Them*. St. Petersburg, NRU ITMO Publ., 2013, 98 p. (in Russian)
15. Korotaev V.V., Maraev A.A. *Sources and Detectors of Optical Radiation*. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2017, 104 p. (in Russian)

Авторы

Алтухов Александр Иванович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-4105-029, aai_51@mail.ru

Шабakov Евгений Иванович – кандидат технических наук, доцент, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-8573-027X, eish@bk.ru

Коршунov Денис Сергеевич – кандидат технических наук, старший преподаватель, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-6344-2533, korshunov.denis@rambler.ru

Authors

Alexander I. Altukhov – PhD, Associate Professor, Head of Chair, A.F. Mozhaiskiy Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-4105-029, aai_51@mail.ru

Evgeniy I. Shabakov – PhD, Associate Professor, Associate Professor, Mozhaiskiy Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-8573-027X, eish@bk.ru

Denis S. Korshunov – PhD, senior lecturer, Mozhaiskiy Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-6344-2533, korshunov.denis@rambler.ru