

УДК 528.067

## МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ КОНТРАСТА ИЗОБРАЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ СЪЕМКИ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

А.И. Алтухов<sup>а</sup>, Е.И. Шабakov<sup>а</sup>, Д.С. Коршунов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> 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 20.04.18, принята к печати 29.05.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-573-580

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Алтухов А.И., Шабakov Е.И., Коршунов Д.С. Метод повышения контраста изображений в условиях съемки Земли из космоса // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 4. С. 573–580. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-573-580

### Аннотация

**Предмет исследования.** Предложен метод повышения контраста изображений земной поверхности, получаемых с использованием бортовых оптико-электронных комплексов космических систем дистанционного зондирования. Актуальность предложенного метода подтверждается результатами оценивания контраста космических снимков, полученных с использованием современной регистрирующей аппаратуры, и результатами расчета контраста для моделируемых условий съемки. **Метод.** В основу метода положена идея совмещения космических снимков с разной экспозицией. Это позволяет получить результирующий снимок с расширенным динамическим диапазоном яркости. Такой снимок обладает высоким контрастом в области темных и светлых полутонов и лучше отображает детали наблюдаемых объектов. **Основные результаты.** Проведена оценка контраста изображения, полученного при выборе параметров съемки по традиционной методике. Сделан вывод о том, что качество получаемых снимков из космоса в настоящее время ограничено, так как параметры работы бортового оптико-электронного комплекса не позволяют учесть большое количество объектов с различными оптическими характеристиками, находящихся в пределах поля захвата регистрирующей аппаратуры. На основании исследований предложен подход к повышению контраста изображений, суть которого сводится к расширению динамического диапазона яркости и, как следствие, повышению контраста получаемых снимков. **Практическая значимость.** Предложенный метод к обработке данных дистанционного зондирования Земли позволяет получать пригодные для интерпретации снимки объектов, расположенных на земной поверхности в любых условиях освещенности. Это повысит точность информационного обеспечения при выполнении работ топогеодезического обеспечения и картографирования территорий.

### Ключевые слова

совмещение изображений, экспозиция, динамический диапазон яркости изображений, качество космического снимка, контраст

## A METHOD OF IMAGES CONTRAST ENHANCEMENT UNDER CONDITIONS OF THE EARTH SURVEY FROM SPACE

A.I. Altukhov<sup>a</sup>, E.I. Shabakov<sup>a</sup>, D.S. Korshunov<sup>a</sup>

<sup>а</sup> Mozhayskiy Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation

Corresponding author: korshunov.denis@rambler.ru

### Article info

Received 20.04.18, accepted 29.05.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-573-580

Article in Russian

**For citation:** Altukhov A.I., Shabakov E.I., Korshunov D.S. A method of images contrast enhancement under conditions of the Earth survey from space. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 573–580 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-573-580

### Abstract

**Subject of Research.** A method is proposed for the contrast enhancement of the Earth's surface images obtained by airborne optoelectronic complexes of space remote sensing systems. The relevance of the proposed method is confirmed by the results of contrast estimation for space images obtained by modern recording equipment and the results of the contrast calculation for modeled survey conditions. **Method.** The method is based on the idea of combining different exposure space images. This

combination gives the possibility to get the resulting snapshot with an extended dynamic range of brightness. Such picture has a high contrast in the field of dark and light halftones and displays the details of the observed objects better. **Main Results.** The contrast of the image obtained when selecting the survey parameters by traditional method is estimated. It is concluded that the quality of the images obtained from space is currently limited, since the parameters of the onboard optoelectronic complex do not provide taking into account a larger number of objects with different optical characteristics that are within the capture area of the recording equipment. On the basis of research, an approach to images contrast enhancement is proposed, the essence of which is to expand the dynamic range of brightness and, as a result, to increase the contrast of the images obtained. **Practical Relevance.** The proposed method for the Earth's remote sensing data processing gives the possibility to obtain images of objects located on the Earth's surface in any light conditions suitable for interpretation. This fact will improve the accuracy of information provision when performing work survey support and mapping areas.

**Keywords**

combining images, exposure, image brightness dynamic range, space image quality, contrast

**Введение**

Для получения космических снимков земной поверхности высокого качества при планировании применения космических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) выполняется выбор параметров работы бортовой специальной аппаратуры [1–4]. В частности, выбирается время накопления заряда фотоприемным устройством (ФПУ) оптико-электронного комплекса (ОЭК). Значение этого параметра во многом зависит от распределения освещенности по земной поверхности, на которое влияют угол Солнца над плоскостью местного горизонта, наличие облачности в полосе обзора ОЭК, рельеф снимаемого участка местности и другие внешние факторы. Все эти факторы влияют на качество полученного изображения, в частности, на его контраст [5].

Чтобы получить изображение с высоким контрастом, можно воспользоваться коррекцией времени накопления заряда ФПУ. При этом следует помнить, что в реальных условиях съемки в полосе обзора ОЭК находится множество объектов с различными отражательными характеристиками, а условия освещенности носят нестационарный характер. Фрагменты 1, а, и 2, в, (рис. 1) наглядно демонстрируют, что в районе сосредоточения теней от облаков контраст между асфальтовым покрытием магистрали и прилегающей растительностью существенно ниже, чем в местах прямого солнечного освещения (фрагменты 1, б, и 2, г). Низкий контраст затрудняет определение границ объектов, а в некоторых случаях приводит к их «слиянию» и, как следствие, к невозможности интерпретации полученного изображения.

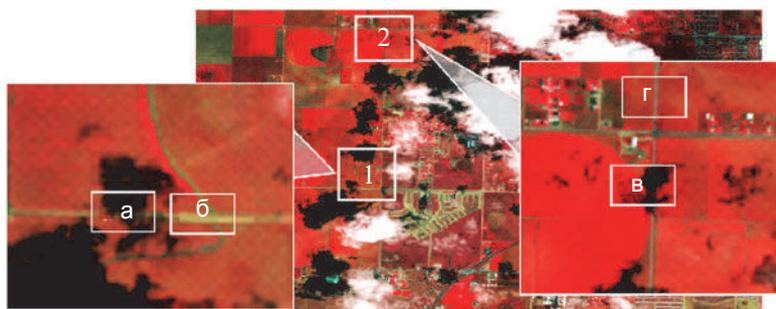


Рис. 1. Влияние неравномерных условий освещенности на контраст изображения земной поверхности: фрагменты 1, а, 2, в – примеры изображений магистрали и прилегающей растительности в условиях неяркой освещенности; фрагменты 1, б, 2, г – примеры изображений магистрали и прилегающей растительности в условиях яркой освещенности

Повысить контраст изображения для лучшего распознавания объектов в области тени, не вызвав при этом «засветку» других областей изображения, можно путем обоснованного выбора времени накопления заряда ФПУ. Однако результаты расчетов демонстрируют, что такой подход не всегда возможен. При попадании в полосу обзора объектов с низкими и высокими значениями коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) формируются изображения, которые не передают детали таких объектов в области темных и светлых полутонов. Это объясняется недостаточным количеством уровней шкалы динамического диапазона яркости изображения, которая используется для передачи зарегистрированного излучения объектов. В результате в процессе получения изображения к одному уровню яркости могут быть отнесены объекты с разными КСЯ. На снимке контраст между такими объектами будет отсутствовать.

**Выбор времени накопления заряда фотоприемным устройством оптико-электронного комплекса при съемке земной поверхности из космоса**

Известно, что значение времени накопления заряда ФПУ выбирается исходя из результатов экспонетрического оценивания района съемки [4–6]. На рис. 2 представлена схема условно снимаемого района съемки, на примере которой возможно продемонстрировать решение такой задачи. На схеме обозна-

чены объекты природного и техногенного характера, КСЯ которых известны и учитываются при экспонетрической оценке. К таким объектам относятся реки и озера, сухая трава, городские кварталы с плотной застройкой, леса густые высокие, магистрали и дороги с асфальтовым покрытием, поселки городского типа. Также на схему нанесены облака, не относящиеся к сюжетно-важной части изображения и воспринимаемые в рамках исследования как помеха природного происхождения.

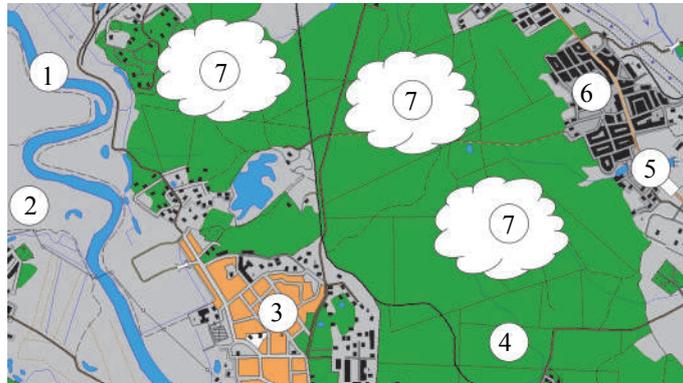


Рис. 2. Схема условно снимаемого участка местности, содержащая данные для экспонетрического оценивания: 1 – реки и озера; 2 – сухая трава; 3 – городские кварталы с плотной застройкой; 4 – леса густые высокие; 5 – магистрали и дороги с асфальтовым покрытием; 6 – поселки городского типа; 7 – облака

В рамках экспонетрического оценивания рассчитываются величины зарядовых пакетов (ЗП), полученных ФПУ при регистрации излучения объектов. Значение указанного параметра рассчитывается по формуле [6, 7]

$$N_e(\lambda) = \frac{E_o(\lambda) \tau_{\text{атм}}^2(\lambda) \tau_{\text{опт}} \rho(\lambda) \sin(h_\Theta) D^2 (1 - \mu^2) T_H \eta a_{\text{ПИ}}^2}{4 F^2 h\nu} \quad (1)$$

В формуле (1) размер ЗП выражен количеством фотоэлектронов  $N_e(\lambda)$ , которое зависит от оптических характеристик объектов, условий их освещенности и параметров ОЭК. В частности, оптической характеристикой объекта является его КСЯ  $\rho(\lambda)$ . Освещенность объекта зависит от угла Солнца над плоскостью местного горизонта  $h_\Theta$ , коэффициента светопропускания атмосферы  $\tau_{\text{атм}}^2(\lambda)$  и спектральной облученности поверхности на входе в атмосферу  $E_o(\lambda)$ . К параметрам регистрирующей аппаратуры относятся диаметр объектива  $D$ , фокусное расстояние  $F$ , коэффициент светопропускания оптической системы  $\tau_{\text{опт}}$ , коэффициент экранирования объектива  $\mu$ , квантовый выход ФПУ  $\eta$ , размер фоточувствительного элемента  $a_{\text{ПИ}}$  и время накопления заряда  $T_H$ , которое позволяет регулировать величину ЗП. В формуле (1)  $h\nu$  – энергия одного кванта излучения длины волны  $\lambda$ .

Оценить возможную потерю данных о местности в области темных и светлых полутонов изображения вследствие низкого контраста можно путем сопоставления величины ЗП с уровнями шкалы динамического диапазона яркости изображения. Коэффициенты спектральной яркости объектов, необходимые для расчета величин ЗП, приведены в таблице.

Объекты съемки	Магистрали и дороги с асфальтовым покрытием	Сухая трава	Поселки городского типа	Реки, озера	Городские кварталы с плотной застройкой	Лиственный лес	Облака
КСЯ объектов ( $\lambda=0,5 \text{ мкм}$ )	$\rho=0,1$	$\rho=0,26$	$\rho=0,21$	$\rho=0,08$	$\rho=0,18$	$\rho=0,11$	$\rho=0,91$

Таблица. Спектральные коэффициенты яркости природных и техногенных объектов

Известно, что в настоящее время радиометрическое разрешение космических снимков земной поверхности, получаемых современными средствами ДЗЗ, достигает 11 бит на пиксель. Это означает, что зарегистрированное излучение объектов местности можно представить в виде изображения, динамический диапазон яркости которого разбит на 2048 значений. Чтобы присвоить пикселю значение яркости, в процессе формирования изображения выполняется сопоставление уровней шкалы динамического диапазона яркости изображения и величины ЗП. Например, уровень  $m=2048$  характеризует наиболее яркий фрагмент изображения и соответствует максимальному значению ЗП. Уровень  $m=0$ , наоборот, приравни-

вается к наименее яркому фрагменту изображения и сопоставляется с ЗП, который образуется в результате действия темнового тока. В рамках исследований уровню  $m=2048$  сопоставлен ЗП, полученный при регистрации излучения облака  $N_e=116833$  фотоэлектронов. Определить соответствующие уровни яркости для других объектов, представленных в таблице, можно из следующего выражений:

$$m_i = \frac{N_{ei} \cdot m_{\max}}{N_{e \max}}, \quad (2)$$

где  $N_{ei}$  – величина ЗП;  $N_{e \max}$  – максимальный ЗП;  $m_{\max}$  – максимальный уровень шкалы динамического диапазона яркости;  $m_i$  – уровень шкалы динамического диапазона яркости  $N_{ei}$ .

На рис. 3, а, в графическом виде представлены зависимости, демонстрирующие изменение величин ЗП, полученных при регистрации излучения объектов, от времени накопления заряда ФПУ. На рис. 3, б, представлены результаты сопоставления ЗП объектов с уровнями шкалы динамического диапазона яркости изображения.

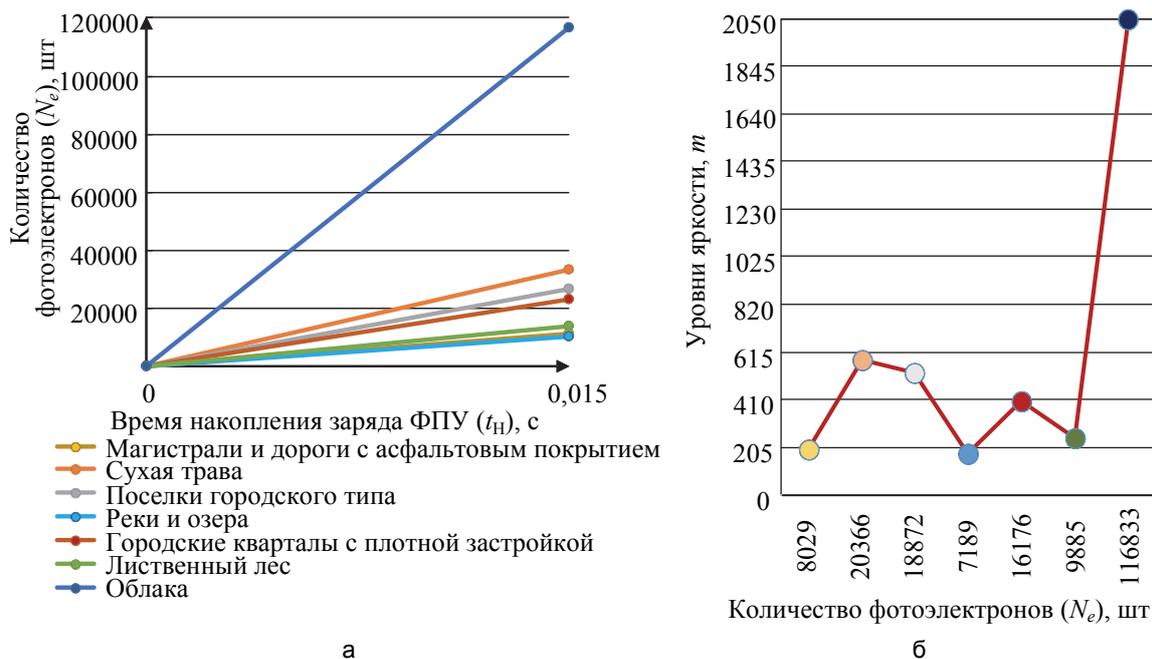


Рис. 3. Результаты расчетов: изменение количества фотоэлектронов от времени накопления заряда (а); изменение уровней яркости от количества фотоэлектронов (б)

Из рис. 3, б, видно, что наиболее ярким объектом сюжетно-важной части изображения является «сухая трава». Согласно формуле (2), величина ЗП для данного объекта ( $N_e = 33381$ ) соответствует уровню яркости  $m=585$ . Остальные объекты имеют уровни яркости существенно ниже. Таким образом, можно сделать вывод, что из всего динамического диапазона яркости изображения только треть используется для передачи данных о местности. Остальной интервал динамического диапазона яркости – от  $m=585$  до  $m=2048$  – несет в себе информацию об объектах преимущественно с высокими КСЯ. В рамках исследования таким объектом является облако, которое не представляет интерес для оператора. Это означает, что в ходе визуального анализа такого снимка внимание оператора будет сконцентрировано на работе со слабоконтрастными фрагментами изображения преимущественно в области темных полутонов. Низкий контраст между объектами существенно затрудняет выделение одних объектов на фоне других, что создает предпосылки к неправильному определению их пространственных характеристик, а в некоторых случаях может привести к потере данных. Оценить контраст изображения можно по формуле

$$K = \frac{m_{\max} - m_{\min}}{m_{\max} + m_{\min}}, \quad (3)$$

где  $m_{\max}$  – максимальная яркость на изображении;  $m_{\min}$  – минимальная яркость на изображении;  $K$  – контраст изображения.

Согласно формуле (3), контраст между дорогой с асфальтовым покрытием и прилегающим озером составляет  $K=0,05$ . Это означает, что оператор может испытывать трудности при выделении таких объектов на снимке в случае их близкого расположения или пересечения. Также затруднительным будет распознавание отдельных строений на фоне сухой травы. Полученные результаты демонстрируют необходимость разработки метода получения космических снимков, обеспечивающего передачу данных о местности в области темных и светлых полутонов изображения с большим контрастом.

### Расширение динамического диапазона изображения

Для получения контрастных изображений объектов, расположенных в условиях недостаточной освещенности, требуется увеличить время накопления заряда ФПУ. Однако выбор такого решения в условиях съемки из космоса приведет к появлению «засвеченных» фрагментов на изображении и возможной потере важных данных. С другой стороны, для съемки объектов с высокими КСЯ время накопления заряда ФПУ требуется сократить. Это предотвратит появление «засветки», но приведет к появлению «темных» областей на изображении, распознавание объектов в которых будет невозможно. В условиях, когда сложно выбрать правильное значение времени накопления заряда ФПУ, можно использовать метод расширения динамического диапазона изображения путем совместной обработки нескольких снимков земной поверхности, полученных с разным временем накопления заряда [8–15].

«Недоэкспонированное» изображение лучше передает детали объектов с высокими КСЯ. Для его получения время накопления заряда должно быть минимальным, например, равным времени насыщения ФПУ при регистрации излучения объектов с высокими отражающими характеристиками. В рамках исследования таким объектом является «облако». Для получения «нормально экспонированного» изображения время накопления заряда требуется увеличить, например, приравнять ко времени насыщения ФПУ при регистрации объектов со средними отражательными характеристиками. В качестве такого объекта выбрана «сухая трава». Третий, «переэкспонированный» снимок лучше передает детали объектов в области темных полутонов. Здесь время накопления заряда должно быть максимальным, поэтому его можно выбрать равным времени насыщения ФПУ при регистрации объектов с низкими отражательными характеристиками. Такими объектами являются «реки и озера». Рассчитать время накопления заряда ФПУ с учетом указанных требований можно по следующим формулам:

$$t_H = \Delta t + t_i, \Delta t = \frac{\Delta N_e \cdot t_{i \max}}{N_{e \max}}, \Delta N_e = N_{e \max} - N_{ei},$$

где:  $t_{H i}$  – требуемое время накопления заряда;  $\Delta t$  – временной интервал  $[t_i, t_{i \max}]$ ;  $t_i$  – время накопления заряда;  $t_{i \max}$  – время насыщения ФПУ;  $N_{ei}$  – размер ЗП;  $N_{e \max}$  – максимальный ЗП;  $\Delta N_e$  – разница между ЗП  $N_{ei}$  и  $N_{e \max}$ .

На рис. 4, а, в графическом виде представлены зависимости, демонстрирующие изменение количества фотоэлектронов от времени накопления заряда ФПУ для «недоэкспонированного» (линия 1), «нормально экспонированного» (линия 2) и «переэкспонированного» (линия 3) изображений, которые позволяют решить задачу расширения динамического диапазона яркости результирующего изображения, в частности, определить интервалы квантования (деления) ЗП для указанных изображений. Под интервалом квантования понимается промежуток времени, за который величина ЗП достигает значения, соответствующего максимальному уровню шкалы динамического диапазона яркости изображения. На рис. 4, б, в графическом виде представлены зависимости, демонстрирующие результаты сопоставления величин ЗП со шкалой динамического диапазона яркости результирующего изображения.

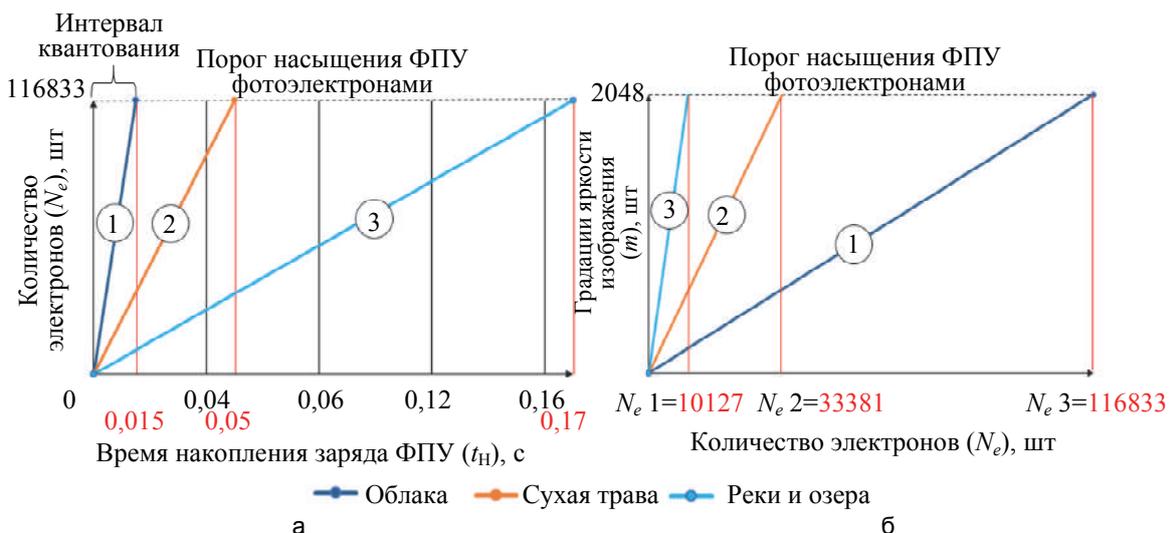


Рис. 4. Результаты расчетов: изменение количества фотоэлектронов от времени накопления заряда (а); изменение уровней яркости от количества фотоэлектронов (б)

Расширение динамического диапазона яркости изображения сводится к решению задачи сопоставления уровней одной шкалы разных величин ЗП «недоэкспонированного» (линия 1), «нормально экспонированного» (линия 2) и «переэкспонированного» (линия 3) изображений. Далее пикселям результи-

рующего изображения присваивается итоговое значение яркости, получить которое можно по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
 m_{\text{рез}} &= \frac{1}{3} \cdot k; \\
 \text{if } (k \leq N_{e1}) \{ &k = m_1 + m_2 + m_3 \}; \\
 \text{if } (N_{e1} < k \leq N_{e2}) \{ &k = m_{\text{max}} + m_2 + m_3 \}; \\
 \text{if } (N_{e2} < k \leq N_{e3}) \{ &k = m_{\text{max}} + m_{\text{max}} + m_3 \},
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

где  $m_{\text{рез}}$  – уровень шкалы динамического диапазона яркости результирующего изображения;  $m_1, m_2, m_3$ , – уровни шкалы динамического диапазона яркости исходных изображений;  $k$  – коэффициент пропорциональности.

На рис. 5 в графическом виде представлен результат расширения динамического диапазона яркости изображения. В частности, на указанном рисунке приведены значения яркости пикселей изображений объектов местности (рис. 2), полученные путем совместной обработки нескольких изображений (красная ломаная линия – контрастное изображение) и путем обоснованного выбора времени накопления заряда при съемке объектов из космоса (синяя ломаная линия – обычное изображение). Результаты расчетов демонстрируют, что контраст между объектами условно снимаемого участка местности в результате применения подхода, предложенного авторами, усилился. Это объясняется тем, что сопоставление величин ЗП с уровнями шкалы динамического диапазона яркости с использованием формулы (4) выполнено более оптимально.

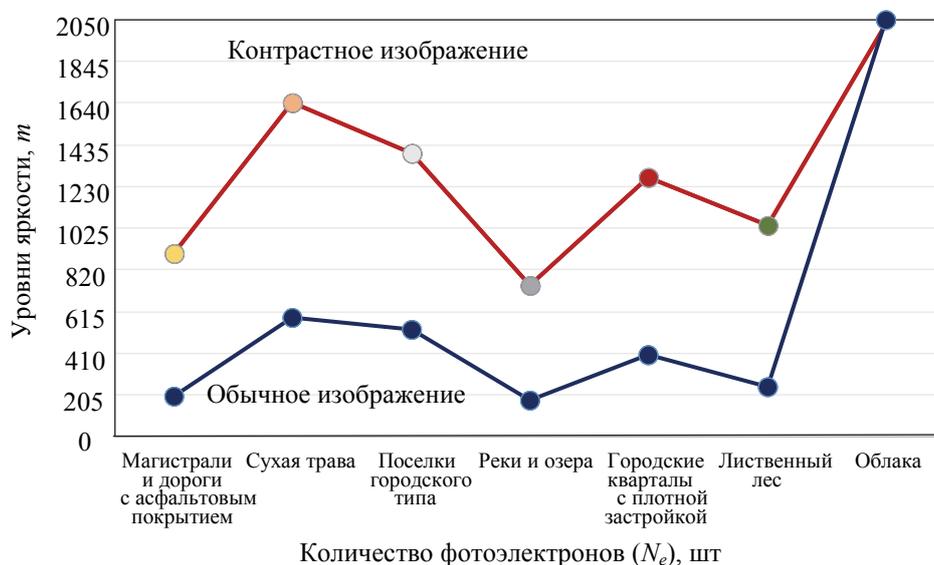


Рис. 5. Результат расширения динамического диапазона яркости изображения

Детальный анализ рис. 5 показывает, что уровни яркости, соответствующие объектам съемки, были распределены по всей шкале равномерно между областями светлых и темных полутонов. Например, наиболее ярким объектом сюжетно-важной части изображения по-прежнему осталась «сухая трава». Но значение уровня яркости данного объекта изменилось с  $m=585$  до  $m=1630$ . Это сделало данный объект более контрастным по отношению к другим объектам снимка, о чем позволяют судить результаты расчетов контраста, выполненные согласно формуле (5). Например, значение контраста между дорогами с асфальтовым покрытием и водной поверхностью, которое ранее составляло  $k=0,05$ , повысилось до значения  $k=0,32$ . Это означает, что оператор больше не будет испытывать трудности при выделении объектов на снимке в случае их близкого расположения или пересечения. Границы таких объектов будут видны более отчетливо, а результаты распознавания таких объектов будут более достоверными. Также можно говорить об увеличении контраста между другими объектами, выбранными для исследований.

### Заключение

Результаты расчетов демонстрируют, что получение космических снимков земной поверхности максимального качества путем обоснованного выбора параметров работы оптико-электронного комплекса в настоящее время невозможно. При попадании в полосу обзора объектов с широким диапазоном отражательных характеристик на полученных изображениях будут формироваться области из светлых и темных полутонов, детали объектов в которых неразличимы. Причиной затруднения интерпретации таких снимков является низкий контраст изображения. В условиях, когда выбор параметров работы оптико-

электронного комплекса носит неоднозначный характер, решить проблему повышения контраста можно путем расширения динамического диапазона изображения в результате совместной обработки нескольких снимков земной поверхности, полученных с разным временем накопления заряда фотоприемным устройством. Такой подход позволяет отобразить на снимке объекты с лучшим контрастом, даже если они размещены в плохих условиях освещенности.

Важно отметить, что в работе предложен подход, развитие которого предполагает решение ряда исследовательских задач: определение необходимого числа снимков для получения изображений с максимальным контрастом, формулирование баллистических условий, обеспечивающих возможность получения таких изображений, и ряд других частных задач.

## 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. Бакланов А.И. Системы наблюдения и мониторинга. М.: Бинوم, 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, 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. Mozhaikogo*, 2010, no. 629, pp. 143–147. (in Russian)
3. Grigoriev A.N., Dudin E.A., Korshunov D.S., Oktiabrskii 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., Ghusarev 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., 2014, 234 p.
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. Altukhov 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, 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

*Коршunов 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, Mozhayskiy 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, Mozhayskiy Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-8573-027X, eish@bk.ru

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