

УДК 528.067

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-410-416

МЕТОД ПОИСКА ИЗМЕНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО РАЗНОВРЕМЕННЫМ КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

А.И. Алтухов, 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 08.04.19, принята к печати 30.04.19

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Алтухов А.И., Коршунов Д.С. Метод поиска изменений состояния земной поверхности по разновременным космическим снимкам // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 3. С. 410–416. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-410-416

Аннотация

Предмет статьи. Исследуется подход к автоматизации процесса интерпретации космических снимков подстилающей поверхности, полученных бортовой оптико-электронной аппаратурой систем дистанционного зондирования Земли. Актуальность исследования определяется необходимостью внедрения методов машинного зрения с целью решения задачи поиска изменений состояния земной поверхности по разновременным данным космического мониторинга. Целью исследования является сокращение временных затрат, отводимых на обработку космических снимков больших территорий. **Описание метода.** В основу метода положена идея сравнения контраста разновременных космических снимков. Для реализации метода сформирован математический аппарат расчета значений контраста анализируемых изображений в нормированном интервале от 0 до 1. Результативность автоматизированной обработки космических снимков обеспечивается путем их предварительной сегментации и районирования. Параметры сегментации выбираются с учетом размеров объектов, подлежащих обнаружению. Работоспособность предложенного метода подтверждается высокой корреляцией результатов автоматизированной обработки с результатами визуального анализа тестовых космических снимков. **Основные результаты.** Представлены результаты расчета контраста тестовых изображений с использованием сформулированного математического аппарата. Доказана необходимость проведения сегментации изображений для решения задачи обнаружения изменений местности на примере обработки изображений, состоящих из разного количества фрагментов. Определен подход к сокращению избыточности данных об изменениях местности путем выполнения предварительной процедуры районирования, суть которой сводится к определению границ исследуемой местности с целью ограничения зон поиска изменений. **Практическая значимость.** Предложенный метод обработки данных дистанционного зондирования Земли обеспечивает выполнение интерпретации снимков подстилающей поверхности в автоматизированном режиме без участия оператора. Это позволяет ускорить интерпретацию снимков при наблюдении территорий большой площади.

Ключевые слова

дистанционное зондирование Земли, контраст изображений, обработка изображений

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-410-416

SEARCH METHOD FOR CHANGES OF THE EARTH'S SURFACE STATE THROUGH MULTI-TEMPORAL SATELLITE IMAGES

A.I. Altukhov, D.S. Korshunov

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

Article info

Received 08.04.19, accepted 30.04.18

Article in Russian

For citation: Altukhov A.I., Korshunov D.S. Search method for changes of the earth's surface state through multi-temporal satellite images. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 410–416 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-410-416

Abstract

Subject of Research. We study the approach to the underlying surface interpretation automation for satellite images obtained by the onboard optical-electronic equipment of the Earth remote sensing systems. The topicality of research is determined by the

necessity of introduction of computer vision methods aimed at solving the search problem of the earth's surface state changes through multi-temporal satellite monitoring data. The goal of research is reducing of the time spent on processing of large area satellite images. **Method.** The method is based on the idea of comparing the contrast of different-time satellite images. For method implementation, a mathematical apparatus is formed for calculating the contrast values of the analyzed images in the normalized interval from 0 to 1. The effectiveness of automated processing of satellite images is ensured by their pre-segmentation and zoning. Segmentation parameters are selected taking into account the size of the objects to be detected. The efficiency of the proposed method is confirmed by the high correlation of the automated processing results with the results of visual analysis of test satellite images. **Main Results.** The results of calculating the contrast of test images using the formulated mathematical apparatus are presented. The necessity of image segmentation is proved to solve the problem of detecting changes in the terrain on the example of processing images consisting of different number of fragments. An approach is developed for reducing the redundancy of data on terrain changes by performing a preliminary zoning procedure. The essence of this procedure is to determine the researched area boundaries in order to limit the zones for search of changes. **Practical Relevance.** The proposed method of data processing on the Earth remote sensing provides interpretation of the underlying surface images in an automated mode without operator participation. At that, the interpretation of images, when observing large areas, can be accelerated.

Keywords

Earth remote sensing, image contrast, image processing

Введение

Данные космического мониторинга широко применяются для исследования земной поверхности. Одно из предназначений космического мониторинга – это решение задачи поиска изменений состояния земной поверхности по разновременным данным дистанционного зондирования Земли [1–4]. Поиск таких изменений выполняется с использованием инструментальных методов и с непосредственным участием оператора-интерпретатора изображений. В ходе интерпретации космического снимка оператор сопоставляет данные разновременных наблюдений, что позволяет сделать вывод о наличии и характере изменений, либо об их отсутствии [5–7].

Следует отметить, что сегодня наряду с инструментальными методами обработки космических снимков активно применяются методы машинного зрения, позволяющие проводить автоматизированную обработку изображений без участия оператора. К примеру, методы машинного зрения широко применяются для обработки двумерных изображений с целью повышения их качества. В частности, решение такой задачи достигается путем выполнения процедур попиксельного увеличения контраста, операций по выделению границ объектов на изображениях, устранению шумов и геометрической коррекции снимков [8–10].

В основу методов машинного зрения в сфере дистанционного зондирования Земли из космоса положен детальный анализ космических снимков, базирующийся на математической оценке значений показателей качества изображений, к которым относят яркость, контраст, радиометрическое и пространственное разрешение и др. Важно отметить, что анализируемые показатели качества позволяют получить полноценное представление об изобразительных и геометрических характеристиках изображения, но не позволяют учесть содержание космического снимка. Поэтому исключение оператора из процесса интерпретации космических снимков в настоящее время остается невозможным.

В статье предложен автоматизированный метод поиска изменений состояния земной поверхности, в основу которого положен подход сравнения значений контраста разновременных космических снимков. Предварительные расчеты показывают, что предложенный подход позволяет определить область изменений на космическом снимке и, как следствие, ускорить его интерпретацию при наблюдении территорий большой площади.

Оценивание контраста цифровых изображений

Одним из наиболее значимых показателей качества изображения является контраст K , под которым понимается разность между максимальным и минимальным значениями диапазона яркости. С целью получения достоверных результатов анализа космических снимков процедуре тематической обработки предшествует ряд операций, направленных на повышение контраста изображения исследуемого объекта по отношению к изображению фона, на котором он расположен [11]. К таким процедурам относят экспонетрический расчет, выполняемый перед проведением съемки земной поверхности с целью выбора оптимальных параметров регистрации оптического излучения земной поверхности бортовой оптико-электронной аппаратурой [12]. Другой подход подразумевает выполнение предварительных процедур цифровой обработки изображений на наземных комплексах. Например, повышение контраста достигается путем выполнения таких преобразований, как линейное растягивание, нормализация, линеаризация и эквализация гистограммы изображений [13].

В настоящее время существует несколько подходов к оцениванию контраста изображений. В рамках исследований авторами выбран подход, предложенный Р.А. Воробелем [14], позволяющий провести оцени-

вание контраста изображений в нормированном в диапазоне яркостей от 0 до 1. Согласно данному подходу значение контраста рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{B_1 - B_2}{B_{\max}}, \quad (1)$$

где K — значение контраста, B_1 — измеренное значение яркости изображения объекта, B_2 — измеренное значение яркости изображения фона, B_{\max} — максимальное значение диапазона яркости изображения.

Важно отметить, что формула (1) представлена в обобщенном виде и используется для оценивания контраста в случае, если содержание изображений известно, что накладывает ограничения на возможность ее использования в методах машинного зрения. Автоматизированная обработка данных подразумевает учет распределения значений яркости всех элементарных ячеек в диапазоне яркости цифрового изображения. Решение данной задачи предлагается выполнить, используя методы статистического анализа на примере изображения с аддитивной моделью кодирования цвета RGB. В терминах теории вероятностей яркость такого изображения можно выразить через математическое ожидание случайной величины, которое находится по формуле:

$$M[X] = \sum_{i=1}^n x_i p_i, \quad (2)$$

где $M[X]$ — математическое ожидание случайной величины, x_i — измеренное значение случайной величины, p_i — вероятность появления значения случайной величины в ряду измерений, n — количество измерений значений случайной величины, i — номер измерения значения случайной величины.

Согласно формуле (2) яркость цифрового изображения, выраженная через математическое ожидание случайной величины, рассчитывается как средняя яркость всех пикселей по формуле:

$$B_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i + G_i + B_i, \quad (3)$$

где B — средняя яркость цифрового изображения, RGB — цветовые каналы в аддитивной модели кодирования цвета, N — количество пикселей в изображении.

Формула (3) позволяет оценить физическую яркость цифрового изображения без учета чувствительности зрительного анализатора оператора к различным участкам спектра оптического излучения. В данных условиях оценивание яркости цифрового изображения с аддитивной моделью кодирования цвета RGB целесообразно проводить в соответствии рекомендациями стандарта федеральной комиссии связи (FCC) по формуле:

$$B_{mid\ i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 0,299 R_i + 0,587 G_i + 0,114 B_i, \quad (4)$$

где B_{mid} — средняя видимая яркость цифрового изображения.

Результаты расчета видимой яркости цифрового изображения по формулам (4) позволяют произвести оценивание яркостного контраста путем сравнения различных участков снимка, приведенных к ахроматическим цветам. Анализ структуры гистограммы изображения позволяет сделать вывод, что контрастное изображение обладает приблизительно одинаковым количеством темных и ярких пикселей. Причем основное место сосредоточения пикселей наблюдается возле границ диапазона яркости. В терминах теории вероятностей объективным показателем яркостного контраста является дисперсия случайной величины, значение которой находится по формуле:

$$\delta^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (B_i - B_{mid})^2, \quad (5)$$

где δ^2 — дисперсия случайной величины, характеризующая яркостной контраст.

Для представления значения контраста цифрового изображения в нормированном диапазоне яркостей от 0 до 1 в соответствии с формулой (1) яркостной контраст можно выразить через отношение среднеквадратичного отклонения к максимальному значению диапазона яркости изображения:

$$K = \frac{2\sigma}{B_{\max}}. \quad (6)$$

Представленный подход к оцениванию контраста цифровых изображений положен в основу автоматизированного поиска изменений состояния земной поверхности с использованием разновременных космических снимков.

Автоматизированный поиск изменений состояния земной поверхности по разновременным космическим снимкам

Обработка данных космического мониторинга с использованием математического аппарата (1)–(6) позволяет обнаружить изменения состояния земной поверхности вследствие изменения контраста разновременных снимков, соответствующих одному участку земной поверхности. Причиной изменения контраста

является изменение количества объектов, находящихся в пределах поля зрения бортовой оптико-электронной аппаратуры на момент формирования космического снимка [15, 16]. Важно отметить, что реализация предлагаемого подхода на практике подразумевает выполнение процедуры предварительной обработки анализируемых изображений, суть которой сводится к сегментации космических снимков — разбиение изображений на фрагменты. Необходимость выполнения данной процедуры подтверждается результатами оценивания контраста двух тестовых разновременных космических снимков местности, представленных на рис. 1. Результаты автоматизированной обработки, проведенной с использованием математического аппарата (1)–(6), показывают одинаковый контраст тестовых изображений ($K = 0,41$). Из чего можно сделать вывод, что по критерию контраста выбранные изображения идентичны. В то время как данные визуального анализа тестовых изображений демонстрируют, что земная поверхность изменена вследствие выполнения мероприятий по развитию территории и проведения строительных работ. Для повышения результативности автоматизированной обработки с целью выявления изменений космических снимков предлагается провести сегментацию изображений с последующим оцениванием контраста полученных фрагментов. Процедуру сегментации рекомендуется проводить по пространственному признаку с учетом размеров объектов, подлежащих обнаружению. На рис. 2 представлен результат сегментации тестовых разновременных космических снимков.



Рис. 1. Разновременные космические снимки земной поверхности: космический снимок, отражающий исходное состояние земной поверхности (а), космический снимок, отражающий измененное состояние земной поверхности (б)

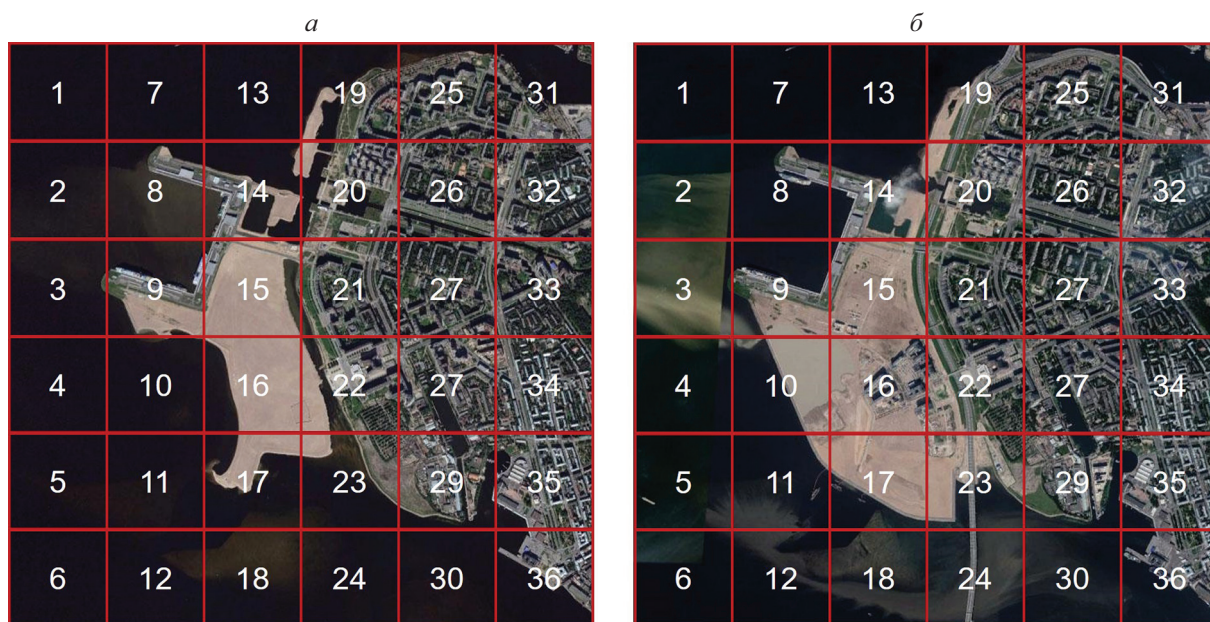


Рис. 2. Сегментированные изображения земной поверхности: исходное изображение (а), измененное изображение (б)

Результаты сравнения контраста полученных фрагментов приведены в таблице.

Таблица. Коэффициенты яркости природных и техногенных объектов

№ фрагмента	Значения контраста	№ фрагмента	Значения контраста	№ фрагмента	Значения контраста	№ фрагмента	Значения контраста
1	0,00/0,01	10	0,09/0,48	19	0,44/0,34	28	0,29/0,32
2	0,03/0,10	11	0,02/0,23	20	0,42/0,30	29	0,36/0,35
3	0,20/0,04	12	0,03/0,11	21	0,28/0,30	30	0,01/0,06
4	0,00/0,08	13	0,00/0,01	22	0,34/0,45	31	0,35/0,30
5	0,01/0,08	14	0,41/0,28	23	0,34/0,44	32	0,33/0,29
6	0,00/0,09	15	0,22/0,44	24	0,02/0,16	33	0,36/0,35
7	0,03/0,02	16	0,27/0,43	25	0,31/0,32	34	0,36/0,37
8	0,23/0,25	17	0,33/0,45	26	0,29/0,31	35	0,34/0,39
9	0,42/0,41	18	0,07/0,12	27	0,29/0,30	36	0,33/0,37

В таблице представлены результаты оценивания контраста 36 фрагментов космических снимков, отражающих исходное и измененное состояние земной поверхности. С целью выбора фрагментов, отражающих изменения на местности, проведено сопоставление рассчитанных значений контраста соответствующих фрагментов тестовых изображений. В качестве условия выбора искомым фрагментам сформулировано правило, согласно которому отбору подлежат фрагменты с разницей в контрасте $K \geq 0,1$. В результате выполнения процедуры сопоставления значений контраста к фрагментам тестовых изображений, отражающих изменения на местности, отнесены фрагменты — 3, 10, 14–17, 19, 20, 22–24 (строки таблицы, выделенные зеленым цветом). Остальные фрагменты тестовых изображений определены как не содержащие изменений (строки таблицы, выделенные желтым цветом). Результаты отбора фрагментов тестовых изображений приведены на рис. 3.

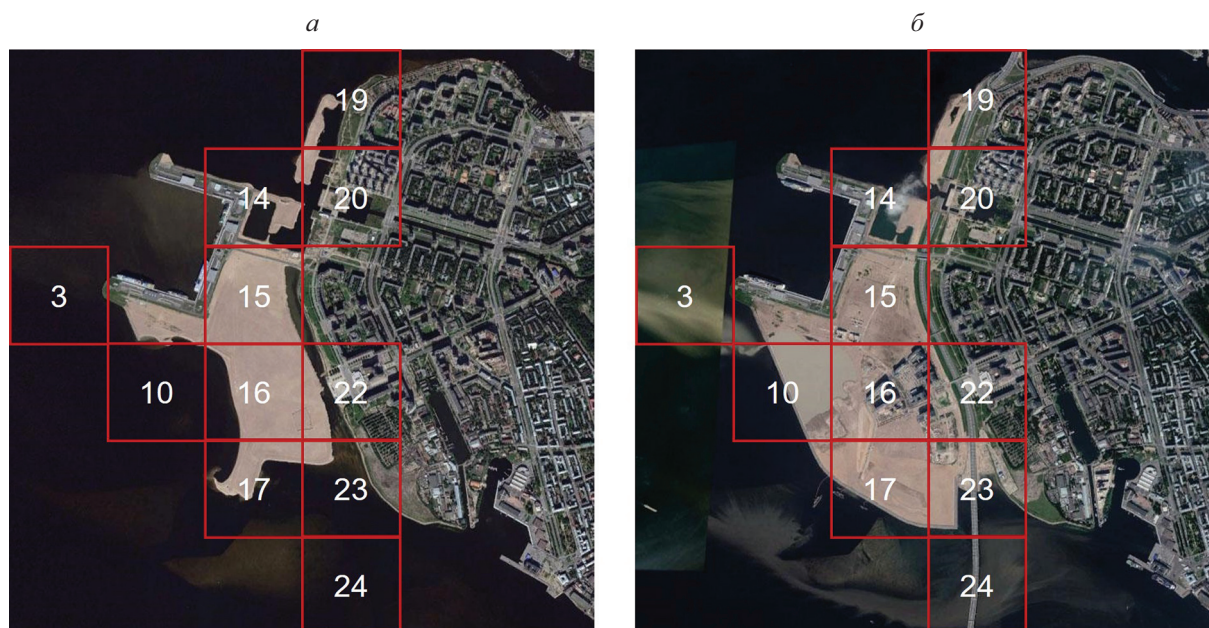


Рис. 3. Фрагменты тестовых изображений, отражающие изменения на местности: фрагменты исходного изображения (а), фрагменты измененного изображения (б)

Сопоставление результатов автоматизированной обработки с данными визуального анализа разновременных космических снимков позволяют сделать вывод о достоверности найденных изменений состояния земной поверхности. Так, на рис. 3 отражены фрагменты космического снимка, отражающие изменения земной поверхности вследствие выполнения мероприятий по развитию территории и проведения строительных работ.

Важно отметить, что автоматизированной обработке могут быть подвергнуты космические снимки территорий большой площади. В этих условиях, с целью сокращения избыточности данных об изменениях

земной поверхности, сокращения временных затрат, отводимых на обработку снимков и повышения достоверности результатов интерпретации изображений, предлагается проводить предварительную процедуру районирования территорий (рис. 4). Суть данной процедуры сводится к определению границ исследуемых территорий, в пределах которых требуется провести сопоставление изображений по критерию контраста. Решить эту задачу возможно используя современные методы картографирования территорий средствами геоинформационных систем [8].

На рис. 4 приведен пример сокращения избыточности данных об изменениях на местности путем сопоставления выбранных фрагментов тестовых изображений с границами исследуемой территории. Результатом такого сопоставления стало исключение фрагментов 3, 24 (таблица) из состава данных, отражающих изменения на местности.



Рис. 4. Результат сокращения избыточности данных: фрагменты исходного изображения (а), фрагменты измененного изображения (б)

Заключение

В статье предложен метод автоматизированного поиска изменений состояния земной поверхности, который базируется на идее сравнения значений контраста разновременных космических снимков. Для оценивания контраста сформирован математический аппарат, позволяющий рассчитать значение указанного показателя качества изображения в нормированном интервале от 0 до 1. Результативность автоматизированной обработки с целью выявления изменений космических снимков достигается путем их сегментации и районирования территорий. Параметры сегментации предложено выбирать с учетом размеров объектов, подлежащих обнаружению. Высокая корреляция результатов автоматизированной обработки с результатами визуального анализа тестовых космических снимков подтвердила работоспособность метода, что доказывает возможность его использования на практике.

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. Горбачёв А.А., Коротаев В.В., Ярышев С.Н. Твердотельные матричные фотопреобразователи и камеры на их основе. СПб: НИУ ИТМО, 2013. 98 с.
3. Korotaev V.V., Maraev A.A. Sources and Detectors of Optical Radiation. St. Petersburg, ITMO University, 2017. 104 p.
4. Григорьев А.Н., Коршунов Д.С., Беляев А.С. Прогнозирование качества космических снимков дистанционного зондирования // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2010. № 629. С. 143–147.
5. Бакланов А.И. Системы наблюдения и мониторинга. М.: Бинум, 2014. 234 с.

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. 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)
3. Korotaev V.V., Maraev A.A. *Sources and Detectors of Optical Radiation*. St. Petersburg, ITMO University, 2017, 104 p.
4. 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)
5. Baklanov A.I. *Observation and Monitoring Systems*. Moscow, Binom Publ., 2009, 234 p. (in Russian)

6. 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.
7. 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
8. 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.
9. 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
10. Коротаев В.В., Мельников Г.С., Михеев С.В., Самков В.М., Солдатов Ю.И. Основы тепловидения. СПб: НИУ ИТМО, 2012. 122 с.
11. 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.
12. Занин К.А. Выбор параметров оптико-электронной космической системы наблюдения по качеству изображения // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2007. № 11. С. 30–37.
13. Красильников Н.Н. Цифровая обработка 2D и 3D изображений. СПб: БХВ-Петербург, 2011. 608 с.
14. Воробель Р.А. Цифровая обработка изображений на основе теории контрастности: Дис. докт. техн. наук. Львов, 1999. 369 с.
15. 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.
16. Vasilev A.S., Korotaev V.V. Research of the fusion methods of the multispectral optoelectronic systems images // Proceedings of SPIE. 2015. V. 9530. Art. 953007. doi: 10.1117/12.2184554
6. 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)
7. Altuhov 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 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-24-30
8. 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)
9. 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
10. 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)
11. 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)
12. 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)
13. Krasil'nikov N.N. *Digital Processing of 2D and 3D Images*. St. Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2011, 608 p. (in Russian)
14. Vorobel' R.A. *Digital Image Processing on the Basis of the Contrast Theory. Dr. Eng. Sci. Dis.* L'vov, Ukraine, 1999, 369 p. (in Russian)
15. 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)
16. Vasilev A.S., Korotaev V.V. Research of the fusion methods of the multispectral optoelectronic systems images. *Proceedings of SPIE*, 2015, vol. 9530, art. 953007. doi: 10.1117/12.2184554

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
Коршунов 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, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-4105-029, aai_51@mail.ru
Denis S. Korshunov — PhD, senior lecturer, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-6344-2533, korshunov.denis@rambler.ru