

УДК 004.932.4

КОМПЛЕКСНЫЙ АЛГОРИТМ ОБЪЕДИНЕНИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ И ПАНХРОМАТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© В. В. Шипко

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»,
394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а
E-mail: shipko.v@bk.ru*

Представлен комплексный алгоритм объединения гиперспектральных и высокодетальных панхроматических изображений. Алгоритм включает в себя предварительные процедуры выделения контуров и последующего совмещения гиперспектрального и панхроматического изображений по соответствующим точкам их контуров. В результате точного совмещения повышается точность спектрального разделения объектов на гиперспектральных изображениях. Полученное результирующее гиперспектральное изображение обладает высоким спектральным и пространственным разрешением. Результаты численных исследований подтверждают высокую эффективность разработанного алгоритма.

Ключевые слова: гиперспектральные изображения, панхроматическое изображение, повышение пространственного разрешения, объединение.

DOI: 10.15372/AUT20220102

Введение. В настоящее время прослеживается интенсивное развитие и внедрение технологий гиперспектральной съёмки в различные области деятельности человека. Современные образцы гиперспектральной аппаратуры охватывают ультрафиолетовую, видимую и ближнюю инфракрасную области спектра [1, 2]. С одной стороны, получаемые с помощью такой аппаратуры гиперспектральные изображения (ГСИ) обладают высоким спектральным разрешением (единицы нанометров), так что в одном кадре (гиперкубе) может содержаться несколько сотен спектральных компонент. С другой стороны, в силу различных технических ограничений формирования ГСИ они обладают более низким пространственным разрешением по сравнению с панхроматическими изображениями (ПИ), получаемыми в широких областях спектра. Так, один пиксел ГСИ, соответствующий определённой площади зондируемой поверхности, может содержать десятки и даже сотни пикселей ПИ более высокого пространственного разрешения. Таким образом, спектральная характеристика каждого пиксела ГСИ, по сути, является интегральной спектральной характеристикой составляющих объектов или граничащих разнотипных фонов, расположенных на соответствующей пикселу ГСИ площади зондируемой поверхности. Такие пикселы ГСИ называют «смешанными» [3]. Например, при применении различных алгоритмов классификации [4] смешанных пикселей результаты приводят к ошибкам в определении площадей, так как каждый пиксел может быть отнесён только к одному конкретному классу, хотя при низком пространственном разрешении фактически он содержит два и более класса. Кроме того, смешанный пиксел может оказаться не согласованным ни с одним из эталонов или, напротив, иметь сходство со спектральной сигнатурой другого эталона, который в действительности отсутствует в этом пикселе. Поэтому требуется знание спектральных характеристик отдельных более малых объектов, а не смеси их спектральных характеристик.

Анализ показал, что существуют методы и алгоритмы объединения ГСИ с высоким спектральным, но, как правило, низким пространственным разрешением и ПИ высокого

пространственного разрешения. Из множества методов и алгоритмов объединения ГСИ и ПИ [5–7] можно выделить два главных подхода. Первый основан на попиксельном переносе высокочастотной составляющей ПИ на ГСИ, при этом ГСИ предварительно передискретизируется в более частой пространственной решётке в соответствии с дискретизацией ПИ. Недостатками указанного подхода являются потеря спектральной информации, а также артефакты, проявляющиеся в силу того, что большинство пикселей ГСИ характеризуется смесью нескольких объектов, присутствующих на ПИ. Второй подход основан на спектральном разделении объектов, составляющих пиксел ГСИ на базе картографической информации либо синхронно полученных многозональных изображений, либо ПИ. В качестве ещё одного недостатка как первого, так и второго подхода является отсутствие учёта точной взаимной ориентации и привязки ГСИ и, например, ПИ, получаемых разными датчиками. Ведь даже при синхронном их получении со взаимной ориентацией полей зрения датчиков на один и тот же участок местности будут присутствовать пространственные искажения раstra ГСИ относительно ПИ, и это может привести к снижению точности либо вовсе ложному спектральному разделению объектов на ГСИ. Такие обстоятельства требуют разработки комплексного алгоритма совмещения, спектрального разделения и объединения ГСИ и высокодетального ПИ, учитывающего их взаимные пространственные искажения, а также яркостные отличия пикселей ПИ от соответствующих пикселей ГСИ, которые вызваны разнородностью датчиков.

Цель работы — создание и исследование алгоритма повышения пространственного разрешения и точности спектрального разделения ГСИ по ПИ более высокого пространственного разрешения, позволяющего использовать ПИ, которые получены в другие моменты времени (не синхронно) по отношению к ГСИ.

Постановка задачи. Пусть имеется ГСИ $A_{i,j}^l$ с пространственным разрешением $i = 1, \dots, I$ элементов по строкам и $j = 1, \dots, J$ по столбцам и спектральным разрешением $l = 1, \dots, L$ в соответствующем спектральном диапазоне $[\lambda_1, \dots, \lambda_L]$ с квантованием яркости $[0, \dots, 2^N - 1]$, где N — степень квантования яркости компонент ГСИ. А также имеется широкоформатное, высокодетальное ПИ $B_{r,s}$ с пространственным разрешением $r = 1, \dots, R$ элементов по строкам и $s = 1, \dots, S$ по столбцам, полученное в широком спектральном диапазоне $\bar{\lambda} \in [\lambda_1, \dots, \lambda_L]$. При этом предполагается, что пространственные размеры $I \times J$ поля ГСИ являются составной частью поля ПИ $R \times S$, так что $[I \times J] \subset [R \times S]$, а участок местности $r' = 1, \dots, R'$, $s' = 1, \dots, S'$, $[R' \times S'] \subset [R \times S]$ на ПИ, пространственно соответствующий участку местности $I \times J$ на ГСИ, определяется соотношением

$$\frac{R' \times S'}{\mu^2(I \times J)} = 1, \quad (1)$$

где μ — масштабный коэффициент. За эталонное по пространственной ориентации выбирается ПИ.

Тогда задача повышения пространственного разрешения ГСИ $A_{i,j}^l$ по ПИ $B_{r,s}$ состоит в определении его в более частой пространственной решётке $r' = 1, \dots, R'$, $s' = 1, \dots, S'$ в соответствии с пространственным описанием объектов, расположенных на участке ПИ $B_{r',s'}$, и определении спектральных характеристик этих объектов:

$$A_{r',s'}^l = F_2[F_1[A_{i,j}^l, B_{r,s}],] \quad (2)$$

где F_1, F_2 — операторы пространственного и спектрального преобразований соответственно.

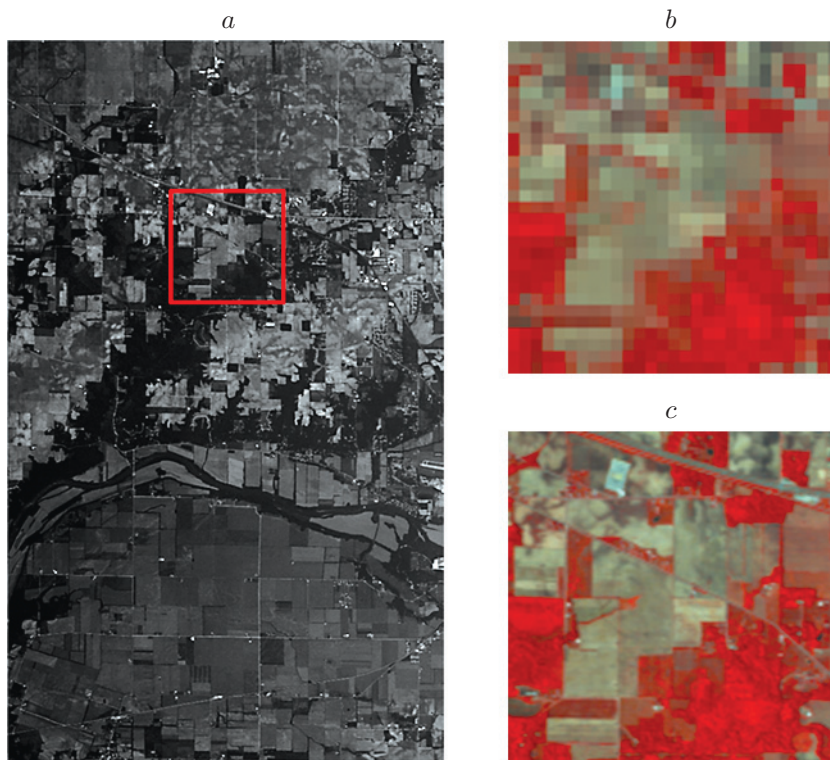


Рис. 1. Исходные изображения: *a* — ПИ высокого пространственного разрешения, *b* — RGB-композит (40-, 20-, 10-й каналы) ГСИ низкого спектрального разрешения, *c* — RGB-композит эталонного ГСИ высокого пространственного разрешения

Алгоритм объединения ГСИ и ПИ. Для наглядного представления результатов работы алгоритма на отдельных этапах в качестве примера для моделирования и обработки взяты ГСИ опытного полигона Indian Pines (северо-запад штата Индиана, США), полученные в рамках программы AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer) в июне 1999 г. Гиперспектральные изображения состоят из 220 спектральных каналов в диапазоне от 0,4 до 2,5 мкм; при этом 33 канала, содержащих высокий уровень шума, при проведении исследований были удалены. Пространственное разрешение ГСИ составляет ≈ 20 м/пиксел.

На рис. 1, *a* показано ПИ, полученное путём усреднения ряда компонент ГСИ в видимой области спектра, а также подвергнутое яркостному контрастированию в целях более наглядного представления. Рамкой на ПИ выделен участок, соответствующий ГСИ (рис. 1, *b*, *c*). Гиперспектральное изображение с низким разрешением (см. рис. 1, *b*) получено путём прореживания и усреднения эталонного ГСИ (см. рис. 1, *c*). В приведённом примере разрешение ГСИ уменьшено в 5 раз по отношению к ПИ ($\mu = 5$), т. е. одному пикселу ГСИ соответствует 25 пикселов ПИ.

На первом этапе алгоритма выделяются контуры объектов на ПИ (рис. 2, *a*, *b*) и ГСИ (рис. 2, *c*), например, алгоритмами, представленными в [8, 9], и находятся, как минимум, четыре пары соответствующих точек. Далее совмещаются точки контуров ГСИ с эталонными точками контуров ПИ с помощью аффинных или проективных преобразований [9] в зависимости от степени взаимных искажений контуров ГСИ и ПИ.

На рис. 3, *a* представлен результат точного совмещения контуров ГСИ и ПИ, а на рис. 3, *b* для сравнения — результат совмещения с ошибкой на 2 пиксела ГСИ по вертикали и горизонтали.

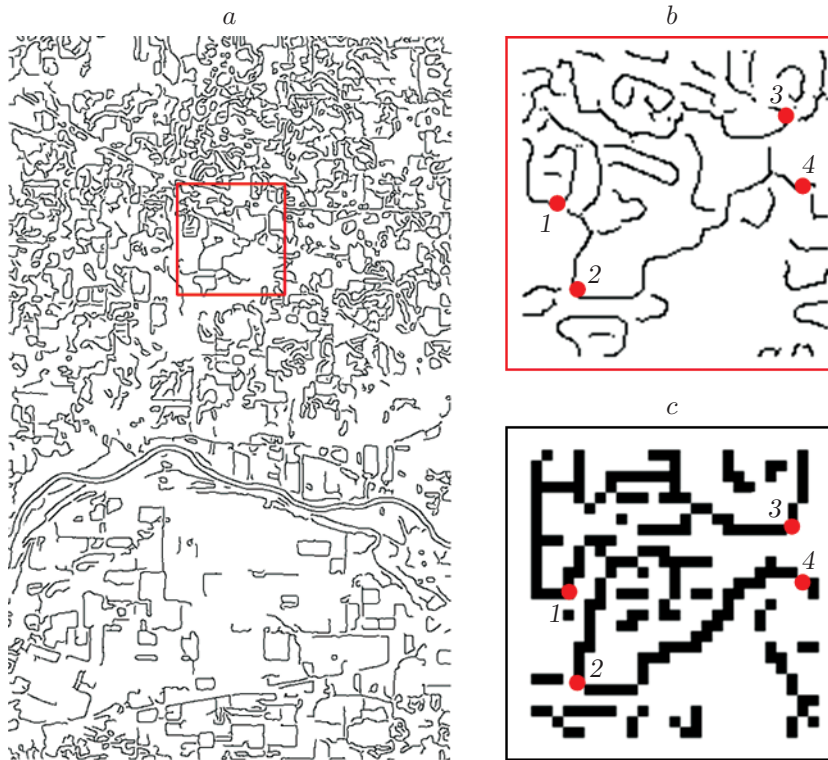


Рис. 2. Результат выделения контуров: *a* — ПИ, *b* — фрагмент ПИ, пространственно соответствующий ГСИ, *c* — ГСИ

На втором этапе преобразовывается растр (сдвиг, поворот, изменение масштаба и т. д.) ГСИ таким образом, чтобы координаты соответствующих точек контуров ГСИ и ПИ совпадали, а растр ПИ обрезается в точках пространственного несовпадения с ГСИ. Формируются новые индексы строк $r' = 1, \dots, R'$ и столбцов $s' = 1, \dots, S'$ обрезанного ПИ $B_{r',s'}$, пространственно соответствующего ГСИ $A_{i,j}^l$.

На третьем этапе вычисляется масштабный коэффициент $\mu = \sqrt{I \times J / (R' \times S')}$, на основе которого формируется виртуальная масштабная сетка по строкам $r'_i = \text{round}[(i - 1)\mu + 1, \dots, i\mu]$ и столбцам $s'_j = \text{round}[(j - 1)\mu + 1, \dots, j\mu]$ ПИ, состоящая из $I \times J$ ячеек и соответствующая размеру ПИ $B_{r',s'}$. После этого выполняется усреднение ГСИ по M спектральным компонентам, соответствующим спектральному диапазону регистрации ПИ:

$$\bar{A}_{i,j} = \frac{1}{M} \sum_{l=1}^M A_{i,j}^l. \quad (3)$$

Заключительным шагом третьего этапа является приведение гистограммы [10] изображения $\bar{A}_{i,j}$ к гистограмме ПИ $B_{r',s'}$ в целях формирования соответствующего яркостного распределения для качественного спектрального разделения. На рис. 4, *a* представлено ПИ $B_{r',s'}$ с наложением масштабной сетки с размером ячейки, соответствующей размеру i, j -го пиксела ГСИ, а на рис. 4, *b* показано изображение $\bar{A}_{i,j}$ после приведения гистограммы, масштабирования и наложения соответствующей сетки.

На четвёртом этапе выполняется спектральное разделение на отдельные объекты по яркостям r'_i, s'_j -х пикселей ПИ $B_{r',s'}$ в каждой i, j -й ячейке, соответствующей i, j -му пик-



Рис. 3. Результат совмещения контуров ГСИ и ПИ: *a* — точное совмещение, *b* — совмещение с ошибкой

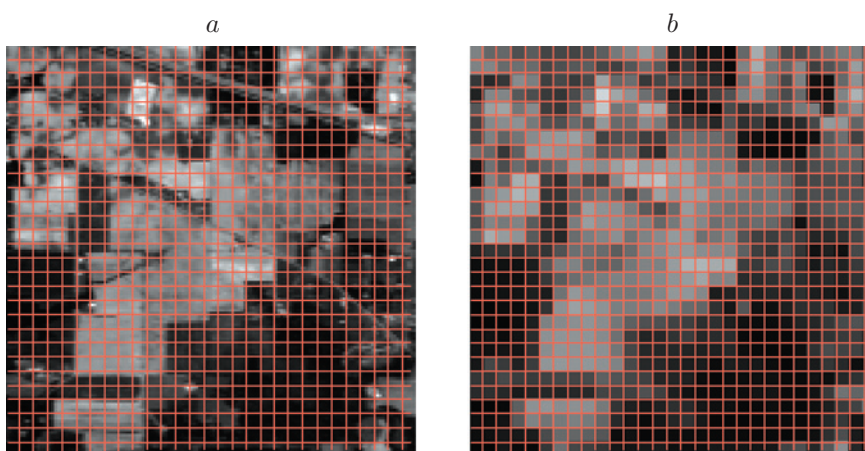


Рис. 4. Результат наложения масштабной сетки: *a* — ПИ, *b* — ГСИ, усреднённое по спектральным компонентам в диапазоне формирования ПИ

сету ГСИ, например, путём вычисления среднеквадратического отклонения:

$$\sigma_{i,j} = \sqrt{\frac{\sum_{r'_i=(i-1)\mu+1}^{i\mu} \sum_{s'_j=(j-1)\mu+1}^{j\mu} (B_{r'_i, s'_j} - \bar{A}_{i,j})^2}{[(i\mu - [(i-1)\mu + 1]) + 1][(j\mu - [(j-1)\mu + 1]) + 1]}}. \quad (4)$$

Далее $\sigma_{i,j}$ сравнивается с порогом. Если значение $\sigma_{i,j}$ превышает заданный порог T , то i, j -й пиксел ГСИ считается «смешанным» и соответствует нескольким объектам, отображаемым на ПИ, а если $\sigma_{i,j}$ меньше порога, то i, j -й пиксел считается «чистым» и соответствует одному объекту. Всем «смешанным» i, j -ым пикселям присваиваются нули, а «чистые» сохраняются:

$$C_{i,j}^l = \begin{cases} A_{i,j}^l, & \text{если } \sigma_{i,j} \leq T; \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (5)$$

На рис. 5, *a* представлен пример спектрального разделения (выделения чистых пикселов ГСИ) в соответствии с выражением (5) при $T = 30$ для случая точного совмещения контуров и растров ГСИ и ПИ, как представлено на рис. 3, *a*, а на рис. 5, *b* — пример

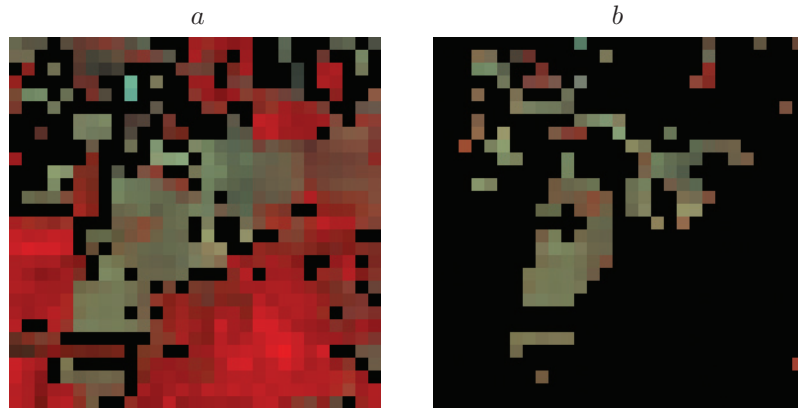


Рис. 5. Результат спектрального разделения: *a* — при точном совмещении ГСИ и ПИ, *b* — при совмещении с ошибкой

спектрального разделения для случая совмещения контуров с ошибкой, как на рис. 3, *b*. Из рис. 3–5 видно, что точное совмещение ГСИ и ПИ играет важную роль в точности спектрального разделения объектов. Так, на рис. 5, *b* подавляющее большинство пикселей отнесено к смешанным, что в действительности не является таковым. С учётом того что на примере неточного совмещения растров ГСИ и ПИ ошибка взаимной ориентации была линейной и небольшой, при более сильных взаимных искажениях ГСИ и ПИ спектральное разделение вовсе будет ложным.

На пятом этапе формируется итоговое ГСИ $D_{r',s'}^l$ (рис. 6, *a*) с пространственным разрешением $r' = 1, \dots, R'$ элементов по строкам, $s' = 1, \dots, S'$ по столбцам и спектральным разрешением $l = 1, \dots, L$ путём присвоения каждому r'_i, s'_j -му пикселу ПИ спектральной характеристики, наиболее схожей с характеристикой одного из ближайших по окрестности $i \pm p, j \pm q$ объектов, отображаемых на ГСИ:

$$D_{r',s'}^l = C_{i,j}^l \Rightarrow \min_{i \pm p, j \pm q} \{B_{r'_i, s'_j}, \bar{C}_{i \pm p, j \pm q} \neq 0\}, \quad (6)$$

где $\bar{C}_{i,j} = \frac{1}{M} \sum_{l=1}^M C_{i,j}^l$; $p = 0, 1, \dots, P$; $q = 0, 1, \dots, Q$ — параметры окрестности i, j -го пиксела.

Для сравнения на рис. 6, *b* приведён пример объединения ГСИ и ПИ на основе переноса высокочастотной составляющей ПИ [5] после точного взаимного совмещения ГСИ и ПИ по предлагаемым процедурам.

В качестве критерия различия эталонного ГСИ $A_{r',s'}^l$ высокого пространственного разрешения (см. рис. 1, *c*) и восстановленного изображения $D_{r',s'}^l$ выбрана среднеквадратическая ошибка (СКО)

$$\sigma^l = \sqrt{\frac{1}{R'S'} \sum_{r'=1}^{R'} \sum_{s'=1}^{S'} (D_{r',s'}^l - A_{r',s'}^l)^2}. \quad (7)$$

На рис. 6, *c* представлены СКО (7) для разработанного алгоритма (кривая 1), для алгоритма на основе переноса высокочастотной составляющей ПИ [5] (кривая 2), а также для исходного ГСИ (см. рис. 1, *b*) низкого пространственного разрешения (кривая 3). Видно, что СКО для разработанного алгоритма преимущественно ниже практически по

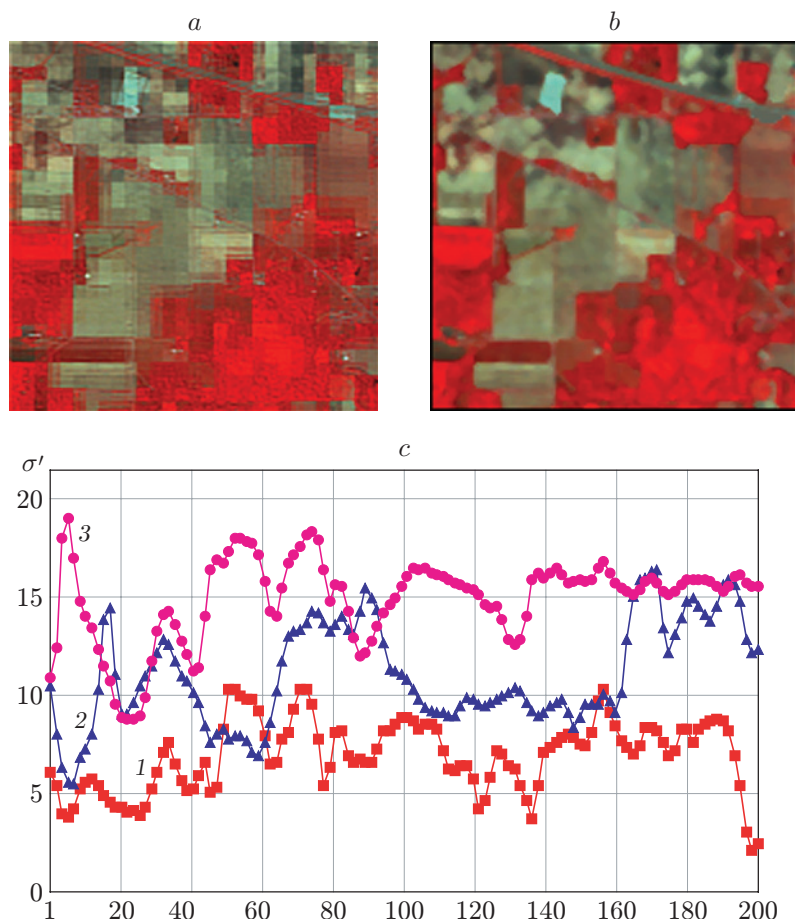


Рис. 6. Результаты повышения пространственного разрешения ГСИ: *a* — RGB-композит ГСИ после обработки по созданному алгоритму, *b* — RGB-композит ГСИ после обработки алгоритмом на основе переноса высокочастотной составляющей ПИ [5], *c* — численная оценка эффективности алгоритмов в соответствии с критерием (7)

всем спектральным компонентам в сравнении с алгоритмом переноса высокочастотной составляющей.

Заключение. Таким образом, в предлагаемом комплексном алгоритме объединения ГСИ и ПИ высокого пространственного разрешения за счёт их взаимной пространственной привязки и масштабирования происходит повышение точности спектрального разделения ГСИ низкого пространственного разрешения на отдельные объекты и последующее повышение пространственного разрешения, а также открывается возможность использования ПИ, полученных в другие моменты времени (не синхронно) по отношению к ГСИ. В результате вычислительного эксперимента на примере обработки тестового изображения

показано, что средняя по спектральным компонентам СКО $\bar{\sigma} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \sigma^l$ для разрабо-

танного алгоритма составляет 6,1, для алгоритма на основе переноса высокочастотной составляющей $\bar{\sigma} = 9,8$, а для необработанного изображения $\bar{\sigma} = 13,3$. Из чего следует, что разработанный алгоритм позволяет в 2,2 раза снизить СКО по отношению к исходному изображению и в 1,6 раза по отношению к прототипу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Виноградов А. Н., Егоров В. В., Калинин А. П. и др.** Линейка авиационных гиперспектрометров ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного диапазонов // Оптический журнал. 2016. **88**, № 4. С. 54–62.
2. **Пожар В. Э., Мачихин А. С., Гапонов М. И. и др.** Гиперспектрометр на основе перестраиваемых акустооптических фильтров для БПЛА // Светотехника. 2018. № 4. С. 47–50.
3. **Журавель Ю. Н., Федосеев А. А.** Особенности обработки гиперспектральных данных дистанционного зондирования при решении задач мониторинга окружающей среды // Компьютерная оптика. 2013. **37**, № 4. С. 471–476.
4. **Борзов С. М., Потатуркин О. И.** Спектрально-пространственные методы классификации гиперспектральных изображений. Обзор // Автометрия. 2018. **54**, № 6. С. 64–86. DOI: 10.15372/AUT20180607.
5. **Шовенгердт Р. А.** Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2013. 592 с.
6. **Современные** технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / Под ред. В. В. Еремеева. М.: Физматлит, 2015. 460 с.
7. **Перспективные** информационные технологии дистанционного зондирования Земли / Под ред. В. А. Сойфера. Самара: Новая техника, 2015. 256 с.
8. **Шипко В. В., Самойлин Е. А., Пожар В. Э., Мачихин А. С.** Выделение контуров на гиперспектральных изображениях // Автометрия. 2021. **57**, № 6. С. 67–75. DOI: 10.15372/AUT20210607.
9. **Обработка** изображений в авиационных системах технического зрения / Под ред. Л. Н. Костяшкина, М. Б. Никифорова. М.: Физматлит, 2016. 240 с.
10. **Гонсалес Р., Вудс Р.** Цифровая обработка изображений. Изд. 3-е, испр. и доп. М.: Техносфера, 2019. 1104 с.

Поступила в редакцию 10.12.2021

После доработки 28.12.2021

Принята к публикации 19.01.2022