

Помехоустойчивое комплексирование мульти- и гиперспектральных изображений в оптико-электронных комплексах информационного обеспечения современных и перспективных вертолетов

Шипко В.В.

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени

профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

ул. Старых Большевиков, 54а, Воронеж, 394064, Россия

e-mail: shipko.v@bk.ru

Статья поступила 14.01.2020

Аннотация

В работе рассмотрен алгоритм комплексирования многоспектральных изображений в условиях аддитивного гауссовского шума, основанный на методе межканальной градиентной реконструкции. Предложенный алгоритм позволяет устранять высокодисперсные значения амплитуды шумов в спектральных компонентах многоспектральных изображений при их комплексировании, а также повысить локальный контраст результирующего изображения, содержащего элементы исходных изображений одной и той же сцены, полученных в разных спектральных диапазонах, при этом максимально сохранив контурные признаки объектов от всех спектральных компонент многоспектрального изображения и яркостный портрет приоритетной спектральной компоненты. Представлены примеры комплексированных изображений и результаты численных исследований, подтверждающие эффективность предложенного метода.

Ключевые слова: мультиспектральные изображения, гиперспектральные изображения, комплексирование, аддитивный шум, оптико-электронные системы.

Введение

В настоящее время интенсивно развиваются комплексы дистанционного зондирования Земли в направлении расширения спектрального диапазона съемки и увеличения спектрального разрешения [1-3]. Создаются многоканальные комплексы мониторинга Земной поверхности воздушного и космического базирования. Не исключением остаются и комплексы информационного обеспечения вертолетов (обзорно-пилотажные, обзорно-поисковые, обзорно-прицельные), в состав которых входят многоспектральные, а в перспективе гиперспектральные датчики оптического излучения, которые будут интегрированы в единую информационную систему [5, 6]. Применение гиперспектральной съемки позволяет повысить эффективность обнаружения и распознавания объектов сцены. В свою очередь, при гиперспектральной съемке детектируемое излучение разделяется на сотни составляющих формируемого гиперспектрального изображения, что приводит к существенному снижению уровня полезного сигнала по отношению к шуму. Гиперспектральные изображения подвержены аддитивному некоррелированному шуму, уровень которого может достигать больших значений. При этом выдвигаются достаточно жесткие требования и на высокое пространственное разрешение таких комплексов.

Существует множество методов и технологий обработки изображений [7-12], при этом одним из самых важных направлений обработки мульти- и гиперспектральных изображений является их комплексирование [13-17]. Как правило

комплексирование заключается в совместной обработке нескольких изображений одного и того же участка местности, полученных в различных спектральных диапазонах, в результате чего можно дополнительно значительно повысить заметность объекта или его деталей на едином изображении. Это происходит благодаря возможности извлечения посредством такой обработки дополнительной информации об объектах местности, заключенной в характере взаимосвязи зональных яркостей между спектральными диапазонами. Конечным продуктом комплексирования может быть как единое полутонное, так и псевдоцветное изображение на котором с требуемой точностью отображаются спектральные признаки объектов интереса.

Достоинствами синтеза единого (комплексированного) изображения является:

- возможность аккумуляции в единое изображение особенностей спектральнозональных изображений объектов местности;
- возможность сделать доступной информацию многоспектральных изображений, связанную с корреляцией яркостей между каналами съемки, а точнее с различиями в корреляциях яркостей объектов и фонов.

Как показал анализ [14-18], очень часто при комплексировании мультиспектральных и гиперспектральных изображений выбирают приоритетную спектральнозональную компоненту с целью максимизировать ее влияние на результирующее единое изображение. Поскольку при наличии большого набора спектральнозональных компонент с различными фоно-объектовыми портретами, а часто это инверсные области, возникают трудности их качественного объединения, в частности при усреднении таких областей они сольются в один тон. Поэтому выбирается приоритетная спектральнозональная компонента, к которой по

определенному правилу добавляются отличительные признаки других компонент. Как известно, наиболее информативными отличительными признаками являются контура объектов, поэтому этот факт будет использоваться при постановке задачи и синтезе единого комплексированного изображения и оценке его эффективности. Также необходимо учесть возможность устранения шумовой составляющей в компонентах изображения. Рассмотрим разработанный алгоритм комплексирования мульти и гиперспектральных изображений на основе переноса градиентов.

Постановка задачи

Используемая модель исходного оцифрованного по строкам i и столбцам j L -компонентного изображения Λ в общем случае имеет вид:

$$\Lambda = [\lambda_{i,j}^1 \quad \lambda_{i,j}^2 \quad \cdots \quad \lambda_{i,j}^L]^T, \quad \lambda_{i,j}^l \in [0, \dots, 2^N - 1], \quad (1)$$

где $i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$; m, n – число строк и столбцов изображения соответственно;

$\lambda_{i,j}^l$ – элементы компоненты l ; l – индекс компоненты, $l = 1, \dots, L, N$ – степень

квантования яркости компонент изображения Λ ;

Модель L -компонентного изображения, искаженного воздействием аддитивного гауссовского шума, описывается выражением:

$$\mathbf{X} = [x_{i,j}^1 \quad x_{i,j}^2 \quad \cdots \quad x_{i,j}^L]^T, \quad x_{i,j}^l = \lambda_{i,j}^l + \eta^l \quad (2)$$

где η^l – случайная спектрально-независимая аддитивная шумовая составляющая сигналов L -компонентного изображения с нулевым математическим ожиданием и некоторым значением среднеквадратического отклонения (СКО) $\sigma_{ш}$.

Формально запись процедуры синтеза единого комплексированного изображения с учетом выбора приоритетной спектральной компоненты можно представить следующим образом:

$$\hat{\lambda}_{i,j}^r = F[\mathbf{X}], \quad (3)$$

где r – индекс приоритетной компоненты, $r \in [1, \dots, L]$; $\hat{\lambda}_{i,j}^r$ – комплексированное изображение с приоритетом r компоненты.

Таким образом, необходимо синтезировать единое изображение $\hat{\lambda}_{i,j}^r$ по совокупности спектральных изображений $\lambda_{i,j}^1, \lambda_{i,j}^2, \dots, \lambda_{i,j}^L$, которое будет максимально приближено к зональной яркости приоритетного изображения $\lambda_{i,j}^r$ и содержать контурные признаки остальных спектральных изображений, т.е. удовлетворять равенству [18]:

$$\hat{\lambda}_{i,j}^r = F[\mathbf{\Lambda}] \rightarrow \min \left\{ \begin{array}{l} \|\hat{\lambda}_{i,j}^r - \lambda_{i,j}^r\| \\ |\hat{g}_{i,j}^r - g_{i,j}^y| \end{array} \right\}, \quad (4)$$

где $\hat{g}_{i,j}^r$ – бинарное изображение пространственного положения контуров единого комплексированного изображения; $g_{i,j}^y$ – бинарное изображение пространственного положения эталонных контуров, например, определяемое по усредненному изображению всех спектральных компонент.

Алгоритм помехоустойчивого комплексирования мульти- и гиперспектральных изображений

Шаг 1. Определяют приоритетное изображение $x_{i,j}^r$ путем субъективной оценки изображений оператором, либо используя какой-нибудь автоматический критерий.

Шаг 2. Формируют единое (эталонное) изображение для оценки общих контурных признаков:

$$y_{i,j} = Y[x_{i,j}^1, x_{i,j}^2, \dots, x_{i,j}^L], \quad (5)$$

где Y – оператор формирования единого изображения для оценки общих контуров.

В качестве Y может использоваться любой способ преобразования зональных яркостей, к примеру, усреднение, максимум, линейная комбинация компонент X с весовыми коэффициентами и т.д.

Шаг 3. Вычисляют разности значений яркости (градиенты) каждого пиксела изображения $y_{i,j}$ с окружающими его пикселями в скользящем окне:

$$\left(\Delta_{i\pm p, j\pm q}\right)_d = \left(y_{i, j} - y_{i\pm p, j\pm q}\right)k, \quad (6)$$

где $p = 0, \dots, P$ – параметр определяющий координаты пиксела окрестности по i ;
 $q = 0, \dots, Q$ – параметр определяющий координаты пиксела окрестности по j ;
 $d = 1, \dots, D-1$ – индекс разности значений яркости i, j -го пиксела с пикселами окрестности; D – количество пикселов в скользящем окне, $D = (2P + 1)(2Q + 1)$; k – коэффициент усиления градиентов.

Шаг 4. Формируют набор оценок i, j -того пиксела комплексированного изображения путем суммирования значений яркости $i \pm p, j \pm q$ пикселей окрестности i, j -того пиксела в скользящем окне приоритетного изображения с полученными соответствующими значениями градиентов яркости i, j -того пиксела эталонного изображения [19]:

$$\left(\hat{\lambda}_{i, j}^r\right)_d = x_{i\pm p, j\pm q}^r + \left(\Delta_{i\pm p, j\pm q}\right)_d. \quad (7)$$

Шаг 5. Результирующее единое комплексированное изображение может быть представлено, например, в виде среднего значения оценок (7):

$$\hat{\lambda}_{i, j}^r = \frac{1}{D-1} \sum_d \left(\hat{\lambda}_{i, j}^r\right)_d, \quad (8)$$

Таким образом, при комплексировании многоспектральных изображений по данному алгоритму происходит перенос градиентов всех спектральных составляющих наиболее приоритетному в яркостном смысле изображению с параллельным сглаживанием шума.

Результаты численных исследований

При численных исследованиях эффективности разработанного алгоритма, в качестве критерия различия яркостей приоритетного изображения $\lambda_{i,j}^r$ и комплексированного изображения $\hat{\lambda}_{i,j}^r$, выбрана среднеквадратическая ошибка (СКО):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\hat{\lambda}_{i,j}^r - \lambda_{i,j}^r)^2}. \quad (9)$$

Для исследования качественных характеристик предлагаемого метода в сохранении контурных признаков всех спектральных компонент в комплексированном изображении, вычислялись ошибки типа пропуск контура ($\delta_{ПК}$) и ложное определение контура ($\delta_{ЛК}$) в соответствии с выражениями:

$$\delta_{ЛК} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \begin{cases} 1, & (\hat{g}_{i,j}^r - g_{i,j}^y) = 1, \\ 0, & (\hat{g}_{i,j}^r - g_{i,j}^y) \neq 1, \end{cases} \quad (10)$$

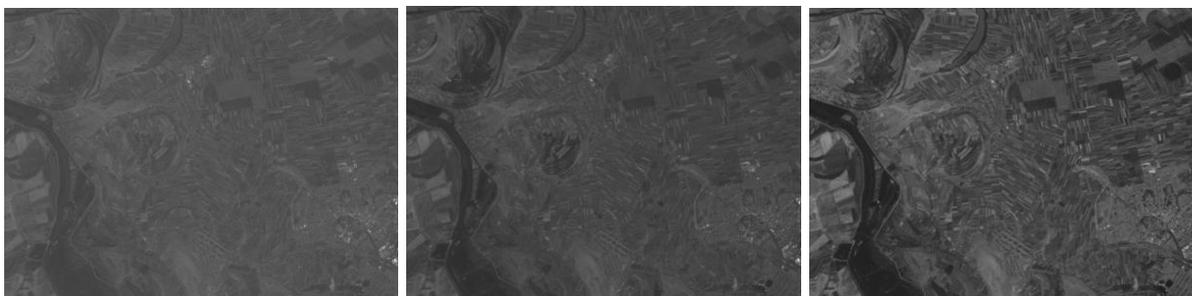
$$\delta_{\text{ПК}} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \begin{cases} 1, & (g_{i,j}^y - \hat{g}_{i,j}^r) = 1, \\ 0, & (g_{i,j}^y - \hat{g}_{i,j}^r) \neq 1, \end{cases} \quad (11)$$

где $\hat{g}_{i,j}^r$ – бинарное изображение пространственного положения контуров на комплексированном изображении; $g_{i,j}^y$ – бинарное изображение пространственного положения эталонных контуров.

При этом общая (суммарная) ошибка определения контуров

$$\delta = \delta_{\text{ПК}} + \delta_{\text{ЛК}}. \quad (12)$$

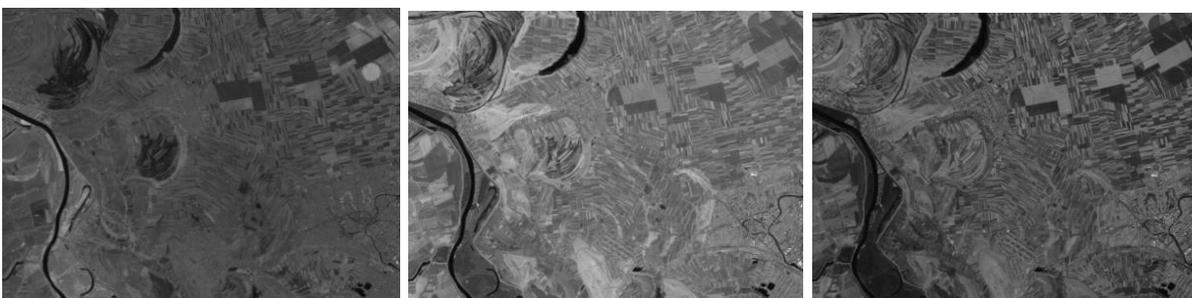
На рис. 1 представлены шесть исходных спектральнозональных изображений.



а)

б)

в)



г)

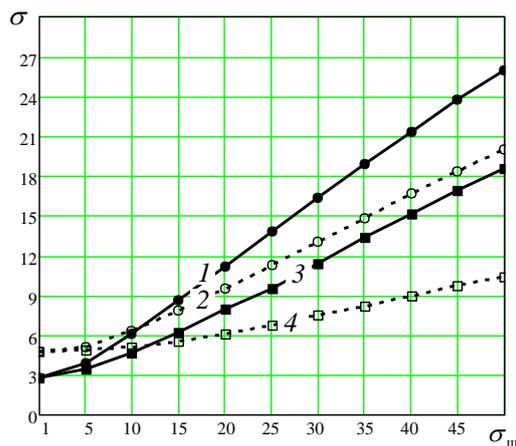
д)

е)

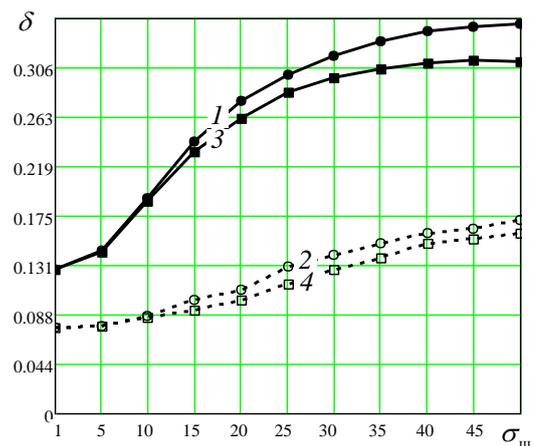
Рис. 1. Спектрональные изображения: $\lambda_{i,j}^1$ (480 нм) – а, $\lambda_{i,j}^2$ (550 нм) – б, $\lambda_{i,j}^3$ (670 нм) – в, $\lambda_{i,j}^4$ (820 нм) – г, $\lambda_{i,j}^5$ (1650 нм) – д, $\lambda_{i,j}^6$ (2200 нм) – е

В качестве приоритетного изображения при комплексировании и оценке яркости выбрано первое спектрональное изображение $\lambda_{i,j}^1$, в качестве эталонов для переноса градиентов и последующей оценки контуров использовалось среднее изображение $y_{i,j}^{\text{mean}} = \frac{1}{L} \sum \lambda_{i,j}^l$ и максимум $y_{i,j}^{\text{max}} = \max_l [\lambda_{i,j}^l]$.

На рис. 2 представлены зависимости σ и δ от СКО аддитивного гауссовского шума $\sigma_{\text{ш}}$ при разных значениях P, Q . На рис. 2 кривые 1, 3 – при $(P, Q) = 1, 2, 4$ – при $(P, Q) = 5$. Кривые 1-2 получены при наличии шума в каждой спектрональной компоненте. Кривые 3 и 4 получены в случае наличия шума в одной (приоритетной) компоненте.



а)



б)

Рис. 2. Зависимость σ (а) и δ (б) от СКО шума $\sigma_{\text{ш}}$

На рис. 3,4 представлены некоторые варианты комплексированных изображений, полученные по разработанному алгоритму без наличия помех.

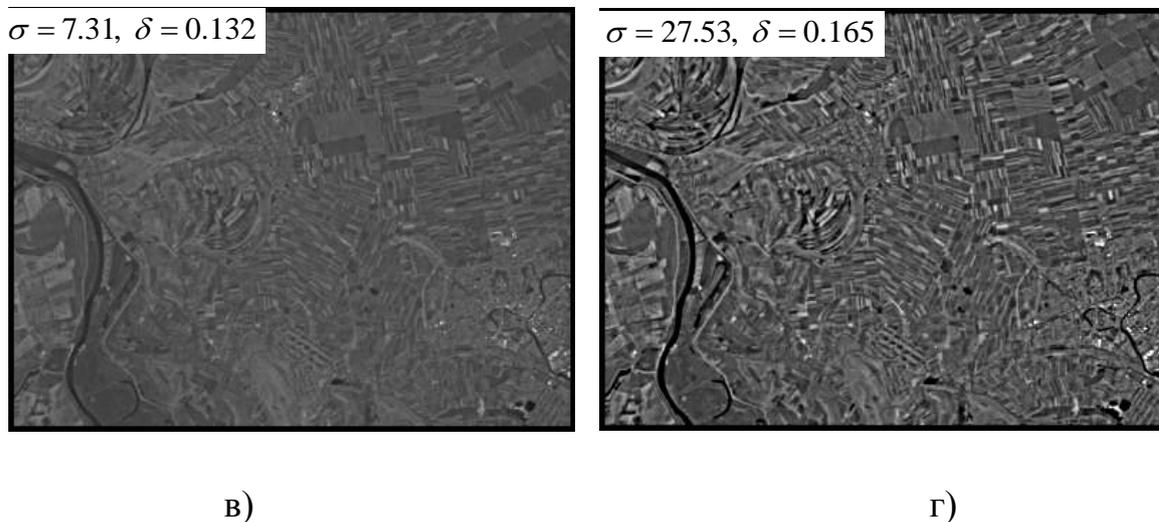


Рис. 3. Комплексированные изображения без помех с приоритетом яркости изображения $\lambda_{i,j}^1$ и переносом градиентов изображения $y_{i,j}^{\text{mean}}$: $(P, Q) = 5, k = 1 - \text{б}$,

$(P, Q) = 5, k = 4 - \text{г}$

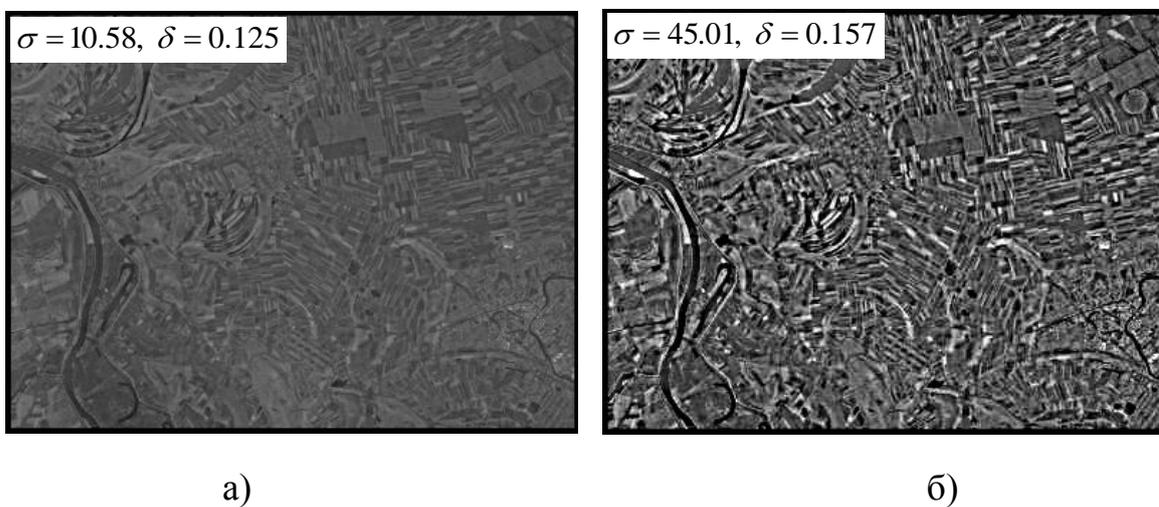


Рис. 4. Комплексированные изображения с приоритетом яркости изображения $\lambda_{i,j}^1$ и переносом градиентов изображения $y_{i,j}^{\text{max}}$: $(P, Q) = 5, k = 1 - \text{а}$, $(P, Q) = 5, k = 4 - \text{б}$

На рис. 5 представлены некоторые варианты комплексированных изображений, полученные по разработанному алгоритму с наличием помех в спектральных компонентах.

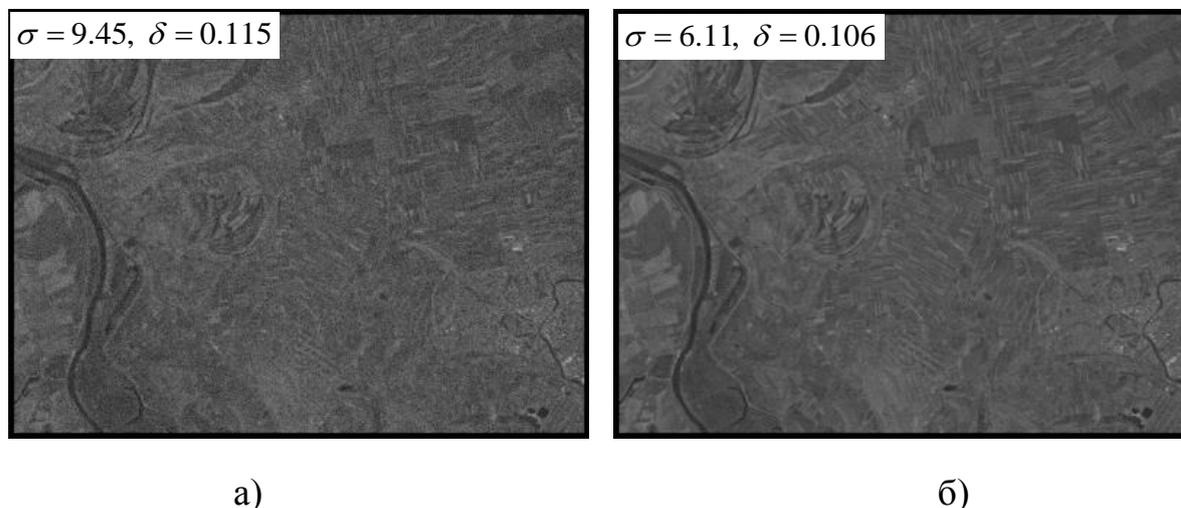


Рис. 5. Комплексированные изображения с приоритетом яркости изображения $\lambda_{i,j}^1$ и переносом градиентов изображения $y_{i,j}^{\text{mean}}$ и $(P, Q) = 5, k = 1$: при шуме с $\sigma_{\text{ш}} = 20$ в каждой спектральной компоненте – а; при шуме с $\sigma_{\text{ш}} = 20$ только в приоритетной компоненте $\lambda_{i,j}^1$ – б

Рассмотрим еще один пример. На рис. 6 представлены спектральные компоненты гиперспектрального изображения с различного рода искажениями и помехами.

На рис. 7 показаны изображения и их контуры полученные усреднением и максимумом исходных спектральных изображений. В качестве эталона для получения контуров в комплексированном изображении по разработанному алгоритму предпочтительней выбрать усредненное изображение $y_{i,j}^{\text{mean}}$ (рис. 7а), т.к. на изображении $y_{i,j}^{\text{max}}$ (рис. 7б) присутствуют помехи имеющие максимумы в

исходных спектрзональных изображениях, и которые отрицательно повлияют на результирующее изображение.

На рис. 8 представлены комплексированные изображения, полученные по разработанному алгоритму усреднением оценок с приоритетом спектрзональной компоненты $\lambda_{i,j}^4$ и эталоном для переноса контуров $y_{i,j}^{\text{mean}}$. Полученные комплексированные изображения имеют выраженные контурные признаки эталонного изображения $y_{i,j}^{\text{mean}}$, при этом яркостный портрет исходного (приоритетного) изображения сохранился. Искажения и помехи присутствующие в исходных спектрзональных изображениях, на результирующем изображении практически отсутствуют.

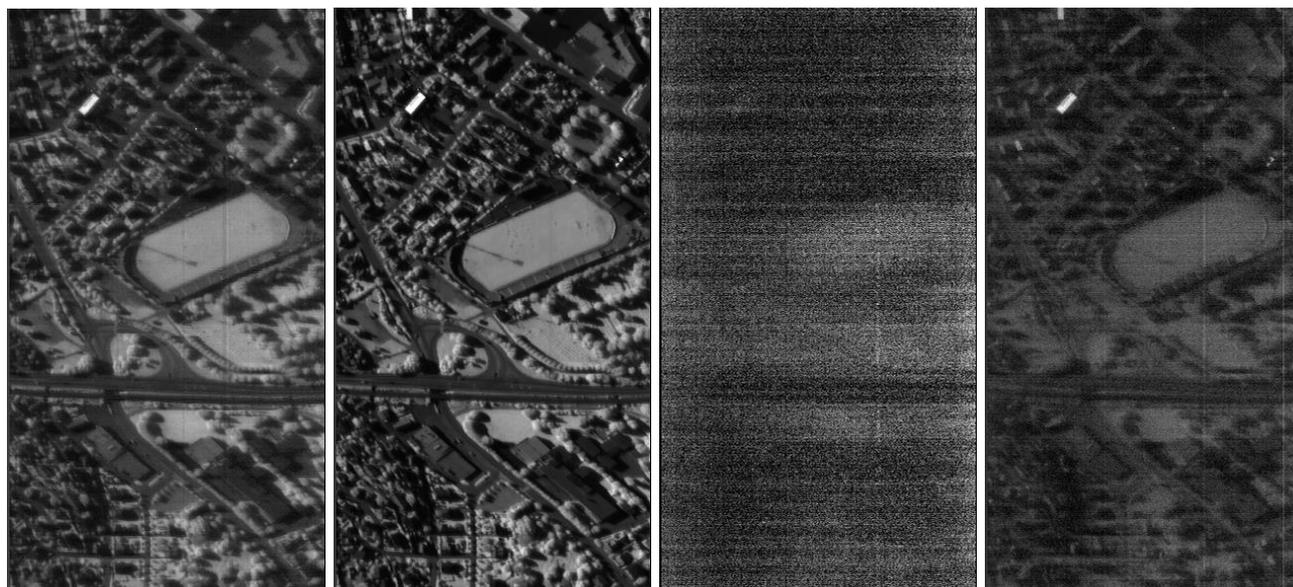


а)

б)

в)

г)



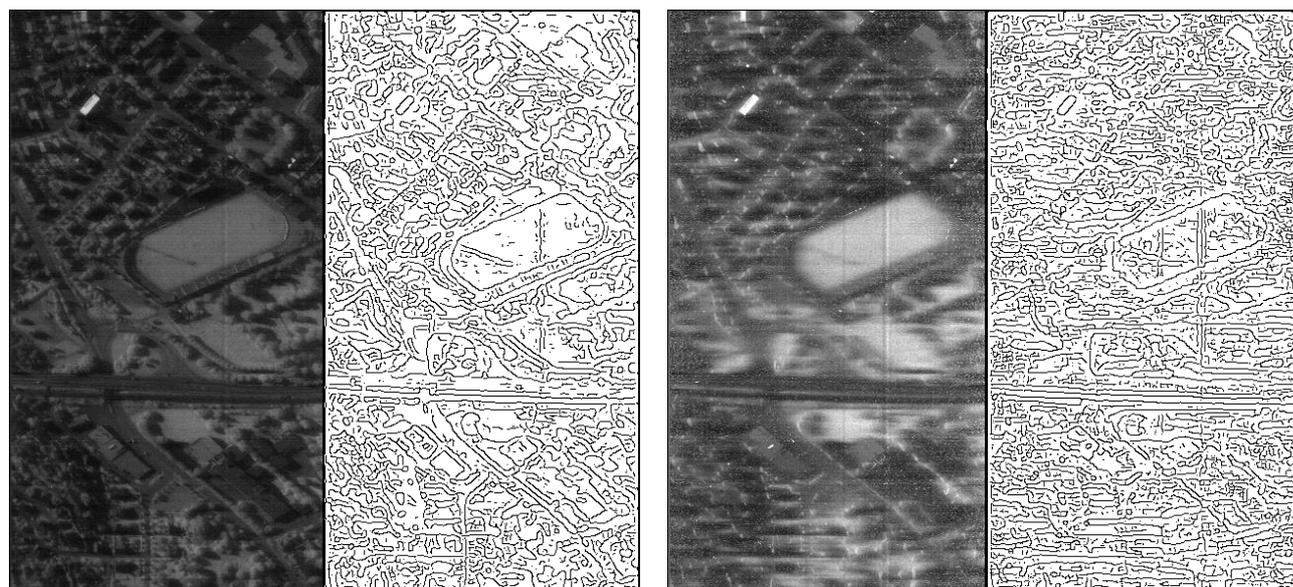
д)

е)

ж)

з)

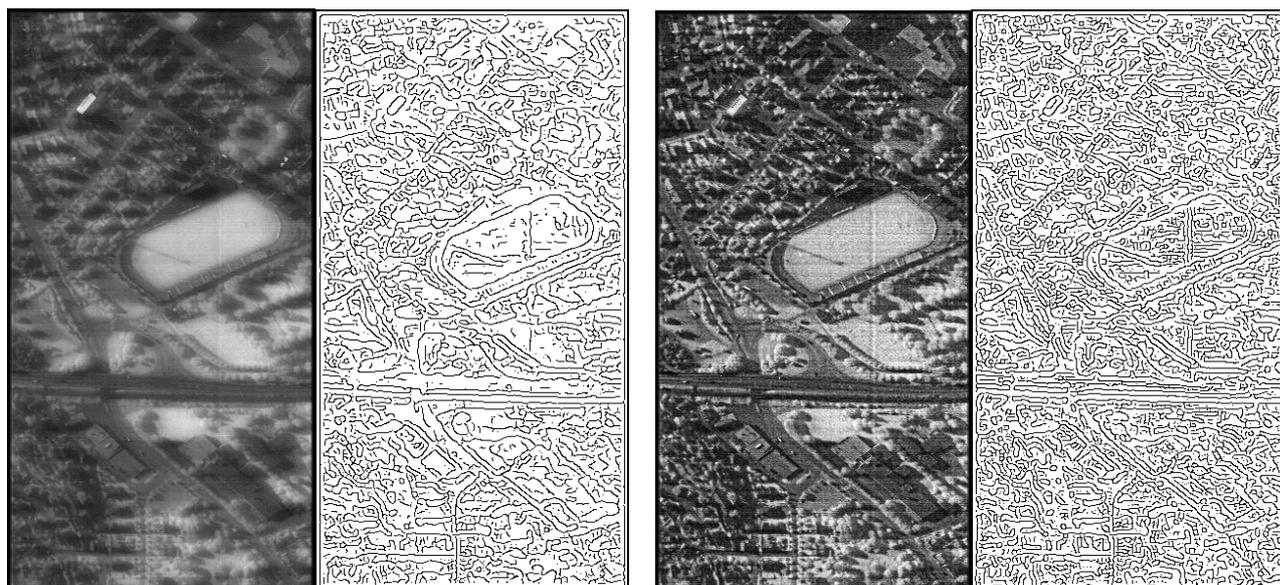
Рис. 6. Спектрональные изображения: $\lambda_{i,j}^1$ (401 нм) – а, $\lambda_{i,j}^2$ (537.8 нм) – б, $\lambda_{i,j}^3$ (869.8 нм) – в, $\lambda_{i,j}^4$ (903.4 нм) – г, $\lambda_{i,j}^5$ (918.6 нм) – д, $\lambda_{i,j}^6$ (1065.5 нм) – е, $\lambda_{i,j}^7$ (1364.7 нм) – ж, $\lambda_{i,j}^8$ (1733.8 нм) – з



а)

б)

Рис. 7. Эталонные комплексированные изображения и их контура: $y_{i,j}^{\text{mean}}$ – а, $y_{i,j}^{\text{max}}$ – б



а)

б)

Рис. 8. Комплексированные изображения с приоритетом яркости изображения $\lambda_{i,j}^4$ и переносом градиентов изображения $y_{i,j}^{\text{mean}}$: $(P,Q)=5, k=1$ – а, $(P,Q)=5, k=4$ – б

На рис. 9 представлены зависимости σ и δ от числа ближайших спектральных компонент R участвующих в формировании оценок (8) для различных исходных данных, где кривая 1 – получена при $(P,Q)=1, \sigma_{\text{ш}}^l=1$; 2 – $(P,Q)=5, \sigma_{\text{ш}}^l=1$; 3 – $(P,Q)=1, \sigma_{\text{ш}}^l=20$; 4 – $(P,Q)=5, \sigma_{\text{ш}}^l=20$; 5 – $(P,Q)=1, \sigma_{\text{ш}}^l=50$; 6 – $(P,Q)=5, \sigma_{\text{ш}}^l=50$. Кривые 7-9 получены алгоритмом усреднением R компонент: кривая 7 – при $\sigma_{\text{ш}}^l=1$; 8 – $\sigma_{\text{ш}}^l=20$; 9 – $\sigma_{\text{ш}}^l=50$.

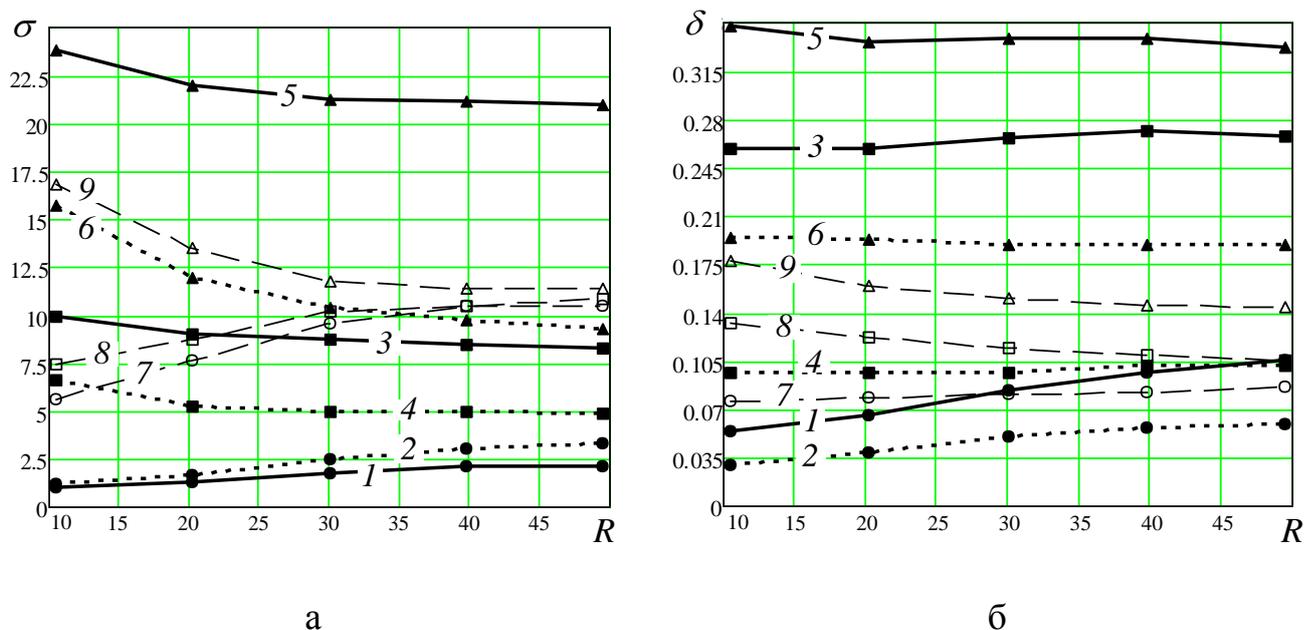


Рис. 9. Зависимость σ (а) и δ (б) от числа спектральных компонент R участвующих в оценке

Из рис.9 видно, что значения ошибок σ и δ для разработанного алгоритма (кривые 1–6) имеют тенденцию к снижению с увеличением P , Q , R и выраженную сходимость. Алгоритмы усреднения по компонентам (кривые 7–9) также имеют сходимость, но более высокие ошибки восстановления, за исключением ошибок δ для случая $\sigma_{ш}^l = 50$ (кривая 9), что обусловлено высокой дисперсией шума. Для снижения ошибок δ при высокой степени зашумления рекомендуется увеличивать параметры размера апертуры (P, Q).

Анализ проведенных исследований показал, что результирующие комплексированные изображения обладают высоким локальным контрастом, яркостью близкой к приоритетному изображению и с контурными признаками всех спектральных составляющих. Выявлено, что с увеличением коэффициента усиления k можно повысить локальный контраст, что является положительным

визуальным эффектом, но при этом увеличивается СКО σ с приоритетным изображением, а также могут возникать ложные контурные признаки, обусловленные шумовой составляющей, что приводит к увеличению δ . С увеличением размеров скользящего окна, также улучшается визуальное качество изображения и критерий контурных признаков δ , при этом возможно небольшое возрастание СКО σ и вычислительных затрат алгоритма.

Заключение

Результаты численных и экспериментальных исследований подтверждают эффективность разработанного алгоритма комплексирования мульти- и гиперспектральных изображений с достаточно высоким уровнем шума, при этом результирующее изображение является высокоинформативным и с более низким уровнем шума. Разработанный алгоритм реализован в программном комплексе обработки многоспектральных изображений [20, 21] и может быть использован в существующих и перспективных оптико-электронных комплексах информационного обеспечения вертолетов армейской авиации, с целью повышения вероятности обнаружения и распознавания наземных целей.

Библиографический список

1. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. - М.: Университетская книга, Логос. 2007. - 192 с.

2. Автоматизированные системы наземных комплексов сбора и обработки данных воздушной разведки. Учебное пособие / Под ред. И.Н. Белоглазова. - М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2003. - 296 с.
3. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / Под ред. В.В. Еремеева. - М.: Физматлит, 2015. - 460 с.
4. Бельский А.Б. Системы технического зрения военных и специальных вертолетов. Задачи и направления развития // III Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы эксплуатации авиационной техники в современных условиях»: сборник статей (Люберцы, 16 ноября 2017). – Люберцы: НИЦ ЦНИИ ВВС МО РФ, 2017. С. 101 - 106.
5. Бельский А.Б., Чобан В.М. Математическое моделирование и алгоритмы распознавания целей на изображениях, формируемых прицельными системами летательного аппарата // Труды МАИ. 2013. № 66. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=40856>
6. Бельский А.Б. Применение гиперспектрометров для решения задач по обнаружению, распознаванию объектов в составе вертолетов // VI Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки»: сборник статей (Воронеж, 14–15 февраля 2019). - Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2019. С. 91 - 97.
7. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. - М.: Техносфера, 2005. - 1072 с.

8. Барабин Г.В., Гусев В.Ю. Фотограмметрический метод построения единого изображения при спутниковой съемке секционированным датчиком изображений // Труды МАИ. 2013. № 71. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=46740>
9. Казбеков Б.В. Совмещение инфракрасных изображений с изображениями видимого диапазона в задачах идентификации подвижных наземных целей с борта беспилотного летательного аппарата // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35912>
10. Гусев В.Ю., Крапивенко А.В. Методика фильтрации периодических помех цифровых изображений // Труды МАИ. 2012. № 50. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=28805>
11. Шипко В.В. Метод и алгоритмы межканальной градиентной реконструкции многоспектральных изображений в оптико-электронных комплексах воздушной и космической разведки // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=102211>
12. Кудинов И.А., Холопов И.С., Храмов М.Ю. Технология формирования панорамных разноспектральных видеоизображений для обзорных авиационных оптико-электронных систем // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=102241>
13. Сагдуллаев Ю.С., Ковин С.Д. Восприятие и анализ разноспектральных изображений: Монография. - М.: Издательство «Спутник+», 2016. - 251 с.
14. Васильев А.С. Методы комплексирования изображений многоспектральных оптико-электронных систем // Международная конференция «Прикладная оптика –

2014»: сборник трудов (Санкт-Петербург, 21 - 24 октября 2014). – СПб.: Оптическое общество им. Д.С. Рождественского, 2014. Т. 2. С. 191 - 194.

15. Шипко В.В. Алгоритм комплексирования двух разноспектральных изображений на основе цветового синтеза // Цифровая обработка сигналов. 2017. № 3. С. 32 - 38.

16. Богданов А.П., Костяшкин Л.Н., Морозов А.В., Павлов О.В., Романов Ю.Н., Рязанов А.В. Способ комплексирования цифровых полутоновых телевизионных и тепловизионных изображений. Патент RU 2451338 С1, МПК G06T 5/00, 20.05.2012.

16. Богданов А.П., Костяшкин Л.Н., Морозов А.В., Павлов О.В., Романов Ю.Н., Рязанов А.В. Способ комплексирования цифровых полутоновых телевизионных и тепловизионных изображений. Патент RU 2451338 С1, МПК G06T 5/00, 20.05.2012.

18. Шипко В.В. Метод комплексирования многоспектральных изображений на основе переноса градиентов // Цифровая обработка сигналов. 2019. № 3. С. 3 - 9.

19. Самойлин Е.А., Шипко В.В. Межканальная градиентная реконструкция сигналов цветных цифровых изображений искаженных импульсными помехами // Автометрия. 2014. Т. 50. № 2. С. 22 - 30.

20. Шипко В.В., Ханов А.С., Шаронов И.Е., Конов В.С. Программный модуль комплексирования двухспектральных изображений. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019618914, 08.07.2019.

21. Шипко В.В., Ханов А.С., Шаронов И.Е., Конов В.С. Программный модуль комплексирования многоспектральных изображений. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019662064, 16.09.2019.