
МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ
И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ПРИМЕНЕНИЕ АВИАЦИОННОЙ ВИДЕОСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ
ДЛЯ ПОИСКА НА МЕСТНОСТИ ФРАГМЕНТОВ ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ
ЧАСТЕЙ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

© 2019 г. В. Н. Остриков*, О. В. Плахотников, А. В. Кириенко

Санкт-Петербургский филиал АО «КБ «Луч», Санкт-Петербург

**E-mail: ostrvad@mail.ru*

Поступила в редакцию 12.03.2019 г.

Рассматривается возможность обнаружения фрагментов отделяющихся частей ракет-носителей на местности на основе обработки данных видеоспектральной (гиперспектральной) воздушной съемки в диапазоне 0.4–1.0 мкм. Оценено качество применения специальных методов предварительной коррекции при сравнении, в ходе тематической обработки, по мерам спектральной близости — специальной разностно-векторной метрике, модифицированной метрике Теребижа, коэффициенту корреляции, а также субпиксельным методом.

Ключевые слова: воздушный экологический мониторинг, поиск техногенных загрязнений, гиперспектральные данные, предварительная обработка, корреляционная мера, разностно-векторная мера, модифицированная мера Теребижа, субпиксельный метод

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019245-54>

ВВЕДЕНИЕ

Поиск фрагментов отделяющихся частей (ОЧ) ракет-носителей (РН) на больших площадях расчленения по поверхности является значимой экологической задачей, возникающей в ходе эксплуатации таких систем. Использование для поиска обычной авиационной оптико-электронной съемки (включая информационные средства на беспилотных носителях) проблематично по причине последующих трудностей достоверного дешифрирования получаемых данных в сочетании с большими площадями просмотра. Более перспективным представляется решение задач на основе видеоспектральной (гиперспектральной) съемки, по результатам которой однозначно определяются наблюдаемые типы отражающих поверхностей, в том числе, субпиксельного размера. Кроме того, специальный анализ спектральных «кубов» позволяет практически полностью автоматизировать процесс идентификации искомым объектов.

Видеоспектральная съемка в настоящее время широко используется в дистанционном зондировании. Вместе с тем, как это отмечается рядом специалистов (Райкунов, Щербаков, 2014), широкий класс решаемых задач требует дополнительной разработки, по каждому конкретному применению, специализированных, достаточно эффективных методов спектральной идентификации.

Отсюда возникает целесообразность исследования возможности реализации средств обработки спектральных «кубов», получаемых в ходе эксперимента по оценке качества автоматизированного обнаружения и идентификации фрагментов ОЧ РН, на наиболее часто встречающихся травяном и урбанизированном фонах. Основным показателем качества разрабатываемого программно-алгоритмического обеспечения (ПАО) обработки данных является вероятность распознавания целей по их заранее заданным спектральным сигнатурам. В присутствии сложной помеховой обстановки, при относительно низком пространственном разрешении средства наблюдения, вторым важным фактором, влияющим на результат построения системы, является реализуемый уровень ложных тревог.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В Санкт-Петербургском филиале АО «КБ «Луч» реализовано ПАО обработки снимков, получаемых, в диапазоне 0.4–1.0 мкм, видеоспектрометром, приспособленным для воздушной съемки (в исходном варианте 1066 спектральных каналов) (Остриков и др., 2016а). Такой регистрирующий прибор с призмным диспергатором характеризуется «плавающим» спектральным разрешением «куба» от 0.4 нм (в начале) до 6 нм — в конце интервала чувствительности.

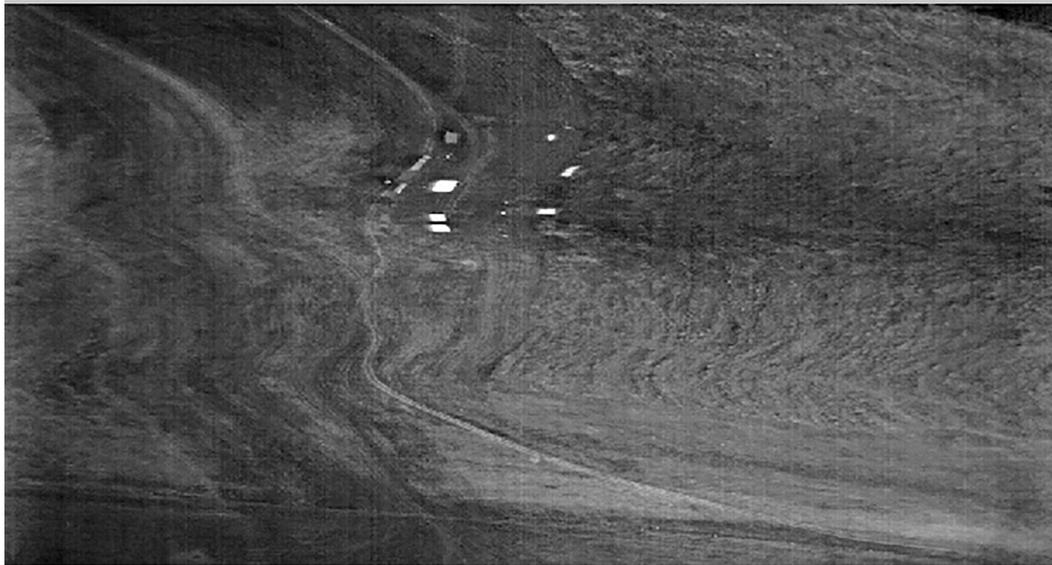


Рис. 1. Полутоновый синтезированный RGB-спектральный образ исходного снимка (уменьшено)

Для тестирования возможностей разработанного ПАО, применительно к решению поставленной задачи, видеоспектрометр был установлен на борт самолета АН-2. Время экспонирования соответствовало малым скоростям движения и составляло 14 мс.

Испытания ПАО проводились в ходе осенней (сентябрь 2017 г.) экспедиции в центральной зоне России. Для создания фоно-объектовой обстановки использовались помещенные непосредственно на травяной покров средней высоты реальные фрагменты ОЧ РН. Размеры образцов составляли от значительных (1.2 м на 1.5 м) до уменьшающихся величин, вплоть до их соизмеримого значения с реализуемым пространственным разрешением аппаратуры — около 0.5 м с высоты в 1 км. Физически они представляли собой дюралевые листы различной конфигурации.

Поскольку гиперспектрометр размещался на борту самолета без гиросtabilизированной платформы, на носитель, в процессе регистрации, воздействовал ряд возмущающих факторов, вызывающих геометрические искажения получаемого снимка. Кроме того, так как сканирование поля зрения производится путевой скоростью линейной (1024 элемента в пространственном направлении) матрицей, на результатах съемки присутствует значительный уровень полосовых шумов. Представление о качестве зарегистрированных данных дает приведенное на рис. 1 полутоновое изображение. Образ синтезирован из исходного гиперспектрального куба на RGB-спектральных линиях, вблизи, соответственно, 650, 550 и 450 нм, после чего преобразован в градации серого.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Начальный этап обработки спектрального «куба» состоял в его биннинговании, то есть в нелинейном объединении спектральных каналов (Остриков и др., 2013), для приведения спектрального разрешения снимка к примерно постоянному интервалу в 5 нм (в итоге остается 120 спектральных каналов). Эта процедура возможна в связи с тем, что, как показала практика обработки данных, для рассматриваемых задач спектральное разрешение такой величины не вызывает информационных потерь в ходе последующего тематического анализа результатов съемки (Остриков и др., 2013, Смирнов и др., 2016а). Соответственно, при этом повышается отношение сигнала к шуму и снижается время, затрачиваемое на обработку.

После биннингования следует этап предварительной обработки, состоящий в выравнивании строчных шумов. Поскольку при традиционно используемом подходе (Шовенгердт, 2010), основанном на адаптивном приведении каждого пространственного образа на текущей спектральной линии к усредненным двум первым случайным моментам снимка, происходит недопустимое искажение спектральных сигнатур пикселей, применяется специально разработанный метод компенсации (Оков и др., 2013; Ostrikov, Plakhotnikov, 2014a). Его применение, к сожалению, не позволяет полностью демпфировать присутствующий на спектральном «кубе» регулярный шум, также из-за необходимости сохранения радиометрических соотношений между спектральными каналами. Однако его снижение, как это будет ниже

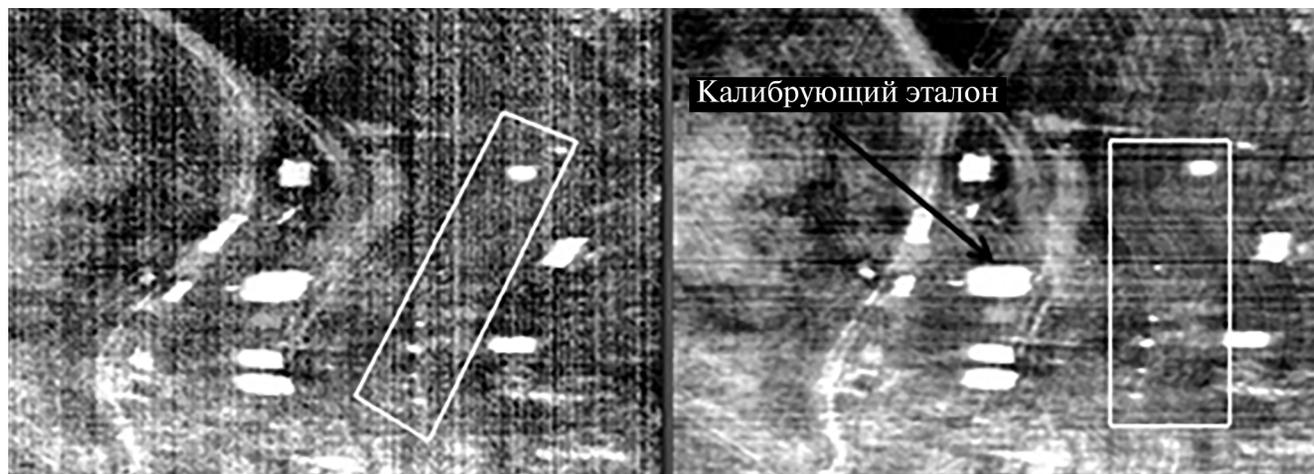


Рис. 2. Вырезы на зону внимания из исходного биннингованного «куба» — слева и после его предварительной коррекции — справа.

показано на результатах тематической обработки, себя вполне оправдывает.

После частичного демпфирования полосовых помех (в двух направлениях) предварительная обработка предусматривает геометрическую коррекцию. Эта коррекция может проводиться по сопутствующим навигационным данным, — для уменьшения значительных низкочастотных искажений, обусловленных возмущенными движениями носителя, а также путем компенсации «джиттера», — для выравнивания высокочастотных влияний. Разработанная программная реализация предусматривает специальное совместное применение двух методов (Остриков, Кириченко, 2009), позволяющая повысить качество обработанных данных.

Для наглядности на рис. 2 приведены, в единичном масштабе, сравнительные, в градациях серого, образы RGB-синтезированных вырезов размерами 286×202 из исходного снимка (на область внимания). Левый образ — по биннингованному исходному кадру. Правый — после применения дополнительной компенсации полосового шума и комбинированной геометрической коррекции. Оба изображения эквализованы для повышения наглядности и подчеркивания наличия полосовых шумов. Белыми рамками выделены зоны с расположенными на них объектами наблюдения. Кроме того, на правом образе показано местоположение используемого в ходе последующей обработки калибрующего эталона.

Сравнение образов демонстрирует визуальное повышение качества данных после проведения используемой предварительной обработки — существенно скомпенсированы геометрические искажения и снижены полосовые шумы.

Означенные вырезы были сегментированы с применением эквализации (гистограммного преобразования) визуальным подбором порогов (Смирнов и др., 2016б). Из полученных образов, для последующего анализа, выделены собственно объекты поиска. Их совместное представление, вместе с фрагментами фотоснимков искомых объектов, приведено на рис. 3, контрасты образов вырезков инвертированы для повышения качества отображения. Размеры указаны в метрах.

В качестве верхнего на рисунке (наибольшего) тестового объекта использовался фрагмент типа «дверь», ниже — фрагмент «шар», остальные четыре объекта — куски обшивки (фрагмент «тест»). Они спектрально идентичны и различаются лишь размерами.

По каждому тестовому объекту наблюдения, на земле, предварительно измерялись коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) с помощью полевого спектродиометра (SR-3500, 2013) со спектральным разрешением около 3.5 нм в диапазоне от 350 до 1000 нм. Измерения проводились таким образом, чтобы «пятно» наблюдения максимально охватывало каждый объект в пределах его размера. По фрагментам «дверь» и «шар», в силу их некоторого отличия, брались результаты, каждый из которых усреднялся по совокупности 5-ти реализаций. По остальным фрагментам усреднялись все измеренные данные. Полученные спектры помещались в базу опорных сигнатур в виде трех оригинальных образов под названиями «дверь», «шар» и «тест». Все кривые были приведены к биннингованному спектру авиационного прибора путем линейной интерполяции — рис. 4. Здесь же представлен спектр измеренного спектродиометром калибрующего «эталона». Кроме того, сюда добавлена спектральная сигнатура

б

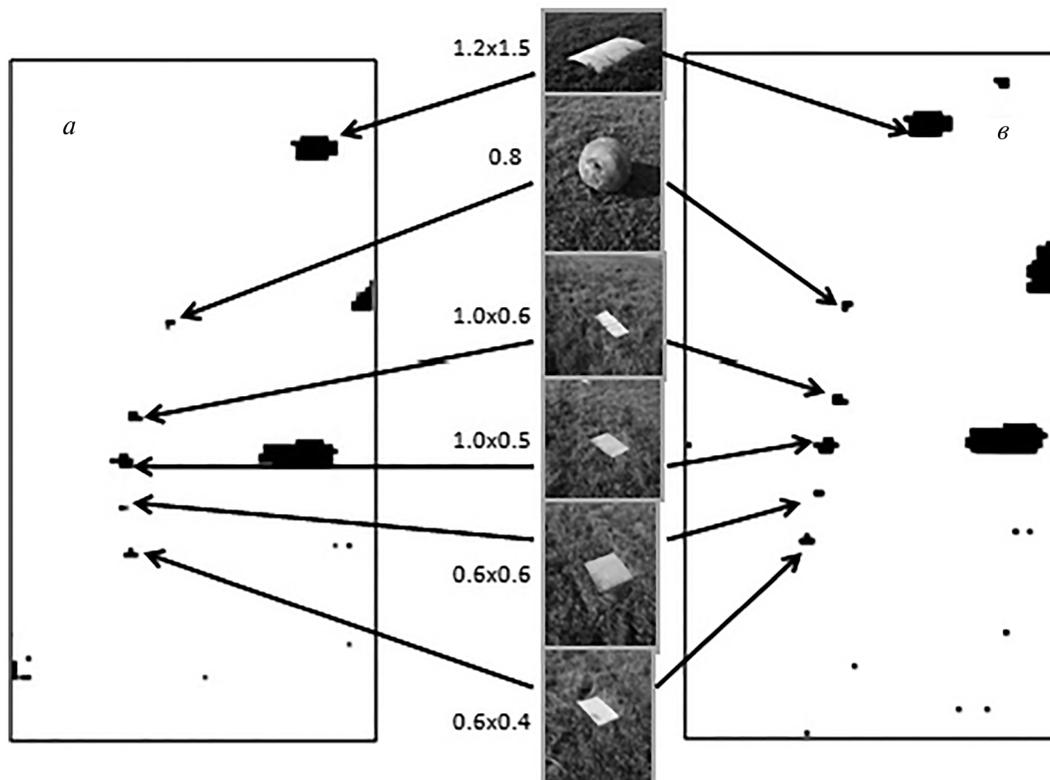


Рис. 3. Объекты поиска: *a* — на сегментированном вырезе из исходного «куба», *б* — фотографические образы, *в* — на сегментированном вырезе из скорректированного «куба».

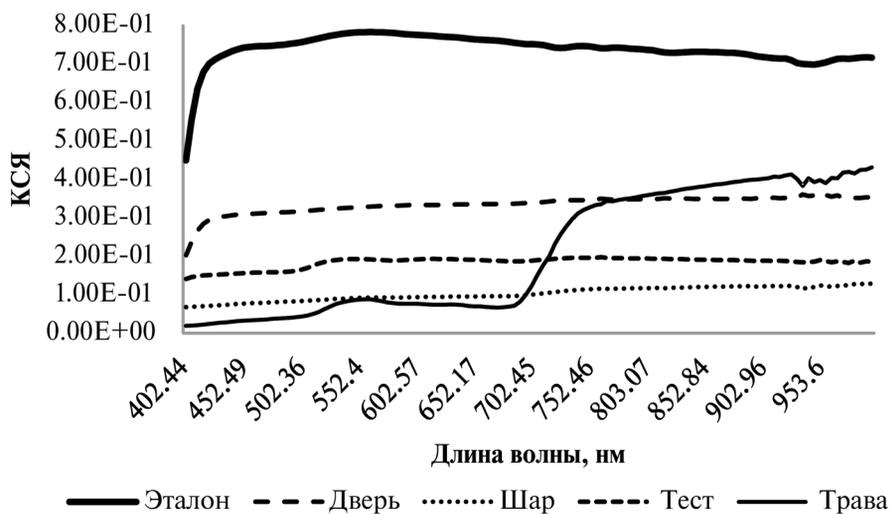


Рис. 4. Сигнатуры искомых объектов, эталона и сопутствующего фона.

травы как основного окружающего объекты фона на рассматриваемой сцене.

Как это видно из рисунка, все три опорные сигнатуры объектов имеют близкую по форме характеристику, что, в сочетании с используемым типом нормировки в ходе обработки, на интеграл

квадратов составляющих этих кривых по спектру (Смирнов и др., 2016а), в конечном итоге приводит к спектральной близости искомых опор по форме.

После проведения означенной выше предварительной обработки, в составе ПАО реализуется «внешняя калибровка» гиперспектральных

данных. Эта калибровка состоит в компенсации влияния освещенности и передаточной функции столба атмосферы между регистрирующим прибором и наблюдаемой сценой (атмосферная коррекция). Следует отметить, что применительно к средствам гиперспектральной съемки с космических носителей или авиационной съемки с больших высот, атмосферная коррекция, как правило, производится модельным путем (Matthew et al, 2003). Однако при этом возникает весьма сложный вопрос «попадания в модель», то есть выбора типа и параметров этой модели, адекватных конкретным условиям наблюдения (Остриков и др., 2012). По этой причине более целесообразным представляется применение внешней калибровки на основе эталона, присутствующего в поле зрения аппаратуры наблюдения (Ostrikov, Plakhotnikov, 2014a). Такой эталон, выполненный из материала «дакрон», располагается на земле либо вблизи тестируемых объектов, как в рассматриваемом случае (отмечен на рис. 2), так и, в общем случае, может находиться на существенном удалении от них, что не влияет на качество конечной тематической обработки (Остриков и др., 2016б).

После выполнения калибровки (пересчета характеристик пикселей в КСЯ) данные подвергаются отмеченной выше нормировке, что позволяет дополнительно снизить чувствительность спектральных сигнатур к условиям наблюдения (фактически конечное распознавание проводится сравнением кривых «по форме»). После этого преобразованный «куб» поступает на тематическую обработку.

Как это следует из опыта проведения спектральной идентификации применительно к различным практическим применениям (Остриков и др., 2013, Остриков и др., 2012, Смирнов и др., 2016б), ее конечные результаты значительно зависят от используемого метода сравнения элементов снимка с эталонными сигнатурами и, следовательно, от выбранной меры близости. В качестве мер сравнения (каждого текущего спектрального вектора с заданными опорными) часто используются такие метрики, как корреляционная, разностно-векторная, модифицированная метрика Теребижа. Кроме того, в некоторых случаях применяется субпиксельный метод. Ниже, формализовано, описаны использованные в рассматриваемом случае методы для последующей оценки их качества по конечным результатам решения экологической задачи.

Суть субпиксельного метода состоит в проецировании текущего пиксельного вектора $\rho_{ij}(\lambda)$ на

априорно заданные опорные спектральные векторы $\rho_n(\lambda), n=1,2,\dots,N$. Здесь $ij \in [I, J]$, где $I \times J$ — размерность двумерной области снимка.

Примем, что $k=1,2,\dots,K$ — число спектральных каналов используемого прибора. Тогда процедура субпиксельного проецирования на принятые опоры может быть записана (Остриков и др., 2016б), как

$$\left[r_{ij}^{(1)} r_{ij}^{(2)} \dots r_{ij}^{(N)} \right]^T = (R^T R)^{-1} R^T \rho_{ij}(\lambda_k), \quad (1)$$

где матрица проецирования строится по заранее выбранным N векторам:

$$R^T = \begin{bmatrix} \rho_1(\lambda_k) \\ \rho_2(\lambda_k) \\ \dots \\ \rho_N(\lambda_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_1^{(1)} \rho_1^{(2)} \dots \rho_1^{(K)} \\ \rho_2^{(1)} \rho_2^{(2)} \dots \rho_2^{(K)} \\ \dots \\ \rho_N^{(1)} \rho_N^{(2)} \dots \rho_N^{(K)} \end{bmatrix}.$$

Текущий результат получения решения — $r_{ij}^{(1)}, r_{ij}^{(2)}, \dots, r_{ij}^{(N)}$ — проекции на векторы N типов опор соответственно.

Для получения конечной идентификации следует сопоставить вычисленные величины проекций. При этом отнесение того или иного ij — пикселя к классу «объект» определяется наибольшей величиной проекции, из всех рассчитываемых N величин. В рассматриваемом случае, — к первым трем опорам («дверь», «шар», «тест»): $r_{ij}^{(l)} = \max_n \{ r_{ij}^{(n)} \}$, если $l=1, 2, 3$, и к классу «фон», — если $l > 3$. Например, для четвертой спектральной опоры — «трава», в ходе достижения максимума при $l=4$ результат означает, что текущий пиксель относится к фону.

Модифицированная метрика Теребижа (Смирнов и др., 2016а), является оценкой расстояния между текущим вектором $\rho_{ij}(\lambda)$ и опорным вектором $\rho_n(\lambda)$:

$$\tau_{ij}^{(n)}(\rho_{ij}(\lambda), \rho_n(\lambda)) = \sum_{k=1}^K \left[(\rho_{ij}(\lambda_k) - \rho_n(\lambda_k))^2 / \rho_n(\lambda_k) \right]. \quad (2)$$

Здесь объединение пикселей, относящихся к классу «объект», будет характеризоваться выполнением соотношения $\tau_{ij}^{(l)} = \min_n \{ \tau_{ij}^{(n)} \}$, если $l=1, 2, 3$, и к классу «фон», — если $l > 3$.

Специальная метрика «разностно-векторная» построена по аналогии с мерой Кульбака, однако, в отличие от оценки расстояния между распределениями (как в исходном варианте), здесь рассчитывается расстояние между собственно векторами:

$$u_{ij}^{(n)}(\rho_{ij}(\lambda), \rho_n(\lambda)) = \sum_{k=1}^K \left\{ [a_{ij}(\lambda_k) - b_n(\lambda_k)] \log [a_{ij}(\lambda_k) / b_n(\lambda_k)] \right\}, \quad (3)$$

$$\text{где } a_{ij}(\lambda_k) = \frac{\rho_{ij}(\lambda_k)}{\sum_{k=1}^K \rho_{ij}(\lambda_k)}, \quad b_n(\lambda_k) = \frac{\rho_n(\lambda_k)}{\sum_{k=1}^K \rho_n(\lambda_k)}.$$

Аналогично использованию модифицированной меры Тербижа, для объединения пикселей, относящихся к классу «объект», рассчитывается

$$u_{ij}^{(l)} = \min_n \{ u_{ij}^{(n)} \}, \text{ если } l = 1, 2, 3, \text{ и к классу «фон», — если } l > 3.$$

Метод корреляционного сравнения (коэффициент корреляции):

$$C_{ij}^{(n)}(\rho_{ij}(\lambda), \rho_n(\lambda)) = \frac{1}{d_{ij} d_n} \sum_{k=1}^K [\rho_{ij}(\lambda_k) - E(\rho_{ij})][\rho_n(\lambda_k) - E(\rho_n)], \quad (4)$$

$$\text{где } d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^K [\rho_{ij}(\lambda_k) - E(\rho_{ij})]^2},$$

$$d_n = \sqrt{\sum_{k=1}^K [\rho_n(\lambda_k) - E(\rho_n)]^2},$$

$$E(\rho_{ij}) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \rho_{ij}(\lambda_k), \quad E(\rho_n) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \rho_n(\lambda_k).$$

Аналогично применению субпиксельного метода, здесь для объединения пикселей, относящихся к классу «объект», определяется

$$C_{ij}^{(l)} = \max_n \{ C_{ij}^{(n)} \}, \text{ если } l = 1, 2, 3, \text{ и к классу «фон», — если } l > 3.$$

Существенной особенностью рассматриваемого случая решения задачи является тот факт, что в поле зрения прибора попадает большое количество других искусственных объектов, находящихся в спектральной близости к опорам. Это объясняется, в первую очередь, тем, что эксперимент по получению и обработке данных авиационной съемки проводился непосредственно вблизи сооружений аэродромного обслуживания. В итоге на образе спектральной идентификации могут частично выделяться окружающие искусственные объекты.

Такого рода особенность приводит к тому, что используемые меры спектральной близости сигнатур обломков к опорам, особенно с учетом

неизбежного частичного спектрального смешивания обнаруживаемых объектов с фоном, благодаря их относительно малым размерам, в некоторых случаях оказываются несколько меньше тех значений, которые соответствуют окружающим объектам сцены. В итоге уровни ложных тревог в ходе распознавания могут оказаться значимыми и влиять на конечное качество применения средства спектрального обнаружения. Эти уровни зависят также от используемых методов сравнения текущих спектральных векторов снимка с выбранным набором опор.

Последовательно применяя выбранные меры близости (1)–(4) к исходным биннигованным данным (сначала без использования предварительной обработки), получаем результаты спектральной идентификации для каждого варианта решения задачи — рис. 5. На рисунке выделены области поиска объектов, контрасты образов также инвертированы для наилучшего отображения.

По полученным результатам рассчитываются оценки качества распознавания объектов поиска. При этом вероятности определяются отношением числа правильно идентифицированных пикселей объектов, к числу пикселей, истинно относящихся к искомым объектам поиска, задаваемых их положением на рис. 3а. Ложные тревоги определяются числом выделенных пикселей, не относящихся к объектам поиска на выделенном фрагменте. Итоговые расчеты сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Вероятности обнаружения по исходному снимку

Мера близости	Вероятность обнаружения	Число ложных тревог
Субпиксельный метод	0.53	59
Разностно-векторная	0.59	105
Тербижа	0.53	62
Корреляционный метод	0.23	4068

Отметим, что в большинстве случаев (кроме корреляционного метода сравнения) в областях поиска присутствуют, как таковые, все шесть искомых объектов (наблюдается частичное выделение пикселей, относящихся к фрагментам). Как это следует из представленной таблицы, качество обнаружения первыми тремя указанными методами близко, при этом для применения разностно-векторной метрики характерно некоторое сравнительное повышение уровня ложных тревог. Это является следствием почти полного выделения сопутствующего фонового объекта, что, однако, не мешает визуальной идентификации объектов поиска с учетом существенно большего

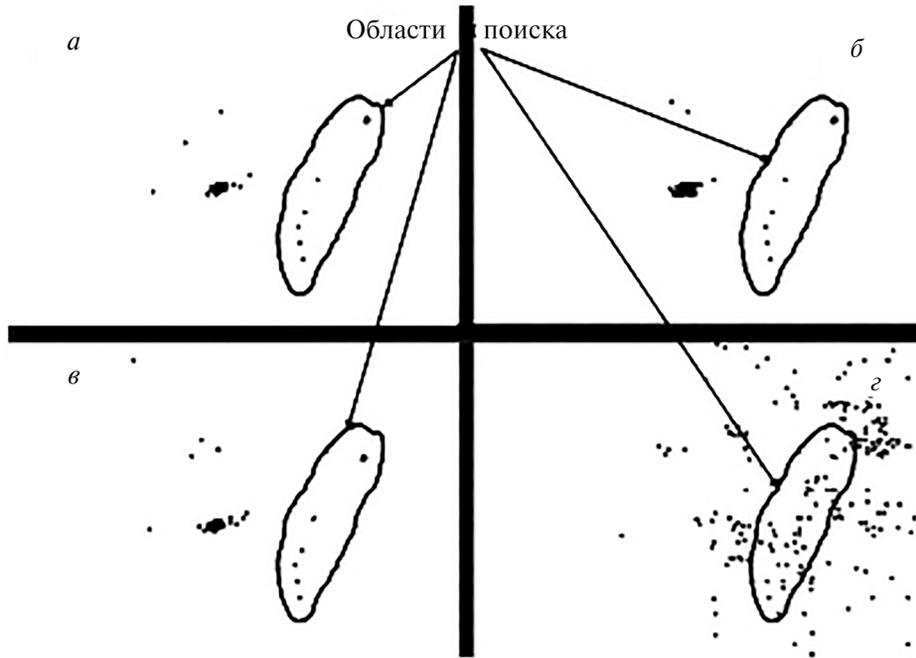


Рис. 5. Результаты выделения объектов поиска по исходному снимку: *a* — субпиксельным методом, *б* — разностно-векторным, *в* — Тербижа, *г* — по корреляции.

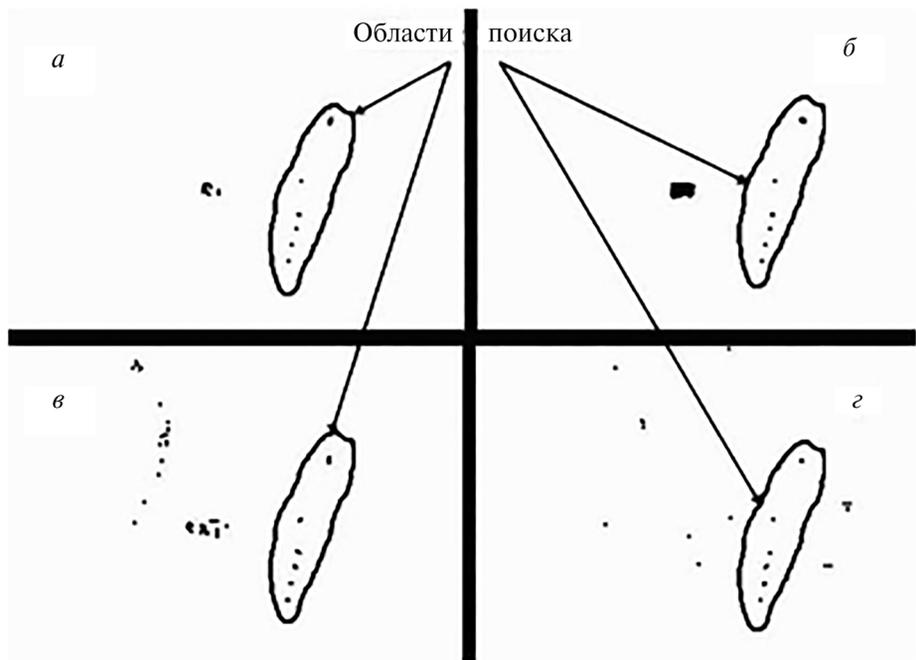


Рис. 6. Результаты выделения объектов поиска по предварительно обработанному снимку: *a* — субпиксельным методом, *б* — разностно-векторным, *в* — Тербижа, *г* — по коэффициенту корреляции.

размера этого фонового образования. Качество обнаружения с применением корреляционной меры — низкое.

Аналогичные расчеты спектральной идентификации снимков были проведены по данным, подвергнутым описанной выше предварительной обработке. Истинное положение элементов поиска

в этом случае определялось приведенным выше на рис. 3в.

Полученные образы представлены на рис. 6. Здесь, в отличие от вышеприведенных результатов обработки по исходному снимку, уровни ложных тревог существенно меньше почти для всех мер близости. При этом сравнительно хуже

выделились объекты при использовании корреляционной меры. Оценки величин вероятностей идентификации для этого случая сведены в таблицу 2.

Как показывает анализ приведенных расчетов, а также визуальный анализ результатов распознавания, как для исходных данных, так и для предварительно обработанных, наиболее целесообразно использовать специальную разностно-векторную метрику, обеспечивающую, при максимально достоверном (из выбранных методов) обнаружении искомым объектов, сравнительно невысокую величину ложных тревог. Эта величина, в обоих случаях, обусловлена обнаружением компактного объекта фонового образования, что принципиально не мешает правильной идентификации искомым объектов.

Таблица 2. Вероятности обнаружения по снимку после проведения его предварительной обработки

Мера близости	Вероятность обнаружения	Число ложных тревог
Субпиксельный метод	0.625	32
Разностно-векторная	0.75	98
Теребижа	0.56	70
Корреляционный метод	0.44	24

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования спектральной идентификации фрагментов ОЧ РН на фоне травяного покрова и окружающих искусственных покрытий, по данным гиперспектральной авиационной съемки в диапазоне 0.4–1.0 нм, со спектральным разрешением 5 нм, принципиально показали возможности реализованного ПАО для решения поставленной задачи. По результатам исследований было подтверждено достаточно высокое качество применения предложенных, специализированных для видеоспектрометрии методов предварительной обработки, в сочетании с используемыми методами атмосферной коррекции, нормировки данных и выбора метрик сравнения. Так, при полном отсутствии пропусков искомым объектов (как таковых), с последующим применением специальной разностно-векторной метрики, возможно повышение качества решения поставленной задачи примерно в 1.4–1.5 раза (по показателю вероятности распознавания пикселей, принадлежащих объектам поиска), по сравнению с исходными (предварительно не обработанными) данными.

При этом достаточно низкий уровень ложных тревог в зоне поиска позволяет, даже в присутствии других искусственных образований на снимке, уверенно выделять искомые объекты. Полученный результат обосновывает возможность применения используемого метода для решения экологической задачи поиска техногенных загрязнений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Оков И.Н., Остриков В.Н., Плахотников О.В.* Способ уменьшения шума электронного изображения. Патент РФ на изобретение № 2491629, 2013.
- Остриков В.Н., Кириенко А.В.* Навигационно-корреляционная коррекция изображений, искаженных взаимными сдвигами строк // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. Т. 7. № 7. С. 52–57.
- Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кириенко А.В.* Обработка гиперспектральных данных, получаемых с авиационных и космических носителей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 243–251.
- Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кириенко А.В.* Оценка характеристик гиперспектрометра по результатам тестовой съемки / Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. Под ред. Вербы В.С., Татарского Б.Г. Книга 2: Робототехнические комплексы на основе БЛА. М.: Радиотехника, 2016а. С. 579–587.
- Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кириенко А.В., Смирнов С.И.* Оценка содержания азота и калия в биомассе растений по атмосферно скорректированным гиперспектральным данным дистанционного зондирования // Оптика атмосферы и океана. Т. 29. № 7. 2016б. С. 566–571.
- Остриков В.Н., Плахотников О.В., Чапурский Л.И.* Оценка возможностей космического гиперспектрометра «Ресурс-П» на основе модельной имитации «кубов» с применением баз данных высокого пространственного разрешения / Труды II всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». Под общей ред. С.С. Суворова. СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. Том II. С. 278–283.
- Райкунов Г.Г., Щербаков В.Л.* и др. Гиперспектральное дистанционное зондирование в геологическом картировании / Под ред. Райкунова Г.Г. М.: Физматлит, 2014. 136 с.
- Смирнов С.И., Михайлов В.В., Остриков В.Н.* Поэтапная классификация гиперспектральных данных в пространстве коэффициентов спектральной яркости по результатам съемки с борта БЛА // Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. Под ред. Вербы В.С., Татарского Б.Г. Книга 2: Робототехнические комплексы на основе БЛА. М.: Радиотехника, 2016а. С. 518–528.
- Смирнов С.И., Михайлов В.В., Остриков В.Н., Кириенко А.В.* Использование рандомизированной модификации метода главных компонент для сжатия и тематической обработки данных в перспективных типах аппаратуры

дистанционного зондирования земли, применяемых на борту БЛА // Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. Под ред. Вербы В.С., Татарского Б.Г. Книга 2: Робототехнические комплексы на основе БЛА. М.: Радиотехника, 2016б. С. 529–538.

Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений. Пер с англ., М.: Техносфера, 2010. 560 с.

Matthew M.W., Adler-Golden S.M. et al., Atmospheric correction of spectral imagery: evaluation of the FLAASH algorithm with AVIRIS data, SPIE Proceedings, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral and Ultraspectral Imagery IX, 2003.

Ostrikov V.N., Plakhotnikov O.V. Calibration of Hyperspectral Data Aviation Mode According with Accompanying Groundbased Measurements of Standard Surfaces of Observed Scenes// *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. Vol. 50. № 9. 2014a. pp. 1016–1019.

Ostrikov V.N., Plakhotnikov O.V. Correlation between Hyperspectral Imagery Preprocessing and the Quality of Thematic Analysis // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. Vol. 50. № 9. 2014b, pp. 889–891.

SR-3500 Series Spectroradiometer /SM-3500 Series Spectrometer Operator's Manual / 2013. Spectral Evolution, Inc.1 Canal St. Unit B-1 Lawrence, MA 01840, USA, 17p.

Application of Aviation Video-Spectral Survey to Search for Fragments of Separating Parts of Launch Vehicles on the Ground

V. N. Ostrikov, O. V. Plakhotnikov, A. V. Kirienko

Saint Petersburg branch of JSC "CB "Luch"

The possibility of detecting debris fragments of separating parts of launch vehicles on the ground on the basis of video spectral (hyperspectral) aerial survey data processing in the range of 0.4-1.0 μm is considered. Evaluation of the quality of special methods pre-correction when comparing, during thematic processing, measures the spectral vicinity – the special delta-vector metric, modified metric Terebizh, factor correlations, and sub-pixel method.

Keywords: aerial environmental monitoring, man-made pollution search, hyperspectral data, pre-processing, factor correlations, delta-vector metric, modified metric Terebizh, sub-pixel method

REFERENCES

Matthew M.W., Adler-Golden S.M. et al. Atmospheric correction of spectral imagery: evaluation of the FLAASH algorithm with AVIRIS data, SPIE Proceedings, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral and Ultraspectral Imagery IX, 2003.

Okov I.N., Ostrikov V.N., Plakhotnikov O.V. Sposob umensheniya shuma elektronnoy izobrazheniya. Patent RF na izobretenie № 2491629, 2013 [A way to reduce electronic image noise. RF patent for invention № 2491629, 2013].

Ostrikov V.N., Kirienko A.V. Navigatsionnogokor-relyatsionnaya korrektsiya izobrazheniy, iskazhennykh vzaimnymi sdvigami strok [Navigation correlation correction of images distorted by mutual line shifts] // *Informatsionno-izmeritelnye i upravlyayushchie sistemy*, 2009, T. 7, № 7. S. 52-57.

Ostrikov V.N., Plakhotnikov O.V. Calibration of Hyperspectral Data Aviation Mode According with Accompanying Groundbased Measurements of Standard Surfaces of Observed Scenes// *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. Vol. 50. № 9. 2014a. pp. 1016–1019.

Ostrikov V.N., Plakhotnikov O.V. Correlation between Hyperspectral Imagery Preprocessing and the Quality of Thematic Analysis // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. — Vol. 50. № 9. 2014b, pp. 889–891.

Ostrikov V.N., Plakhotnikov O.V., Chapursky E.I. Otsenka voz-mozhnostey kosmicheskogo giperspektrometra “Resurs-P” na osnove modelnoy imitatsii “kubov” s primeneniem baz dannykh vysokogo prostranstvennogo razresheniya / *Trudy II vserossiyskoy nauchnoy konferentsii “Problemy voenno-prikladnoy geofiziki i kontrolya sostoyaniya prirodnoy sredy”*. Suvorov S.S. (red.) [Assessment of the capabilities of the space “Resurs-P” hyperspectrometer based on a model simulation of “cubes” using high spatial resolution databases / *Proceedings of the II All-Russian Scientific Conference “Problems of military-applied geophysics and control of the state of the environment”*. Suvorov S.S. (ed.)]. SPb: VKA im. A.F. Mozhayskogo, 2012. T. II, s. 278–283.

Ostrikov V.N., Plakhotnikov O.V., Kirienko A.V. Obrabotka giperspektralnykh dannykh, poluchaemykh s aviatsionnykh i kosmicheskikh nositeley [Processing of hyperspectral data obtained from aerospace and space carriers] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2013. T. 10, № 2. S. 243–251.

Ostrikov V.N., Plakhotnikov O.V., Kirienko A.V. Otsenka kharakteristik giperspektrometra po rezultatam testovoi syemki / *Kompleksy s bespilotnymi letatelnyimi apparatami*. Verba V.S., Tatarsky B.G. (red.). *Kniga 2: Robototekhnicheskie komplekсы na osnove BЛА* [Evaluation of the characteristics of the hyperspectrometer according to the results of the test survey / *Complexes with unmanned aerial vehicles*. Verba V.S., Tatarsky B.G. (eds). *Book 2:*

- UAV-based robotic systems]. M.: Radiotekhnika, 2016a. S. 579–587.
- Ostrikov V.N., Plakhotnikov O.V., Kirienko A.V., Smirnov S.I.* Otsenka sodержaniya azota i kaliya v biomasse rasteniy po atmosferno skorrektirovannym giperspektralnym dannym distantsionnogo zondirovaniya [Estimation of nitrogen and potassium content in plant biomass using atmospherically corrected hyperspectral remote sensing data] // *Optika atmosfery i okeana*, т. 29, № 7, 2016б, S. 566–571.
- Raykunov G.G., Shcherbakov V.L. et al.* Giperspektralnoe distantsionnoe zondirovanie v geologicheskom kartirovani. Raykunov G.G. (red.). [Hyperspectral remote sensing in geological mapping / Raykunov G.G. (ed.)]. M.: Fizmatlit, 2014. 136 s.
- Smirnov S.I., Mikhaylov V.V., Ostrikov V.N.* Poetapnaya klassifikatsiya giperspektralnykh dannyykh v prostranstve koeffitsientov spektralnoy yarkosti po rezul'tatam syemki s borta BLA / Kompleksy s bespilotnymi letatel'nymi apparatami. Verba V.S., Tatarsky B.G. (red.). Kniga 2: Robototekhnicheskie kompleksy na osnove BLA [Phased classification of hyperspectral data in the space of coefficients of spectral brightness according to the results of shooting from onboard the UAV / Complexes with unmanned aerial vehicles. Verba V.S., Tatarsky B.G. (eds). Book 2: UAV-based robotic systems]. M.: Radiotekhnika, 2016b. S. 529–538.
- Schowengerdt R.A.* Distantsionnoe zondirovanie. Metody i modeli obtabotki izobrazheniy [Remote sensing. Methods and models of image processing]. M.: Tekhnosfera, 2010. 560s.
- SR-3500 Series Spectroradiometer /SM-3500 Series Spectrometer Operator's Manual / 2013. Spectral Evolution, Inc.1 Canal St. Unit B-1 Lawrence, MA 01840, USA, 17p.