

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 528.85

Имитационная модель идентификации экологических загрязнений по данным гиперспектральной съемки видимого диапазона

В.Г. Бурлов¹, В.Н. Остриков², А.В. Кириенко², О.В. Плахотников^{2*}

¹Российский государственный гидрометеорологический университет
195196, г. Санкт-Петербург, пр. Малоохотинский, 98

²Филиал АО «Конструкторское бюро «Луч»»
197376, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Павлова, 14а

Поступила в редакцию 26.05.2023 г.;
после доработки 14.06.2023 г.;
принята к печати 10.07.2023 г.

Разработана математическая модель, имитирующая получение и обработку гиперспектральных данных дистанционного зондирования применительно к малозаметным фрагментам экологических загрязнений (мусора), размер которых соизмерим с пространственным разрешением аппаратуры наблюдения. Предусмотрено спектральное смешивание объектов с фоном с помощью специального коэффициента, который учитывает, что площадь каждого элемента шаблона сцены, относящегося к объекту, лишь частично заполнена его спектральной характеристикой, а остальная часть — характеристикой фона. Рассчитана вероятность выявления объектов в зависимости от условий наблюдения, задаваемых атмосферной моделью MODTRAN. Расхождение модельных данных с реальными экспериментальными данными не превышает 10%.

Ключевые слова: гиперспектральная съемка, дистанционное зондирование, имитационная модель, экологические загрязнения; hyperspectral imaging, remote sensing, simulation, environmental pollution.

Введение

Идентификация экологических загрязнений (мусора) по данным дистанционной съемки — одна из важных задач экологического мониторинга. Она представляет особый интерес, когда необходимо оперативно выявить малозаметные фрагменты, разбросанные на значительных площадях [1, 2]. Известно [3], что наилучшие результаты получаются при использовании гиперспектральной аппаратуры. В ходе решения этой задачи важную роль играет соизмеримость объектов поиска с пространственным разрешением прибора. Нужно также учитывать сравнительную малозаметность фрагментов при их частичном маскировании элементами окружающего фона (например, среди высокой травы). Отсюда следует необходимость априорной оценки наиболее целесообразных параметров съемки (высота, скорость сканирования), а также наиболее удачного варианта спектральной идентификации данных.

Имитационная модель (ИМ) гиперспектрального наблюдения [4–7] используется для повышения эффективности (повышения скорости обработки

и вероятности решения задачи спектральной идентификации) функционирования комплексов такого типа в конкретных условиях применения.

Цель работы — создание ИМ для идентификации экологически опасного мусора с учетом его малозаметности по данным гиперспектральной съемки (ГСС).

Данные, модель и метод исследования

Основными исходными данными для спектральной идентификации объектов являются коэффициенты их спектральной яркости (КСЯ), а также окружающего их фона. Особенно интересной представляется разработка ИМ для «критического» случая, т.е. для малозаметных объектов (за счет близости спектральных характеристик объектов и фона) и при их частичном маскировании фоном (на краях фрагментов поиска). Тогда априорная оценка качества может быть построена для бинарного случая «объект — фон».

Известно [8], что КСЯ представляет собой долю отраженного солнечного излучения на интервале спектра приемника, а идентификация объектов основана на сравнении каждой пиксельной спектральной кривой с априорно известными спектральными опорами. При этом возможна достаточно широкая вариабельность характеристик объекта и фона

* Вячеслав Георгиевич Бурлов (burlovvg@mail.ru);
Вадим Николаевич Остриков (ostrvad@mail.ru); Андрей
Васильевич Кириенко (kirienko13@mail.ru); Олег Влади-
мирович Плахотников (oleg-vl@yandex.ru).

в зависимости от их физических свойств, условий наблюдения, свойств наблюдаемого сюжета, а также от степени спектрального смешивания их КСЯ (особенно на краях фрагментов). В качестве примера на рис. 1 приведены исходные граничные (MAX и MIN) кривые КСЯ объекта и фона, полученные в результате обработки данных наблюдения спектрорадиометром [9] в наземных условиях с метровой высоты в нади́р с пространственным разрешением около 0,3 м. Высокочастотные колебания КСЯ в диапазоне от 0,9 до 1 мкм обусловлены качеством измерительного прибора.

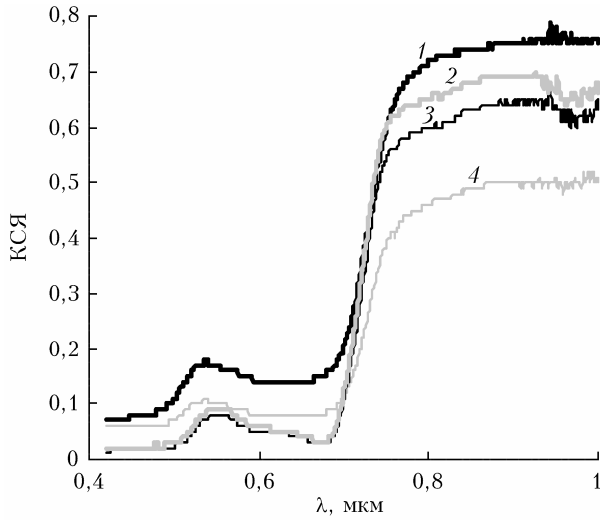


Рис. 1. Граничные кривые КСЯ объекта и сопутствующего фона: 1 — объект MIN; 2 — объект MAX; 3 — Фон MIN; 4 — Фон MAX

Для модельного синтеза каждого элементарного (поискельно) объекта наблюдения, попадающего в поле зрения аппаратуры, используется случайная бинарная смесь спектров, формируемая на основе следующих соображений.

Пусть $\xi_{ij} = \text{RAVN}(ij)$ — генерируемые датчиком случайные числа, равномерно распределенные в диапазоне от 0 до 1. Индексы ij соответствуют привязке случайного числа к координатам элементов шаблона сцены (разрешения прибора). Обозначим априорно известные функции распределения $F_{o, b}(\xi_{ij})$ (для имитируемых объектов «о», фона «b»), преобразующие равномерное распределение случайных чисел в заданное. Вид распределения определяется численно в ходе анализа экспериментальных данных, однако в большинстве случаев его можно принять нормальным. Тогда выражение для генерации элементов спектрального куба в виде пространственно-спектрального распределения КСЯ $\rho_{ij}(\lambda)$ запишем в виде

$$\rho_{ij}(\lambda) = \begin{cases} \rho_{Go}(\lambda)F_o(\xi_{ij}) + [1 - F_o(\xi_{ij})]\rho_{Mo}(\lambda), & ij \in o; \\ \rho_{Gb}(\lambda)F_b(\xi_{ij}) + [1 - F_b(\xi_{ij})]\rho_{Mb}(\lambda), & ij \in b, \end{cases} \quad (1)$$

где ρ_{Go} , ρ_{Mo} и ρ_{Gb} , ρ_{Mb} — соответственно верхняя и нижняя границы экспериментально измеренных

кривых, ограничивающих распределения КСЯ объекта и фона, как это следует из рис. 1.

Сигнал (в виде числа сигнальных зарядов) на каждом элементарном пространственно разрешаемом элементе прибора на заданной спектральной линии λ численно определяется (для аппаратуры со сканированием путевой скоростью) в соответствии с [5]:

$$N(\lambda) = \frac{\tau_p \mu_m p t_n \delta^2}{\hbar c} \sum_{k=1}^K \tau_o(\lambda_k) \mu(\lambda_k) L(\lambda_k) \Delta(\lambda_k), \quad (2)$$

где $\hbar$ — постоянная Планка; c — скорость света; $p = \pi d^2 / 4 f_o^2$ — параметр приемной апертуры, d — ее диаметр, f_o — фокусное расстояние прибора; τ_p — коэффициент ограничения потока в отверстии коллимирующего объектива (на щели прибора); μ_m — квантовая эффективность приемной матрицы в максимуме характеристики; t_n — время экспонирования; δ — размер приемного элемента; $\tau_o(\lambda_k)$ — абсолютное пропускание оптики на длине волны λ_k разбегания для k -го спектрального интервала $\Delta(\lambda_k)$ (при общем числе его разбиений K на шкале чувствительности прибора); $\mu(\lambda_k)$ — относительная спектральная квантовая эффективность приемной матрицы; $L(\lambda_k)$ — спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ) элемента зондируемой поверхности (объекта, фона или их смеси).

Для полного учета сигнала на элементе приемной матрицы необходимо предусмотреть наличие шума. В нашем случае шум — это случайное отклонение яркости изображения от истинного значения [10].

Как и для любого другого оптико-электронного прибора с фотоприемным устройством видимого диапазона, выходной шум формируется совокупностью факторов, достаточно подробно рассмотренных, например, в [9, 10]. Однако на практике значительную их часть сложно априорно оценить. По этой причине модель, применяемая для априорной оценки качества ГСС, строится комбинированным (теоретико-эмпирическим) методом. Так, используется следующая общепринятая в мировой практике априорная оценка отношения сигнала к случайному шуму, обусловленная в первую очередь рекомбинационной составляющей [5–7]:

$$\xi_n(\lambda) = \frac{N(\lambda)}{\sqrt{N(\lambda) + t_n \cdot u_n + \sigma_{sh}^2}}, \quad (3)$$

где σ_{sh} — среднеквадратическая ошибка (СКО), обусловленная шумом матрицы (как правило, она определена в техническом паспорте матричного приемника); u_n — скорость образования темновых электронов.

Кроме того при формировании сигналов в ГСС, особенно для наиболее распространенных приборов со сканированием путевой скоростью, в системе всегда присутствуют полосовые шумы, обуславливающие вертикальную и горизонтальную составляющие полосовых искажений. Такого рода искажения присущи каждому типу ГСС, поэтому целесообразнее проводить их оценку экспериментальным путем.

Для этого используемым типом аппаратуры проводится тестовая съемка по однородной мишени в условиях освещенности, идентичных реальным условиям.

Учитывая однородность тестовой области, в качестве оценки величины общих шумовых искажений на одной спектральной линии используем оценку СКО данных

$$\sigma_o = \sqrt{\frac{1}{NM-1} \sum_{i,j=1}^{NM} (x_{i,j} - E)^2}, \quad (4)$$

где $x_{i,j}$ — текущее значение яркости на данной спектральной линии;

$$E = \frac{1}{NM} \sum_{i,j=1}^{NM} x_{i,j} \quad (5)$$

— оценка математического ожидания (МО) — средняя яркость пикселей на тестовой области размером $N \cdot M$ (число строк на число столбцов); i, j — текущий номер строки и столбца (пикселя) этой области. Оценка общих шумовых искажений на снимке для данной спектральной линии позволяет рассчитать зависимость $\sigma_o(\lambda_k)$. Как следует из эксперимента, $E(\lambda)$ в этой области постоянна на каждой спектральной линии.

На рассмотренном тесте можно рассчитать оценки СКО вертикальных (v) и горизонтальных (g) полосовых искажений

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \sigma_{vj}^2}, \quad \sigma_g = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_{gi}^2}, \quad (6)$$

где

$$\sigma_{vj} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_{i,j} - E_j)^2},$$

$$\sigma_{gi} = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{j=1}^M (x_{i,j} - E_i)^2},$$

$$E_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{i,j}, \quad E_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M x_{i,j} \quad (7)$$

— частные величины СКО и МО.

Используя вышеозначенные данные по приемной матрице и прибору и учитывая условия проведения эксперимента, а также расчет яркости тестового объекта на основе атмосферной модели (подробней отмечено ниже), получим теоретически оценки отношения сигнала к шуму (ОСШ) (более точно — отношение оценки сигнала к оценке СКО шума). Тогда (теоретическая) оценка СКО случайного шума в выделенной области (на каждой спектральной линии прибора)

$$\sigma_e = E / \xi_n. \quad (8)$$

Учитывая взаимную независимость составляющих шумовых помех, СКО общих шумовых искажений

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma_v^2 + \sigma_g^2 + \sigma_e^2}. \quad (9)$$

Рассчитанные ОСШ по каждой составляющей приведены на рис. 2.

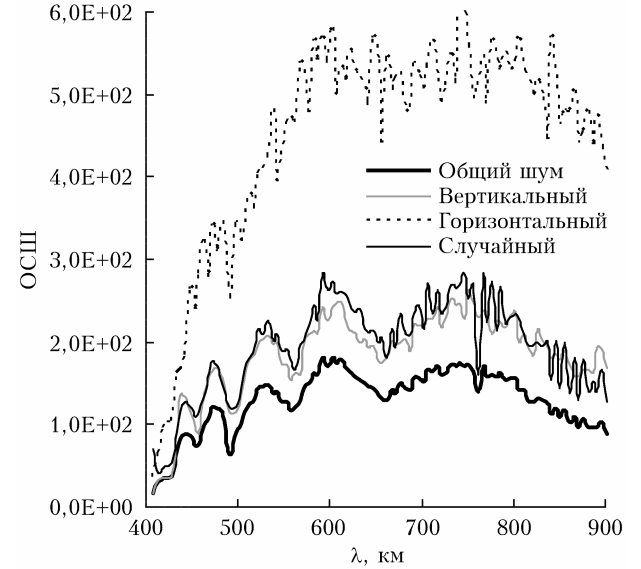


Рис. 2. Рассчитанные ОСШ для трех составляющих шумовых искажений

Используем полученные выше значения относительных шумов для генерации сигнала с аддитивными составляющими случайного шума и полосовых искажений в виде

$$s_{ij} = g_{ij} + g_{ij} \left\{ \frac{\text{Norm}(ij)}{\xi_n} + \frac{\text{Norm}(i)}{\xi_s} + \frac{\text{Norm}(j)}{\xi_c} \right\}, \quad (10)$$

где $\text{Norm}(ij)$, $\text{Norm}(i)$, $\text{Norm}(j)$ — генерируемые датчиками случайные числа, распределенные по нормальному закону с нулевым средним и единичным СКО для элементов ij моделируемой матрицы пространственного поля; ξ_n , ξ_s , ξ_c — соответствующие отношения сигнала к случайному шуму, полосовым помехам по строкам и по столбцам; g_{ij} — исходный, не зашумленный сигнал.

В большинстве случаев при дистанционной съемке используется атмосферная коррекция по опорному эталону [6, 10, 12].

Атмосферная коррекция текущего пикселя синтезированного снимка на основе эталона строится следующим образом [12]. Путь ρ_{ij} — вычисляемая оценка КСЯ текущего ij пикселя снимка, $L_{ij}(s_{ij})$ — СПЭЯ текущего пикселя, L_e — СПЭЯ калибрующего эталона, L_0 — СПЭЯ смещения, ρ_e — КСЯ корректирующего эталона, измеренный на земле ручным спектрометриком [9] ($i \in \{1, I\}$, $j \in \{1, J\}$, I, J — размеры спектральных образов «куба» по двум координатам в пикселях). Они связаны соотношением

$$\rho_{ij} = \rho_e (L_{ij} - L_0) / (L_e - L_0). \quad (11)$$

Зависимость участвующих величин от длины волны опущена, поскольку предполагается, что выражение записано для конкретной спектральной линии прибора. Отметим, что исходные текущие отсчеты снимка предварительно, на основе внутренней радиометрической калибровки, преобразуются в метрические значения СПЭЯ. В качестве СПЭЯ смещения используется пересчитанное минимальное спектральное значение сигнала в области наблюдения [12].

В (11) КСЯ корректирующего эталона должен быть заранее известен (для модели — взято из исходных данных), а СПЭЯ эталона взята из моделируемого снимка. В нашей модели в качестве корректирующего эталона принято среднее значение по известным элементам шаблона модели, относящимся к объектам поиска, а также спектральная кривая их среднего КСЯ. Так реализуется внешняя калибровка (атмосферная коррекция) модели, максимально приближенная к процессу обработки реальных данных.

Для законченной реализации модели требуется определить СПЭЯ элементов сцены, обусловленную солнечным освещением в рассматриваемом диапазоне. С этой целью применяется атмосферная модель MODTRAN 5 [13], на основе которой рассчитываются отраженные от подстилающей поверхности величины СПЭЯ элементов поверхности $L_{ij}(\lambda)$ в зависимости от текущего значения ρ_{ij} . В отсутствие облачности используемая модель атмосферы, с учетом заданных метеорологической дальности видимости (МДВ), высоты Солнца (ниже обозначено как H_c), типа присутствующего аэрозоля и геометрии наблюдения, вполне удовлетворяет качеству проводимых расчетов. Так, на ее основе возможна прямая атмосферная коррекция данных [14].

Для определения СПЭЯ на апертуре прибора с помощью модели MODTRAN (на каждой длине волны спектра) используется выражение, с достаточной для заданных целей точностью отражающее формализацию [14]:

$$L = \frac{Ap}{1 - \theta a} + \frac{Ba}{1 - \theta a} + L_0, \quad (12)$$

где

$$A = Lp1(1 - \theta), \quad B = (L1 - Lp1 - L_0)(1 - \theta),$$

$$\theta = \frac{L1 + L_0 - 2L05}{L1 - L05}, \quad (13)$$

a — альbedo поверхности (подстилающей), окружающей точку наблюдения на земле; ρ — текущее значение КСЯ пикселя (элемента наблюдаемой сцены на поверхности); θ — сферическое альbedo атмосферы; A, B — коэффициенты, учитывающие влияние «прямой» отраженной и «диффузной» составляющих суммарной яркости на апертуре датчика; $Lp1$ — полученная на основе атмосферной модели «прямая» составляющая отражения при условии $a = p = 1$; $L1$ — суммарная составляющая при $a = p = 1$; $L05$ — суммарная составляющая при $a = p = 0,5$; L_0 — «путевая» составляющая при $a = p = 0$.

Альbedo поверхности, окружающей наблюдаемый элемент с КСЯ ρ , рассчитывается как отно-

шение всего отраженного в верхнюю полусферу потока к падающему потоку также из всей верхней полусферы и определяется в рассматриваемом случае средним значением суммы КСЯ окружающих элементов подстилающей поверхности в некоторой окрестности. Обычно для получения хорошей точности достаточно усреднить все КСЯ элементов разрешения подстилающей поверхности в радиусе 0,5–1 км от точки наблюдения.

Этот подход, основанный на вычислении СПЭЯ, отраженной от поверхности земли и дошедшей до апертюры прибора, дает возможность оценить вклад отдельных составляющих в конечную яркость для конкретных условий наблюдения и состояния среды.

Таким образом, рассмотренная ИМ позволяет на первом этапе для заданных условий наблюдения (высота наблюдения, высота Солнца, тип атмосферы, тип аэрозоля, спектральный диапазон и спектральное разрешение датчика, а также пространственное разрешение и степень спектрального смешивания бинарной пары «объект — фон») рассчитать в каждом пикселе синтезируемой сцены калиброванные величины КСЯ ρ_{ij} наблюдаемой сцены с учетом искажающих шумов. Иными словами, синтезируется ее спектральный куб. На втором этапе, как правило, проводится предварительная обработка данных с целью повышения на полученном снимке ОСШ путем компенсации введенных полосовых и случайных искажений с использованием, например, варианта обработки данных [15].

На третьем этапе проводится тематическая обработка данных для спектральной идентификации элементов синтезируемой сцены. Эта обработка может быть реализована большим количеством различных метрик [10]. Однако в большинстве случаев, когда объекты поиска соизмеримы с элементами пространственного разрешения прибора (наблюдение на максимально возможной дистанции) и спектрально смешаны с фоном, наибольший интерес представляет субпиксельная метрика спектральной идентификации.

Суть субпиксельной метрики в общем случае состоит в проецировании текущего пиксельного вектора $\rho_{ij}(\lambda)$ на априорно заданные опорные спектральные векторы $\rho_n(\lambda)$, $n = 1, 2, \dots, N$ (т.е. принадлежащие объекту или фону). Здесь $ij \in [I, J]$, где $I \times J$ — двумерная область снимка.

Пусть $k = 1, 2, \dots, K$ — число спектральных каналов используемого прибора. Процедура субпиксельного проецирования на принятые опоры может быть записана в виде

$$[r_{ij}^{(1)} r_{ij}^{(2)} \dots r_{ij}^{(N)}]^T = (\mathbf{R}^T \mathbf{R})^{-1} \mathbf{R}^T \rho_{ij}(\lambda_k), \quad (14)$$

где матрица проецирования строится по заранее выбранным N векторам:

$$\mathbf{R}^T = \begin{bmatrix} \rho_1(\lambda_k) \\ \rho_2(\lambda_k) \\ \dots \\ \rho_N(\lambda_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_1^{(1)} & \rho_1^{(2)} & \dots & \rho_1^{(K)} \\ \rho_2^{(1)} & \rho_2^{(2)} & \dots & \rho_2^{(K)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_N^{(1)} & \rho_N^{(2)} & \dots & \rho_N^{(K)} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Здесь T — знак транспонирования.

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

Для конечной идентификации следует сопоставить вычисленные проекции. При этом отнесение ij -пикселя к тому или иному классу определяется наибольшей величиной проекции из всех рассчитываемых N величин, т.е. $r_{ij}^{(l)} = \max_n \{r_{ij}^{(n)}\}$. Когда используется ИМ применительно к бинарному случаю (выбор «критических» сочетаний «объект — фон»), $N = 2$. При этом в качестве спектральных опор для идентификации, как по объекту, так и по фону, выбираются их средние векторы из диапазона варьирования (см. рис. 1).

Для имитации пространственного представления «критических» сочетаний с учетом спектрального смешивания предлагается шахматное расположение объектов поиска и фона. При этом каждый элемент (его КСЯ) рассчитывается с учетом коэффициента смешивания. В элементах шаблона сцены, соответствующих объекту, только часть площади занимает объект (т.е. КСЯ объекта), а другую часть — фон. Соотношение этих площадей и определяет коэффициент смешивания. Если он единичный,

то весь элемент шаблона занимает КСЯ объекта. Такой подход позволяет учитывать возможность реальной аппаратуры попадать элементом разрешения на элемент местности, где частично присутствуют и объект, и фон (попадание на пространственную границу искомого фрагмента). Особенно это важно именно в случае, когда размер синтезируемого объекта близок к размеру элемента пространственного разрешения прибора.

Результаты и обсуждение

На рис. 3 приведены результаты применения ИМ в бинарном случае. На рис. 3, *а* представлен образ правильных решений, где яркие элементы соответствуют искомым объектам (при заданном неединичном коэффициенте смешивания), темные — фону. Этот пример показывает, что результат спектральной идентификации данных существенно зависит от реальных условий наблюдения.

На рис. 4 представлены рассчитанные вероятности правильного различения объектов и вероятности ложных тревог для трех состояний атмосферы

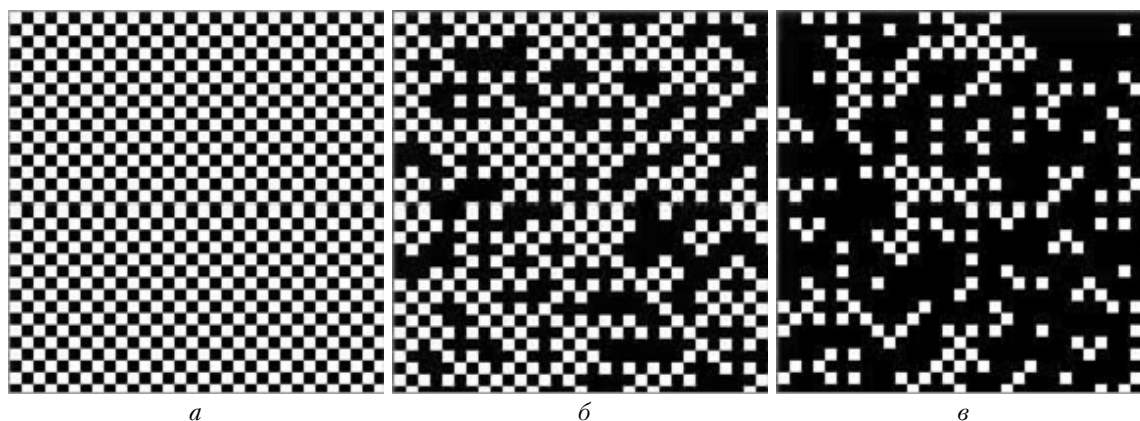


Рис. 3. Образ правильных решений (*а*); решения для атмосферной модели с МДВ = 23 км и $H_c = 53^\circ$ (*б*), с МДВ = 23 км и $H_c = 16^\circ$ (*в*)

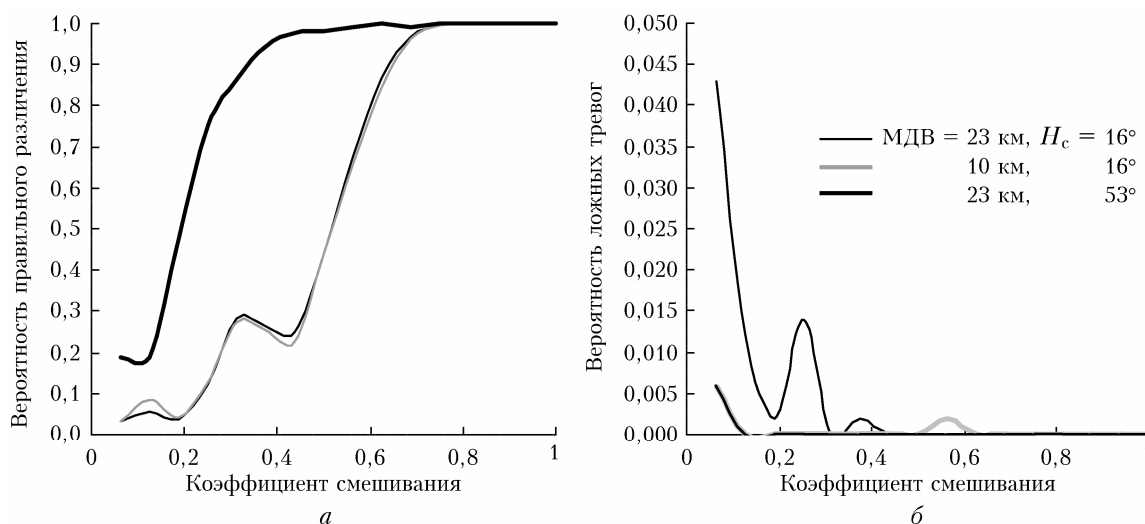


Рис. 4. Рассчитанные вероятности правильного различения (*а*) и ложных тревог (*б*)

и наблюдений в надир при спектральном разрешении аппаратуры 5 нм. Видно, что вероятность ложных тревог при максимальной из рассмотренных вариантов высоте Солнца (53°) практически нулевая начиная с коэффициента заполнения элемента разрешения объектом и фоном в соотношении 1:5. То, что искомый объект в элементе разрешения занимает 20% площади заданного фона, позволяет системе обработки обнаруживать, как это показано на рис. 3, б, объект с вероятностью не ниже 0,5. При существенно меньшей высоте Солнца (16°) снижение МДВ с 23 до 10 км не оказывает существенного влияния ни на наличие ложных тревог, ни на вероятность правильного различения объекта.

Сравнение расчетов на основе ИМ для «критической» модельной пары с результатами реальной спектральной идентификации аналогичных объектов [1] позволяет утверждать, что расхождение модельных данных с экспериментальными данными не превышает 10% при коэффициенте смешивания «объект – фон» около 0,7. Это соответствовало в рассматриваемом случае условиям реальных наблюдений.

Заключение

Предложенная имитационная модель бинарного различения «критической» спектральной пары «объект – фон» позволяет априорно оценить результаты реальной съемки и обработки данных. При этом могут учитываться возможности предварительной обработки и выбор конкретного варианта тематической обработки данных (идентификационной метрики). Модель позволяет заранее определить наиболее подходящие параметры съемки и выбрать согласованный метод обработки применительно к решению задачи поиска экологических загрязнений (фрагментов мусора) в условиях их низкой заметности. Предложенная имитационная модель в общем случае (по другим типам объектов) позволяет повысить эффективность получения и обработки данных авиационной гиперспектральной съемки.

Список литературы

1. Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кириенко А.В. Применение авиационной видеоспектральной съемки для поиска на местности фрагментов отделяющихся частей ракет-носителей // Исследование Земли из космоса. 2019. № 2. С. 45–54.
2. Стёпочкин И.Е., Салюк П.А., Качур В.А. Обнаружение разлива нефтепродуктов в виде эмульсий и отдельных пленок на поверхности Берингова моря с помощью гиперспектральной оптической радиометрии в августе 2013 г. // Оптика атмосф. и океана. 2021. Т. 34, № 1. С. 61–67; Stepochkin I.E., Salyuk P.A., Kachur V.A. Detection of oil pollution in the form of emulsion and individual films on the water surface of

the Bering Sea using hyperspectral visible radiometry in August 2013 // Atmos. Ocean. Opt. 2021. V. 34, N 3. P. 267–273.

3. Бурлов В.Г., Кириенко А.В., Остриков В.Н., Плахотников О.В. Оценка качества построения геоинформационной системы автоматизированного поиска техногенного мусора по видеоданным воздушной съемки // Гидрометеорология и экология. 2021. № 63. С. 311–328.
4. Белов В.В., Тарасенков М.В. Три алгоритма статистического моделирования в задачах оптической связи на рассеянном излучении и бистатистического зондирования // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 5. С. 397–403; Belov V.V., Tarasenkova M.V. Three algorithms of statistical modeling in problems of optical communication on scattered radiation and bistatic sensing // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 5. P. 533–540.
5. Балтер Б.М., Балтер Д.Б., Егоров В.В., Калинин А.П., Котцов В.А., Орлов А.Г., Родионов И.Д., Стальная М.В. Методика имитационного моделирования гиперспектральных изображений земной поверхности // Исследование Земли из космоса. 2007. № 5. С. 21–29.
6. Остриков В.Н., Плахотников О.В., Шулика К.М. Имитационная модель преобразования снимков авиационного спектрометра на условия наблюдения из космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 2. С. 167–172.
7. Börner A., Wiest L., Reulke R., Richter R. SENSOR: A tool for the simulation of hyperspectral remote sensing systems // Proc. of Remote Sensing and Hologrammetry Society Conference 2008 “Measuring change in change in the Earth system”, University of Exeter, 15–17 September 2008. 21 p.
8. Чанурский Л.И. Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400–2500 нм. М.: МО СССР, 1986. Ч. 1. 205 с.
9. SR-3500 Series Spectroradiometer /SM-3500 Series Spectrometer Operator's Manual. Spectral Evolution, Inc., MA, USA, 2014. 13 p.
10. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
11. Остриков В.Н., Плахотников О.В. Калибровка гиперспектральных данных авиационной съемки по сопутствующим наземным измерениям эталонных поверхностей наблюдаемых сцен // Исследование Земли из космоса. 2013. № 6. С. 38–42.
12. Berk A., Anderson G.P., Acharya P.K., Shettle E.P. MODTRAN 5.2.0.0 User's Manual. Spectral Sciences, Inc., July 2008. 100 p.
13. Kruse F.A. Comparison of ATREM, ACORN, and FLAASH atmospheric correction using low altitude AVIRIS data of Boulder, Colorado // Proc. of the AVIRIS Earth Science and Applications Workshop, 31 March – 2 April, 2004. 10 p.
14. Молчанов А.С. Иконические системы воздушной разведки. Основы построения, оценка качества и их применение в комплексах с БЛА. Волгоград: Панорама, 2017. 214 с.

15. Остриков В.Н., Плахотников О.В. Влияние предварительной обработки данных гиперспектральной съемки на качество их тематического анализа // Исследование Земли из космоса. 2014. № 1. С. 1–6.

V.G. Burlov, V.N. Ostrikov, A.V. Kirienko, O.V. Plakhotnikov. Simulation model for the identification of environmental pollution from hyperspectral imagery in the visible range.

A mathematical model is proposed that simulates the acquisition and processing of hyperspectral remote sensing data on subtle fragments of environmental pollution (garbage) comparable in size with the spatial resolution of the observation equipment. Spectral mixing of “objects” with “background” is provided by a special coefficient, which takes into account that the area of each element of a scene template related to the “object” is only partially filled with its spectral characteristic, and the rest of the area, with the background characteristic. The options for calculating the probability of detecting objects depending on the observation conditions specified with the MODTRAN atmospheric model are considered. The difference between the model data and real experimental results is no more than 10%.