«Оптика атмосферы и океана», **31**, № 2 (2018)
DOI: 10.15372/AOO20180213

УДК 004.056:658.562

Некоторые закономерности обнаружения объектов по гиперспектральным данным

С.М. Огреб, М.В. Тишанинов, П.М. Юхно*

Государственный научно-исследовательский испытательный институт проблем технической защиты информации Федеральной службы по техническому и экспортному контролю
394020, г. Воронеж, ул. 9 января, 280а

Поступила в редакцию 8.08.2017 г.

На основе результатов статистического синтеза оптимального алгоритма обнаружения объектов гиперспектральной аппаратурой исследованы особенности такого алгоритма, которые позволили установить некоторые общие закономерности обнаружения пространственных объектов по гиперспектральным данным, связывающие амплитудные и спектральные различия излучения объекта и фона.

Ключевые слова: пространственный объект, синтез, обнаружитель, оптимальный алгоритм, гиперспектральный, отношение сигнал-шум, спектральная характеристика; spatial object, synthesis, detector, optimal algorithm, hyperspectral, signal-to-noise ratio, spectral characteristic.

В последние годы в практику аэрокосмического мониторинга земной поверхности активно внедряются методы и средства гиперспектральной съемки. Это позволяет регистрировать данные с высоким пространственным разрешением (единицы нанометров и менее) в большом числе спектральных каналов (до нескольких сотен). Результаты гиперспектральных измерений могут использоваться для решения сложных задач обнаружения малоразмерных, в том числе хорошо замаскированных пространственных объектов, идентификации объектов по характеристикам их поверхности, выделения различий между объектами близких классов и т.п. Для успешного решения таких задач необходима атмосферная коррекция гиперспектральных данных и их последующая обработка с использованием эффективных алгоритмов, которые могут быть интерпретированы как алгоритмы формирования решающих правил получения конечных результатов. Вопросы атмосферной коррекции освещаются в работах [1–4]. Обзор алгоритмов обработки данных и формирования решающих правил содержится в [1]. Общая особенность этих алгоритмов – существенная роль эвристических предпосылок при их формировании.

В [5] приводятся результаты статистического синтеза оптимального гиперспектрального обнаружителя пространственных объектов, который позволяет оценить его потенциальные возможности. Синтез выполняется методами теории статистических решений без использования эвристики. Это дает основания надеяться, что анализ его результатов выявит некоторые общие закономерности обнаружения пространственных объектов по гиперспектральным данным. Исследованию таких особенностей, или закономерностей, и посвящена настоящая работа.

В рамках работы зададимся поиском ответов на следующие вопросы:

– в какой мере при обнаружении пространственных объектов гиперспектральной аппаратурой амплитудные различия излучения объекта и фона можно полагать эквивалентными их спектральным различиям, т.е. в каком количественном соотношении можно заменять амплитудные различия на спектральные и наоборот при получении одной и той же вероятности обнаружения;

– что следует полагать мерой спектральных различий, т.е. какие спектральные различия можно считать эквивалентными для получения одной и той же вероятности обнаружения или одного и того же отношения сигнал-шум;

– насколько совпадают закономерности обнаружения пространственных объектов гиперспектральной аппаратурой с аналогичными закономерностями, имеющими место при обнаружении объектов телевизионной аппаратурой в панхроматическом режиме.

В [5] показано, что решающее правило оптимального по критерию Неймана–Пирсона обнаружения объекта $c(x_1, x_2, x_3)$, наблюдаемого в аппликативной смеси с фоном $f(x_1, x_2, x_3)$, определяется выражением

$$\Lambda = \frac{1}{N}\int_G u(x_1, x_2, x_3)\big(c(x_1, x_2, x_3) - f(x_1, x_2, x_3)\big)dx_1\,dx_2\,dx_3 \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \eta. \quad (1)$$

* Сергей Митрофанович Огреб (ogreb56@mail.ru); Михаил Владимирович Тишанинов (mvtish@mail.ru); Павел Михайлович Юхно (jukhnopm@mail.ru).

Здесь Λ — главная часть логарифма отношения правдоподобия; $u(x_1, x_2, x_3)$ — наблюдаемые гиперспектральные данные; N — спектральная плотность трехмерного белого шума наблюдения; H_1, H_0 — гипотезы о наличии и отсутствии объекта наблюдения соответственно; η — порог обнаружения; $G = L \times E$, L — область определения пространственных переменных (x_1, x_2), ограниченная периметром объекта, E — область определения спектральной координаты x_3.

Из (1) после обычных преобразований, приведенных, например, в [5], вытекает следующее выражение для параметра обнаружения q, называемого часто также отношением сигнал-шум:

$$q = \left(\frac{1}{N} \int\limits_G \left(c(x_1, x_2, x_3) - f(x_1, x_2, x_3) \right)^2 dx_1 dx_2 dx_3 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

Физически q характеризует отношение приращения сигнала на выходе решающего устройства при появлении объекта в области наблюдения к среднеквадратическому отклонению случайной составляющей этого сигнала.

Запишем сигнал, формируемый гиперспектрометром, в таком виде, чтобы в нем более или менее автономно были представлены пространственно-яркостная и спектральная составляющие. Так, если $c(x_1, x_2, x_3)$ — некоторый сигнал гиперспектрального обнаружителя, то будем использовать следующее его представление:

$$c(x_1, x_2, x_3) = c_1(x_1, x_2) c_2(x_1, x_2, x_3), \quad (3)$$

где $c_1(x_1, x_2)$ — поле яркости (панхроматическое изображение) объекта; функция $c_2(x_1, x_2, x_3)$ ставит в соответствие каждому пространственному пикселу объекта (x_1, x_2) его спектральную характеристику как функцию переменной x_3. Причем спектральная характеристика должна удовлетворять условиям нормировки, в соответствии с которыми $\int\limits_E c_2(x_1, x_2, x_3) dx_3 = 1$ для любых координат x_1, x_2.

Хорошо интерпретируемые физически закономерности обнаружения пространственных объектов по гиперспектральным данным могут быть получены для случая обнаружения неравнояркого равномерно окрашенного объекта на неравнояркомравномерно окрашенном фоне, когда $c(x_1, x_2, x_3) = c(x_1, x_2) c_2(x_3)$ и $f(x_1, x_2, x_3) = f_1(x_1, x_2) f_2(x_3)$. В такой ситуации

$$q = \left(\frac{1}{N} \int\limits_L dx_1 dx_2 \times \right.$$

$$\left. \times \int\limits_E \left(c_1(x_1, x_2) c_2(x_3) - f_1(x_1, x_2) f_2(x_3) \right)^2 dx_3 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Если объект и фон имеют одинаковые нормированные спектральные характеристики, т.е. $f_2(x_3) = c_2(x_3)$, и отличаются только яркостями $c_1(x_1, x_2)$ и $f_1(x_1, x_2)$, то выражение (4) преобразуется к виду

$$q_1 = \left(\frac{1}{N} \int\limits_L \left(c_1(x_1, x_2) - f_1(x_1, x_2) \right)^2 dx_1 dx_2 \int\limits_E c_2^2(x_3) dx_3 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

Анализ выражения (5) показывает, что в этом случае значение параметра обнаружения q_1 зависит не только от разности яркостей объекта и фона, как это имеет место в панхроматическом режиме наблюдения, но и от вида спектральной характеристики $c_2(x_3)$. Если обозначить символом q_n параметр обнаружения, соответствующий панхроматическому режиму, то из (5) следует, что

$$q_1 = q_n \left(\int\limits_E c_2^2(x_3) dx_3 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Пусть теперь объект и фон имеют одинаковую яркость, т.е. $c_1(x_1, x_2) = f_1(x_1, x_2)$, но отличаются нормированными спектральными характеристиками $c_2(x_3)$, $f_2(x_3)$. В этом случае выражение (4) запишется как

$$q_2 = \left(\frac{1}{N} \int\limits_L c_1^2(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \int\limits_E \left(c_2(x_3) - f_2(x_3) \right)^2 dx_3 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

Рассмотрим важный для приложений случай малых отношений сигнал-шум, когда пространственно-яркостные и спектральные характеристики объекта и фона отличаются незначительно, т.е. $c_1(x_1, x_2) \approx \approx f_1(x_1, x_2)$ и $c_2(x_3) \approx f_2(x_3)$. Выражения, определяющие, в какой пропорции амплитудные отличия объекта и фона при гиперспектральном обнаружении эквивалентны нормированным спектральным различиям, в этом случае следуют из равенства $q_1 = q_2$. Обозначим $\left(c_1(x_1, x_2) - f_1(x_1, x_2) \right) = \Delta(x_1, x_2)$, $\left(c_2(x_3) - f_2(x_3) \right) = \delta(x_3)$. Тогда это равенство преобразуется к виду

$$\int\limits_L \Delta^2(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \int\limits_E c_2^2(x_3) dx_3 =$$

$$= \int\limits_L c_1^2(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \int\limits_E (\delta(x_3))^2 dx_3, \quad (8)$$

откуда

$$\frac{\int\limits_L \Delta^2(x_1, x_2) dx_1 dx_2}{\int\limits_L c_1^2(x_1, x_2) dx_1 dx_2} = \frac{\int\limits_E (\delta(x_3))^2 dx_3}{\int\limits_E c_2^2(x_3) dx_3}. \quad (9)$$

При обнаружении равнояркого равномерно окрашенного объекта на равнояркомравномерно окрашенном фоне, когда $c_1(x_1, x_2) = c_1 = \mathrm{const}$, $f_1(x_1, x_2) = = f_1 = \mathrm{const}$, равенство (9) эквивалентно следующему:

$$\frac{\Delta^2}{c_1^2} = \frac{\int\limits_E \left(\delta(x_3) \right)^2 dx_3}{\int\limits_E c_2^2(x_3) dx_3}. \quad (10)$$

Из (10) следует, что в рассматриваемом случае отношение квадрата разности амплитудных характеристик (яркости) объекта и фона к квадрату яркости объекта оказывает такое же влияние на характеристики обнаружения, как и отношение интеграла от квадрата разности нормированных спектральных характеристик объекта и фона к интегралу от квадрата нормированной спектральной характеристики объекта.

В общем случае произвольных значений отношения сигнал-шум для получения выражений, определяющих пропорции, в которых пространственно-яркостные и спектральные различия могут заменяться одни на другие, представим интеграл в правой части выражения (4) так:

$$I = \int_L dx_1 dx_2 \int_E \left[c_1(x_1,x_2)c_2(x_3) - f_1(x_1,x_2)f_2(x_3)\right]^2 dx_3 =$$
$$= \int_L dx_1 dx_2 \int_E \Big[\big(f_1(x_1,x_2) + \Delta(x_1,x_2)\big)\big(f_2(x_3) + \delta(x_3)\big) -$$
$$- f_1(x_1,x_2)f_2(x_3)\Big]^2 dx_3 =$$
$$= \int_L dx_1 dx_2 \int_E f_1^2 f_2^2(x_3) \left[\left(\frac{\Delta(x_1,x_2)}{f_1(x_1,x_2)}\right)^2 + \left(\frac{\delta(x_3)}{f_2(x_3)}\right)^2 + \right.$$
$$+ \left(\frac{\Delta(x_1,x_2)}{f_1(x_1,x_2)}\right)^2 \left(\frac{\delta(x_3)}{f_2(x_3)}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta(x_1,x_2)}{f_1(x_1,x_2)}\right)\left(\frac{\delta(x_3)}{f_2(x_3)}\right) +$$
$$+ 2\left(\frac{\Delta(x_1,x_2)}{f_1(x_1,x_2)}\right)^2 \left(\frac{\delta(x_3)}{f_2(x_3)}\right) +$$
$$\left. + 2\left(\frac{\Delta(x_1,x_2)}{f_1(x_1,x_2)}\right)\left(\frac{\delta(x_3)}{f_2(x_3)}\right)^2\right] dx_3 = q^2 N. \quad (11)$$

Введем обозначения $\dfrac{\Delta(x_1,x_2)}{f_1(x_1,x_2)} = a(x_1,x_2)$, $\dfrac{\delta(x_3)}{f_2(x_3)} = s(x_3)$. Тогда (11) преобразуется к виду

$$\int_L dx_1 dx_2 \int_E f_1^2 \Big[a^2 f_2^2(x_3) + (1+a)^2 \delta^2(x_3) +$$
$$+ 2a(1+a)\delta(x_3)f_2(x_3)\Big] dx_3 = q^2 N. \quad (12)$$

С целью сокращения записи в (12) опущена зависимость a от переменных x_1, x_2.

Выражение (12) определяет вид и условия эквивалентности (по показателю «вероятность обнаружения объекта») различных пространственно-яркостных или спектральных характеристик объекта или фона, которые при фиксированном значении спектральной плотности шума N реализуют одинаковые значения отношения сигнал-шум q и, следовательно, одни и те же значения вероятности обнаружения объекта. Для того чтобы воспользоваться этим выражением, необходимо задать класс интегрируемых функций, к которому будет принадлежать искомая пространственно-яркостная или спектральная характеристика объекта или фона.

Если класс таких функций, определяющий, например, спектральную характеристику объекта или фона, задается с точностью до произвольного числа неизвестных параметров, выражение (12) преобразуется в уравнение относительно этих параметров. Дополним (12) уравнением, гарантирующим выполнение условия нормировки искомой спектральной характеристики к единице, — в данном случае в форме

$$\int_E \delta(x_3) dx_3 = 0. \quad (13)$$

Выражения (12) и (13), рассматриваемые как система уравнений относительно двух выбранных параметров, может быть решена численными методами при соответствующем выборе значений всех оставшихся параметров. Множество этих оставшихся параметров, на котором система (12), (13) имеет решение, и образует класс эквивалентности спектральных характеристик объекта или фона при прочих фиксированных исходных данных.

Поясним особенности описанной процедуры на примере, относящемся к случаю обнаружения равнояркого равномерно окрашенного объекта на равноярком равномерно окрашенном фоне, когда $a(x_1, x_2) = a = \text{const}$, $f_1(x_1, x_2) = f_1 = \text{const}$. Полагаем известными a, f_1, N, $f_2(x_3)$. Определим $\delta(x_3)$, а значит, и вид спектральной характеристики объекта, обеспечивающей заданное отношение сигнал-шум q. Будем искать $\delta(x_3)$ на множестве функций, зависящих от трех параметров p_1, p_2, p_3, например на множестве экспоненциальных функций

$$\delta(x_3) = p_3(x_3 - p_1)\exp\left(\frac{(x_3 - p_1)^2}{p_2^2}\right). \quad (14)$$

Тогда уравнение (12) принимает вид

$$f_1^2 a^2 J_1 + (1+a)^2 J_2(p_1,p_2,p_3) +$$
$$+ 2a(1+a)J_3(p_1,p_2,p_3) = \frac{q^2 N}{f_2^2 S}, \quad (15)$$

где

$$J_1 = \int_E f_2^2(x_3)dx_3, \quad J_2(p_1,p_2,p_3) = \int_E \delta^2(x_3)dx_3,$$
$$J_3(p_1,p_2,p_3) = \int_E \delta(x_3)f_2(x_3)dx_3, \quad (16)$$

S — площадь, ограниченная периметром объекта.

Если $\delta(x_3)$ задано выражением (14), то условие (13) выполняется при любых значениях параметров p_1, p_2, p_3. Поэтому дальнейший анализ можно ограничить рассмотрением только уравнения (15). Выбрав в качестве его искомого решения, например, параметр p_1 и определив множество параметров p_2, p_3, на котором уравнение имеет решение относительно p_1, мы тем самым определим класс эквивалентности спектральных характеристик объекта, соответствующий приведенным выше условиям и представлению $\delta(x_3)$ в виде выражения (14).

Рассмотрим другие специфические закономерности обнаружения объектов по гиперспектральным данным в рассматриваемом примере. Перепишем выражение (4) так:

$$q^2 = \frac{S}{N}\int_E \left(c_1^2 c_2^2(x_3) + f_1^2 f_2^2(x_3)\right) dx_3 -$$

$$-\frac{2S}{N} c_1^2 f_1^2 \int_E c_2(x_3) f_2(x_3) dx_3. \qquad (17)$$

Интеграл $R = \int_E c_2(x_3) f_2(x_3) dx_3$ в (17) представляет собой функцию кросс-корреляции нормированных спектральных характеристик объекта и фона при их нулевом относительном смещении. Этот интеграл не может принимать отрицательные значения, поскольку при любых x_3 спектральные характеристики объекта и фона принимают только нулевые или положительные значения. Поэтому отношение сигнал-шум q и зависящая от него вероятность обнаружения объекта достигают максимума при нулевой кросс-корреляции спектральных характеристик объекта и фона.

Анализ выражения (17) также показывает, что при малых значениях R и тем более при $R = 0$ уменьшение разности между амплитудными характеристиками объекта и фона может приводить не к уменьшению вероятности обнаружения объекта, как это имеет место в панхроматических обнаружителях, а наоборот, к ее увеличению. Действительно, как следует из (17), если в исходный момент

$$\int_E c_1^2 c_2^2(x_3) dx_3 > \int_E f_1^2 f_2^2(x_3) dx_3, \qquad (18)$$

то при $R = 0$ и увеличении яркости фона f_1 значение q, а следовательно, и значение вероятности обнаружения объекта будет возрастать.

По аналогии с понятием яркостного контраста объекта и фона, обычно используемым при анализе панхроматических обнаружителей, в рассматриваемом случае представляется полезным ввести понятие цветового контраста. Чтобы дать определение и более наглядно описать вклад цветового контраста в характеристики обнаружения объекта, естественно отталкиваться от ситуации, характеризуемой отсутствием яркостного контраста или равенством яркостей объекта и фона, т.е. $c_1 = f_1$. В этом случае (17) преобразуется к виду

$$q = \left(\frac{S f_1^2}{N}\int_E \left(c_2(x_3) - f_2(x_3)\right)^2 dx_3\right)^{\frac{1}{2}}. \qquad (19)$$

Выражение (19) показывает, что цветовой контраст k_c удобно задать зависимостью

$$k_c = \left(\int_E \left(c_2(x_3) - f_2(x_3)\right)^2 dx_3\right)^{\frac{1}{2}}. \qquad (20)$$

Определенный таким образом цветовой контраст — это характеристика спектральных различий объекта и фона, достаточная для определения отношения сигнал-шум и вероятности обнаружения равнояркого равномерно окрашенного объекта на равнояркого равномерно окрашенном фоне.

Итак, в результате выполненных в настоящей работе исследований установлено следующее.

При обнаружении по гиперспектральным данным равномерно окрашенного объекта на равномерно окрашенном фоне отношение квадрата разности амплитудных характеристик объекта и фона к квадрату яркости объекта оказывает такое же влияние на характеристики обнаружения, как и отношение интеграла от квадрата разности нормированных спектральных характеристик объекта и фона к интегралу от квадрата нормированной спектральной характеристики объекта.

Предложена процедура определения классов (или условий) эквивалентности (по показателю «вероятность обнаружения объекта») различных пространственно-яркостных или спектральных характеристик объекта или фона, которые реализуют одинаковые значения отношения сигнал-шум и, следовательно, одни и те же значения вероятности обнаружения объекта. Каждый класс эквивалентности определяется с точностью до множества интегрируемых функций от пространственных или спектральной переменных. Это множество функций задается с точностью до произвольного числа варьируемых параметров.

При обнаружении равнояркого равномерно окрашенного объекта на равнояркого равномерно окрашенном фоне параметр обнаружения q достигает своего наибольшего значения в случае некоррелированных спектральных характеристик объекта и фона, т.е. когда коэффициент их взаимной корреляции равен нулю.

При любом различии нормированных спектральных характеристик объекта и фона значение параметра обнаружения тем выше, чем больше значение интегральной, т.е. суммарной по всем спектральным диапазонам, яркости не только объекта, но и фона.

При малых и тем более при нулевых значениях коэффициента взаимной корреляции нормированных спектральных характеристик объекта и фона уменьшение различий между амплитудными характеристиками (яркостью) объекта и фона может в ряде случаев приводить не к уменьшению вероятности обнаружения объекта, как в панхроматическом режиме, а наоборот, к ее увеличению.

Введено понятие цветового контраста объекта и фона как характеристики их спектральных различий, которая определяет отношение сигнал-шум и вероятность обнаружения равнояркого равномерно окрашенного объекта на равнояркого равномерно окрашенном фоне.

1. *Шовенгердт Р.А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.

2. *Белов В.В., Тарасенков М.В., Пискунов К.П.* Параметрическая модель солнечной дымки в видимой и УФ-области спектра // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 4. С. 294–287.
3. *Белов В.В., Белобородов В.Е., Кабанов Д.М., Огреб С.М., Пискунов К.П., Сакерин С.М., Тарасенков М.В.* О возможности прогноза аэрозольной оптической толщи атмосферы по данным измерений радиометра Cimel CE-318 // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 1. С. 80–86.
4. *Афонин С.В.* Апробация способа восстановления АОТ над сушей по спутниковым измерениям MODIS в ИК-диапазоне спектра // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 8. С. 703–705; *Afonin S.V.* An appraisal of the method of AOD retrieval over land according to MODIS satellite measurements in IR spectral range // Atmos. Ocean. Opt. 2011. V. 24, N 6. P. 584–586.
5. *Юхно П.М., Огреб С.М., Тишанинов М.В.* Статистический синтез гиперспектрального обнаружителя // Автометрия. 2015. Т. 51, № 3. С. 61–69.

S.M. Ogreb, M.V. Tishaninov, P.M. Iukhno. **Some general regularities in object detection on the basis of hyperspectral data.**

Based on the results of statistical synthesis of optimal algorithm of object detection by hyperspectral instruments features of this algorithm are analyzed. The analysis allow us to reveal some general regularities in detection of spatial object from hyperspectral data, which connect amplitude and spectral differences in the radiation from object and from background.