«Оптика атмосферы и океана», **26**, № 8 (2013)

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 004.056:658.562

Сравнительный анализ панхроматического и многоспектрального режимов обнаружения пространственных объектов

А.В. Анищенко, С.М. Огреб, П.М. Юхно*

Федеральное автономное учреждение
«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 17.05.2013 г.

На основе статистического синтеза оптимального обнаружителя пространственных объектов для панхроматического и многоспектрального режимов определены условия, при которых один из этих режимов обеспечивает более высокую вероятность обнаружения пространственных объектов по сравнению с другим.

Ключевые слова: обнаружитель, панхроматический, многоспектральный, функционал правдоподобия, решающее правило, синтез; detector, panchromatic, multi-spectral, likelihood functional, decision rule, synthesis.

Введение

В настоящее время для решения широкого круга задач мониторинга поверхности Земли используются данные в виде изображений, полученных с помощью оптико-электронной аппаратуры воздушного или космического базирования. Расширение областей использования этой информации и повышение уровня доверия к ней достигаются совершенствованием аппаратурных средств и развитием методов обработки или интерпретации результатов дистанционного зондирования. Перспективное направление таких исследований связано с созданием информационных и программных средств фильтрации атмосферных составляющих, присутствующих на изображениях (в литературе этот процесс часто называют атмосферной коррекцией). Результаты, полученные в последние несколько лет в этом направлении, опубликованы в [1–3].

Одной из основных тенденций совершенствования технологии получения самих изображений является гибкое применение панхроматического и многоспектрального режимов регистрации изображений. Различия в режимах съемки и информативности получаемых изображений обсуждаются в [4, 5]. В частности, в работе [4] проведен синтез статистически-оптимального алгоритма обнаружения объекта для случая многоспектрального варианта регистрации применительно к пуассоновской статистике шумовой компоненты наблюдения, обусловленной квантовой природой оптического излучения. На основе анализа параметра обнаружения делается однозначный вывод о безусловных преимуществах многоспектрального режима съемки перед панхроматическим. В то же время в работе [5] формулируются условия, только при выполнении которых многоспектральный режим обеспечивает более высокие характеристики обнаружения объектов по сравнению с панхроматическим.

Изложенное позволяет считать актуальной задачу дальнейшего исследования различных подходов к сравнительному анализу возможностей панхроматического и многоспектрального режимов съемки по обнаружению пространственных объектов. В числе таких подходов важное место занимает подход к сравнительному анализу панхроматического и многоспектрального режимов, основанный на постановке и решении задачи синтеза в рамках теории статистических решений оптимальных многоспектрального и панхроматического обнаружителей пространственных объектов.

Цель статьи – сравнительный анализ возможностей панхроматического и многоспектрального режимов съемки на основе статистического синтеза соответствующих решающих правил по обнаружению пространственных объектов.

Итак, пусть имеется J спектральных диапазонов ($j = 1 \dots J$), $s_j(\mathbf{x})$ – изображение пространственного объекта (сигнал), формируемое в j-м диапазоне, $\mathbf{x} = [x_1, x_2]$ – вектор пространственных координат в плоскости формирования изображений. Пусть измерениям сопутствует аддитивный

* Александр Владимирович Анищенко (saas54@mail.ru); Сергей Митрофанович Огреб (ogreb56@mail.ru); Павел Михайлович Юхно (jukhnopm@mail.ru).

пространственный белый шум $n_j(\mathbf{x})$ со спектральной плотностью N_j в каждом спектральном диапазоне. Для уяснения общих закономерностей многоспектрального обнаружения рассмотрим простой случай обнаружения равнояркого объекта на равнояркой фоне при априори известных форме и местоположении обнаруживаемого объекта, т.е. случай, отличительной особенностью которого является наличие полной информации как о характеристиках объекта, так и о характеристиках фона, в том числе на участке, расположенном под обнаруживаемым объектом.

Если $1(\mathbf{x})$ — единичное поле, определенное во всей области анализа M; $s(\mathbf{x})$ — индикаторная (единичная) функция, принимающая значения, равные единице, на всей области расположения объекта L ($L \subset M$); a_j, f_j — яркость объекта и фона соответственно в j-м спектральном канале, то наблюдаемые сигналы можно представить следующим образом:

$$u_j(\mathbf{x}) = a_j s(\mathbf{x}) + (1(\mathbf{x}) - s(\mathbf{x}))f_j + n_j(\mathbf{x}). \quad (1)$$

Отсюда

$$n_j(\mathbf{x}) = u_j(\mathbf{x}) - 1(\mathbf{x})f_j - s(\mathbf{x})(a_j - f_j), \quad (2)$$

и логарифм функционала правдоподобия для j-го спектрального канала при наличии сигнала примет вид

$$\Pi_{1j} = -(1/2N_j)\int\limits_M (u_j(\mathbf{x}) - 1(\mathbf{x})f_j - s(\mathbf{x})(a_j - f_j))^2 d\mathbf{x}. \quad (3)$$

При отсутствии сигнала логарифм функционала правдоподобия представляется так:

$$\Pi_{0j} = -(1/2N_j)\int\limits_M (u_j(\mathbf{x}) - 1(\mathbf{x})f_j)^2 d\mathbf{x}. \quad (4)$$

С учетом статистической независимости шумов в каждом из спектральных каналов функционал правдоподобия для обнаружителя в целом может быть представлен как произведение функционалов правдоподобия всех спектральных каналов. С учетом этого логарифм отношения правдоподобия будет иметь вид

$$\Lambda = \sum_{j=1}^{J}\left[-(1/2N_j)\int\limits_M (u_j(\mathbf{x}) - 1(\mathbf{x})f_j - s(\mathbf{x})(a_j - f_j))^2 d\mathbf{x} + \right.$$
$$\left. + (1/2N_j)\int\limits_M (u_j(\mathbf{x}) - 1(\mathbf{x})f_j)^2 d\mathbf{x}\right]. \quad (5)$$

После возведения в квадраты и с учетом того, что $s^2(\mathbf{x}) = s(\mathbf{x})$, выражение в квадратных скобках преобразуется к виду

$$\Lambda_j = [(a_j - f_j)/N_j]\left[\int\limits_L u_j(\mathbf{x})d\mathbf{x} - (S/2)(a_j + f_j)\right], \quad (6)$$

где L — область, занимаемая обнаруживаемым объектом; S — площадь этой области. Если спектральная плотность шумов наблюдения одинакова для всех спектральных каналов ($N_j = N$ для всех j) и если ввести обозначение $a_j - f_j = \Delta_j$, то решающее правило обнаружения, вытекающее из (6), приобретает вид

$$\left\{\begin{array}{c} (1/N)\int\limits_L \sum\limits_j (\Delta_j u_j(\mathbf{x}))d\mathbf{x} > \\ > (S/2N)\sum\limits_j (a_j^2 - f_j^2), \text{ гипотеза } H_1, \\ (1/N)\int\limits_L \sum\limits_j (\Delta_j u_j(\mathbf{x}))d\mathbf{x} < \\ < (S/2N)\sum\limits_j (a_j^2 - f_j^2), \text{ гипотеза } H_0. \end{array}\right\} \quad (7)$$

Здесь H_1, H_0 — решения о наличии или отсутствии обнаруживаемого объекта на изображении соответственно.

Для определения характеристик обнаружения необходимо знать закон распределения значений функционала, стоящего в левой части неравенства (7). При наличии объекта $u_j(\mathbf{x}) = a_j s(\mathbf{x}) + n_j(\mathbf{x})$ в области интегрирования L выражение в левой части неравенства (7) принимает вид

$$(1/N)\int\limits_L \sum_j (\Delta_j u_j(\mathbf{x}))d\mathbf{x} =$$
$$= (S/N)\sum_j \Delta_j a_j + (1/N)\sum_j \Delta_j \int\limits_L n_j(\mathbf{x})d\mathbf{x}. \quad (8)$$

Из (8) следует, что функционал, стоящий в левой части этого неравенства, распределен по нормальному закону с математическим ожиданием m_1, определяемым первым членом правой части выражения (9) и дисперсией d^2, определяемой вторым членом. Таким образом,

$$m_1 = (S/N)\sum_j \Delta_j a_j. \quad (9)$$

Обозначим угловыми скобками $\langle\ldots\rangle$ операцию определения математического ожидания на множестве реализаций величин, в них заключенных. Поскольку в силу взаимной некоррелированности шумов различных спектральных диапазонов

$$\left\langle (1/N^2)\int\limits_L n_j(\mathbf{x})d\mathbf{x}\int\limits_L n_j(\mathbf{x})d\mathbf{x}\right\rangle =$$
$$= (1/N)\iint\limits_L \delta(\mathbf{x} - \mathbf{y})d\mathbf{y}d\mathbf{x} = (1/N)\int\limits_L d\mathbf{x} = S/N, \quad (10)$$

то дисперсия d^2, определяемая вторым членом выражения (8), равна

$$d^2 = (S/N)\sum_j \Delta_j^2. \quad (11)$$

Аналогично при отсутствии объекта математическое ожидание функционала, стоящего в левой части неравенства (8), приобретает вид

$$m_0 = (S/N)\sum_j \Delta_j f_j, \quad (12)$$

а его дисперсия определяется также выражением (11). Поделив левые и правые части (7) на d, решающее правило приведем к виду

$$\left|\begin{array}{l} (1/Nd)\displaystyle\int_{N_s}\sum_j(\Delta_j u_j(\mathbf{x}))d\mathbf{x} > \\ > (S/2Nd)\displaystyle\sum_j(a_j^2 - f_j^2),\ \text{гипотеза } H_1, \\ (1/Nd)\displaystyle\int_{N_s}\sum_j(\Delta_j u_j(\mathbf{x}))d\mathbf{x} < \\ < (S/2Nd)\displaystyle\sum_j(a_j^2 - f_j^2),\ \text{гипотеза } H_0. \end{array}\right\} \quad (13)$$

Тогда параметры законов распределения левой части этого неравенства запишутся так:

$$\begin{aligned} m_1 &= \left(S/\left(N\sum_j\Delta_j^2\right)\right)^{1/2}\sum_j\Delta_j a_j, \\ m_0 &= \left(S/\left(N\sum_j\Delta_j^2\right)\right)^{1/2}\sum_j\Delta_j f_j,\ d^2 = 1. \end{aligned} \quad (14)$$

Если под отношением сигнал-шум q понимать отношение разности математических ожиданий сигналов для конкурирующих гипотез к среднеквадратическому значению шума на входе решающего (порогового) устройства, то из (14) следует, что

$$q = \left((S/N)\sum_j\Delta_j^2\right)^{1/2}. \quad (15)$$

По аналогии с (15) обозначим символом q_j отношение сигнал-шум в j-м спектральном канале

$$q_j = \left((S/N)\Delta_j^2\right)^{1/2}. \quad (16)$$

Тогда из (15), (16) следует, что

$$q^2 = \sum_j q_j^2. \quad (17)$$

Сравним характеристики обнаружения объектов многоспектральным и панхроматическим обнаружителями. В случае работы панхроматического обнаружителя в суммарной полосе частот многоспектрального обнаружителя сигналы объекта a_s и фона f_s на выходе его фотоприемного устройства и энергетическое отношение сигнал-шум q_s^2 определяются выражениями:

$$\begin{aligned} a_s &= \sum_j a_j,\ f_s = \sum_j f_j, \\ q_s^2 &= (S/N)\left(\sum_j a_j - \sum_j f_j\right)^2. \end{aligned} \quad (18)$$

Тогда частное энергетических отношений сигнал-шум панхроматического обнаружителя к многоспектральному записывается так:

$$q_s^2/q^2 = \left(\sum_j(a_j - f_j)\right)^2 \Big/ \sum_j(a_j - f_j)^2. \quad (19)$$

Из (19) следует, что вероятность обнаружения объекта панхроматическим обнаружителем будет выше по отношению к многоспектральному тогда, когда выполняется неравенство

$$\left(\sum_j(a_j - f_j)\right)^2 > \sum_j(a_j - f_j)^2 \quad (20)$$

или эквивалентное ему неравенство

$$\sum_{k,j(k\neq j)}(a_k - f_k)(a_j - f_j) > 0. \quad (21)$$

Это условие выполняется, в частности, тогда, когда во всех спектральных диапазонах выполняется условие $a_j > f_j$ либо $f_j > a_j$. Однако если в части спектральных каналов выполняется условие $a_j > f_j$, в то время как в остальных каналах выполняется противоположное условие $f_j > a_j$, то вероятность обнаружения объекта панхроматическим обнаружителем может быть как выше, так и ниже по отношению к многоспектральному. Так, если в каждом канале J-канального многоспектрального обнаружителя сигналы объекта и фона одинаковы, т.е. $a_j = 0$, $f_j = f$, то из (15), (18) следует, что

$$q^2 = SJ(a - f)^2/N,\ q_s^2 = J^2(a - f)^2 S/N. \quad (22)$$

И теперь вполне очевидно, что $q_s^2/q^2 = J$, т.е. энергетическое отношение сигнал-шум панхроматического обнаружителя в этом случае в J раз превышает такое же отношение для многоспектрального обнаружителя с J спектральными каналами. На физическом уровне это объясняется тем, что в каждом канале многоспектрального обнаружителя присутствует свой шум, вследствие чего эквивалентная спектральная плотность шумов в многоканальном обнаружителе при прочих равных условиях в J раз превышает спектральную плотность шумов панхроматического обнаружителя.

В случае обнаружения неравнояркого объекта на неравноярком (распятненном) фоне выражение (2) приобретает вид

$$u_j(\mathbf{x}) = 1(\mathbf{x})s_j(\mathbf{x}) + f_j(\mathbf{x}) - 1(\mathbf{x})f_j(\mathbf{x}) + n_j(\mathbf{x}),\ \ \mathbf{x} \subset M. \quad (23)$$

Причем в этом выражении $1(\mathbf{x})$ — функция, принимающая значение 1 в области расположения объекта L, и 0 всюду за пределами этой области. Тогда решающее правило (8) примет вид

$$\left.\begin{cases} (1/N)\sum_j \int_L u_j(\mathbf{x})(s_j(\mathbf{x}) - f_j(\mathbf{x}))d\mathbf{x} > \\ > (1/2N)\sum_j \int_L (s_j^2(\mathbf{x}) - f_j^2(\mathbf{x}))\,d\mathbf{x}, \text{ гипотеза } H_1, \\ (1/N)\sum_j \int_L u_j(\mathbf{x})(s_j(\mathbf{x}) - f_j(\mathbf{x}))d\mathbf{x} < \\ < (1/2N)\sum_j \int_L (s_j^2(\mathbf{x}) - f_j^2(\mathbf{x}))d\mathbf{x}, \text{ гипотеза } H_0. \end{cases}\right\} \quad (24)$$

Выражение в левой части неравенства (24) распределено по нормальному закону с математическим ожиданием m_1 при наличии объекта и m_0 в его отсутствие:

$$m_1 = (1/N)\sum_j \int_L s_j(\mathbf{x})(s_j(\mathbf{x}) - f_j(\mathbf{x}))d\mathbf{x},$$
$$m_0 = (1/N)\sum_j \int_L f_j(\mathbf{x})(s_j(\mathbf{x}) - f_j(\mathbf{x}))d\mathbf{x}. \quad (25)$$

Дисперсия d^2 левой части неравенства (24) определяется выражением

$$d^2 = (1/N)\sum_j \int_L (s_j(\mathbf{x}) - f_j(\mathbf{x}))^2 d\mathbf{x}. \quad (26)$$

Как нетрудно убедиться, использование выражений (24)–(26) для вывода соотношений, аналогичных (20), (21), приводит к результатам, не изменяющим сформулированных выше выводов, касающихся сравнения характеристик обнаружения объектов в панхроматическом и многоспектральном режимах.

Рассмотрим в качестве примера обнаружитель, имеющий 4 спектральных диапазона. Пусть сигнал фона в каждом из каналов обнаружителя в соответствующих единицах измерений равен 1 и отношение S/N также равно 1. Пусть кроме того амплитуда сигналов a_j обнаруживаемого объекта в каждом из каналов определяется значениями, приведенными в таблице.

Примеры определения отношения сигнал-шум

№ варианта	a_j				q	q_s	q_s/q
	1	2	3	4			
1	0,5	0,5	0,5	0,5	1	2	2
2	2	0,5	0,5	0,5	1,32	0,5	0,38
3	2	2	0,5	0,5	1,58	1	0,63
4	2	2	2	0,5	1,8	2,5	1,39
5	2	2	2	2	2	4	2

Второй, третий и четвертый варианты данных таблицы соответствуют случаю, когда неравенство (21) не выполняется. Результаты, соответствующие этим вариантам и приведенные в последнем столбце таблицы, подтверждают, что при невыполнении неравенства (21) отношение сигнал-шум, а значит, и вероятность обнаружения объекта панхроматическим обнаружителем могут быть как выше, так и ниже по отношению к таким же показателям для многоспектрального обнаружителя.

Использование матричных фотоприемных устройств и цифровых методов обработки изображений определяет целесообразность рассмотрения алгоритмов обнаружения в дискретном варианте. Для этого представим двухмерный массив отсчетов каждого изображения размерности $k \times l$ в виде вектора размерности $I = k \times l$, полученного путем «прочтения» этого массива в каком-либо порядке (например, последовательно по столбцам, по строкам или другим заранее оговоренным способом). В результате такого прочтения сформируем соответствующий вектор $U = [u_i]$, где $i = 1, 2 \dots I$. Пусть также сигнал на выходе каждого элемента изображения (далее — пикселя) представляет собой аддитивную смесь детерминированных s_i или f_i и случайной n_i компонент

$$u_i = \begin{cases} s_i + n_i, & \text{гипотеза } H_1, \\ f_i + n_i, & \text{гипотеза } H_0. \end{cases} \quad (27)$$

Поскольку шумовые компоненты рассматриваются как статистически независимые, многомерные плотности распределения вероятностей для всего изображения будут определяться следующими выражениями:

$$w(U/H_1) = \prod_{i=1}^{I} w(u_i/H_1) =$$
$$= \prod_{i=1}^{I} \left(1/\sqrt{2\pi d_i}\right)\exp\left(-(u_i - s_i)^2/2d_i^2\right), \quad (28)$$

$$w(U/H_0) = \prod_{i=1}^{I} w(u_i/H_0) =$$
$$= \prod_{i=1}^{I} \left(1/\sqrt{2\pi d_i}\right)\exp\left(-(u_i - f_i)^2/2d_i^2\right). \quad (29)$$

Если матричный фотоприемник имеет J спектральных каналов, то в многоспектральном режиме съемки производится одновременная регистрация излучения во всех J каналах. Причем сигналы на выходе элементов фотоприемной матрицы описываются следующим образом:

$$u_{i,j} = \begin{cases} s_{i,j} + n_{i,j}, & \text{гипотеза } H_1, \\ f_{i,j} + n_{i,j}, & \text{гипотеза } H_0, \end{cases} \quad (30)$$

где $u_{i,j}$, $s_{i,j}$, $f_{i,j}$, $n_{i,j}$ — сигналы на выходе i-го элемента изображения в j-м спектральном канале.

В панхроматическом режиме каждый фотоприемник принимает излучение одновременно в J спектральных каналах, т.е.

$$u_i^p = \begin{cases} s_i^p + n_i, & \text{гипотеза } H_1, \\ f_i^p + n_i, & \text{гипотеза } H_0, \end{cases} \quad (31)$$

где

$$s_i^p = \sum_j^J s_{i,j}; \quad f_i^p = \sum_j^J f_{i,j}.$$

Кроме того, размерность изображения, подлежащего обработке, зависит от режима съемки. Для панхроматического режима размер изображения определяется числом фотоприемников в одиночной фотоприемной матрице и равен I, тогда как для многоспектрального режима производится регистрация одновременно J матрицами, каждая из которых имеет размерность I.

Проведем синтез оптимального (в смысле критерия максимального правдоподобия) решающего правила в предположении, что все элементарные фотоприемники порождают аддитивный шум с одинаковой дисперсией d.

Для случая панхроматического режима решающее правило, следующее из логарифма отношения правдоподобия [6], будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} L_p = \sum_i^I u_i^p\left(s_i^p - f_i^p\right) \geq (1/2)\sum_i^I\left(\left(s_i^p\right)^2 - \left(f_i^p\right)^2\right) = L_{0p}, \\ \text{гипотеза } H_1, \\ L_p = \sum_i^I u_i^p\left(s_i^p - f_i^p\right) < (1/2)\sum_i^I\left(\left(s_i^p\right)^2 - \left(f_i^p\right)^2\right) = L_{0p}, \\ \text{гипотеза } H_0. \end{cases} \tag{32}$$

А параметры нормального закона распределения L_p, т.е. левой части неравенства (32), запишутся так:

$$m_{1p} = \sum_i^I s_i^p(s_i^p - f_i^p), \quad m_{0p} = \sum_i^I f_i^p(s_i^p - f_i^p),$$
$$d_{0p}^2 = d_{1p}^2 = d^2\sum_i^I(s_i^p - f_i^p)^2. \tag{33}$$

Для многоспектрального режима решающее правило будет иметь вид

$$\begin{cases} L_m = \sum_i^I\sum_j^J u_{i,j}(s_{i,j} - f_{i,j}) \geq \\ \geq (1/2)\sum_i^I\sum_j^J(s_{i,j}^2 - f_{i,j}^2) = L_{0m}, \text{ гипотеза } H_1, \\ L_m = \sum_i^I\sum_j^J u_{i,j}(s_{i,j} - f_{i,j}) < \\ < (1/2)\sum_i^I\sum_j^J(s_{i,j}^2 - f_{i,j}^2) = L_{0m}, \text{ гипотеза } H_0, \end{cases} \tag{34}$$

а параметры закона распределения L_m запишутся

$$m_1 = \sum_i^I\sum_j^J s_{i,j}(s_{i,j} - f_{i,j}), \quad m_0 = \sum_i^I\sum_j^J f_{i,j}(s_{i,j} - f_{i,j}),$$
$$d_1^2 = d_0^2 = \sigma^2\sum_i^I\sum_j^J(s_{i,j} - f_{i,j})^2. \tag{35}$$

Вероятность правильного обнаружения P_0 для обоих режимов обусловливается вероятностью преодоления нормальными случайными величинами L_p, L_m с определенными выше параметрами соответствующих порогов L_{0p}, L_{0m}, определяемых правыми частями выражений (32) и (34):

$$P_0 = \int_{L_0}^{\infty} w(L/H_1)dL =$$
$$= (1/d_1\sqrt{2\pi})\int_{L_0}^{\infty}\exp\left(-(L - m_{H_1})^2/2d_1^2\right)dL =$$
$$= (1/\sqrt{2\pi})\int_q^{\infty}\exp(-t^2/2)dt, \tag{36}$$

где $q = -(L_0 - m_1)/d_1$. Для панхроматического режима получим

$$q_p = (1/2d)\left(\sum_i^I\left(\sum_j^J\Delta_{i,j}\right)^2\right)^{1/2} =$$
$$= (1/2d)\left(\sum_i^I\left(\sum_j^J\Delta_{i,j}^2 + 2\sum_j^{J-1}\Delta_{i,j}\sum_{j=i+1}^J\Delta_{i,j}\right)\right)^{1/2}. \tag{37}$$

Здесь $\Delta_{i,j} = s_{i,j} - f_{i,j}$. Для случая обнаружения равнояркого объекта на равномерном фоне

$$q_p = (\Delta_{sf}^p/2d)\sqrt{I}, \tag{38}$$

где $\Delta_{sf}^p = s_i^p - f_i^p$ — интегральный по спектру абсолютный контраст.

Для многоспектрального режима

$$q_m = (1/2d)\left(\left(\sum_i^I\sum_j^J(s_{i,j} - f_{i,j})^2\right)\right)^{1/2} =$$
$$= (1/2d)\left(\sum_i^I\left(\sum_j^J\Delta_{i,j}^2\right)\right)^{1/2}. \tag{39}$$

А в случае равномерно по пространству окрашенного объекта и фона в каждом спектральном диапазоне, т.е. когда $\Delta_{i,j} = \Delta_j$ для всех i, получим

$$q_m = \left(I\sum_j^J q_j^2\right)^{1/2}, \quad q_j = \Delta j/2d, \tag{40}$$

где q_j — отношение сигнал-шум на выходе единичного фотоприемника в j-м спектральном канале.

Сравнение выражений (37) и (39), соответствующих панхроматическому и многоспектральному режимам, показывает, что выражение (37) содержит под корнем дополнительный член $2\sum_{j}^{J-1}\Delta_{i,j}\sum_{j=i+1}^{J}\Delta_{i,j}$, который может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Анализ этого члена подтверждает сформулированные выше положения об условиях, определяющих преимущества панхроматического или многоспектрального режимов при решении задач обнаружения пространственных объектов.

Таким образом, представленные выше результаты позволяют сделать следующие выводы.

Преимущества панхроматического или многоспектрального режимов съемки при обнаружении пространственных объектов определяются разностью энергетических характеристик излучений объекта и фона, фиксируемой отдельно в каждом из имеющихся спектральных каналов. Причем панхроматический режим обеспечивает более высокую вероятность обнаружения по сравнению с многоспектральным, если во всех спектральных каналах эта разность имеет один и тот же знак, т.е. принимает или положительные, или отрицательные значения.

В работе получена формальная запись условий, позволяющих определить в каждом конкретном случае преимущество одного из этих режимов.

1. *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. 294–297.
2. *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.
3. *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.
4. *Иванкин Е.Ф., Понькин В.А.* Теоретические основы защиты информации об объектах наблюдения. М.: Горячая линия-Телеком, 2008. 448 с.
5. *Иванов В.П., Курт В.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л.* Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. Казань: Издательство НПО ГИПО, 2006. 595 с.
6. *Ван Трис Г.* Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 1. М.: Сов. радио, 1972. 744 с.

A.V. Anyshchenko, S.M. Ogreb, P.M. Jukhno. **Comparative analysis of panchromatic and multi-spectral modes of the detector of spatial objects.**

The conditions for obtaining higher detection probability of spatial objects by either panchromatic or multi-spectral detector have been determined using statistically synthesized model of optimal detector.