

УДК 004.932.2, 517.968, 681.7.014.3

КРИТЕРИЙ И АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА НА СЛОЖНОМ ФОНЕ ПО ТОЧЕЧНОМУ СЛАБОКОНТРАСТНОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ

А. Н. Катулев¹, А. А. Храмичев¹, О. Б. Гузенко²

¹Научно-исследовательский центр

Центрального научно-исследовательского института войск ВКО Минобороны России,
170026, г. Тверь, Набережная Афанасия Никитина, 32

²Военно-научный комитет Вооружённых Сил Российской Федерации,
111399, Москва, просп. Вернадского, 100

E-mail: nicpvotver@mail.ru

Предложены критерий и алгоритм обнаружения динамических объектов (ДО) в условиях сложного фона, формируемого интенсивной кучевой и высотно-кучевой облачностью. Изображение объекта малоразмерное (точечное) слабоконтрастное. Принцип обнаружения ДО фрактально-корреляционный, основан на использовании выборки в виде отношения функций правдоподобия близких альтернативных ситуаций: «в зоне обзора оптико-электронного прибора (ОЭП) только сложный фон» либо «в зоне обзора ОЭП на сложном фоне ДО». Алгоритм обнаружения ДО построен как бинарный накопитель по локальному наиболее мощному критерию. Критическая граница принятия решения определяется по лемме Неймана — Пирсона для допустимой вероятности ложного обнаружения ДО. Моделированием установлена достаточно высокая эффективность алгоритма.

Ключевые слова: точечное изображение, слабый контраст, сложный фон, близкие ситуации, критерий обнаружения ДО.

Введение. При нахождении динамического объекта (ДО) в зоне контроля оптико-электронного прибора (ОЭП) конфигурация его изображения будет зависеть от расстояния ОЭП — ДО и состояния атмосферы и фона, на котором осуществляется обнаружение ДО. Изображение может быть точечным или протяжённым.

Рассматривается случай точечного слабоконтрастного изображения.

Динамический объект в виде точечного изображения по определению имеет место, когда угловой размер его меньше мгновенного поля зрения ОЭП. Однако, как установлено экспериментально [1], в условиях $H_{k=2}$ в зоне обзора ОЭП находится ДО на сложном фоне или $H_{k=1}$ в зоне обзора ОЭП — только сложный фон; наиболее вероятными являются случаи, в которых точечное изображение ДО занимает от 7×7 до 10×10 пикселей фотоприёмной матрицы ОЭП и интерпретируется коротким пространственным импульсом с фрактальной структурой (рис. 1, 2).

Также экспериментально установлено [1], что от кучевых и высотно-кучевых малоразмерных облаков в ситуации $H_{k=1}$ возникают целеподобные импульсы.

Названные импульсы — случайные, они могут иметь различные структуры: пространственную квазипрямоугольную, квазимеандровую, квазителеграфную.

Моделированием на основе экспериментальных данных выявлены информационные параметры изображений ДО и фонов: фрактальная размерность d и максимальное собственное значение λ_{\max} пространственной корреляционной матрицы, а также их гистограммы для ситуаций $H_{k=1}$ и $H_{k=2}$ (рис. 3). Гистограммы сосредоточены на конечных интервалах в положительной области, значительно перекрываются, им свойственны унимодальность и асимметрия. Отношение их значений при любой выборке близко к одному и тому же значению: изображение одиночного ДО слабоконтрастное, ситуации $H_{k=1}$ и

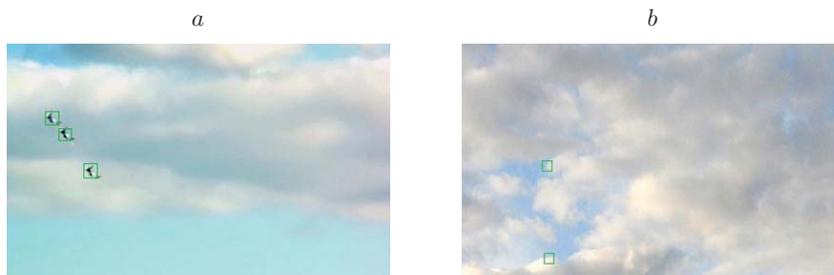


Рис. 1. Исходные фоноцелевые кадры: с малоразмерными слабоконтрастными изображениями ДО в ситуации H_2 (a), с изображением сложного фона в ситуации H_1 (b)

$H_{k=2}$ близкие. Гистограмма для λ_{\max} при ситуации $H_{k=2}$ левосторонняя относительно гистограммы λ_{\max} при ситуации $H_{k=1}$, а для d — правосторонняя в аналогичных условиях. Гистограммы суть функции правдоподобия, их целесообразно аппроксимировать бета-распределениями с соответствующими параметрами (рис. 4): для максимального собственного значения параметры $\beta_{k=2,\lambda} = \beta_{k=1,\lambda} - \Delta_{\beta,\lambda}$ и $\alpha_{k=2,\lambda} \simeq \alpha_{k=1,\lambda}$, а для фрактальной размерности $\beta_{k=2,d} \simeq \beta_{k=1,d}$, $\alpha_{k=2,d} = \alpha_{k=1,d} + \Delta_{\alpha,d}$. Здесь $\Delta_{\beta,\lambda}$, $\Delta_{\alpha,d}$ — малые положительные величины, оценены моделированием; формально их можно определить с использованием [2] и методов [3, гл. 2] из выражений

$$\alpha_{2d} = \frac{(M_{11}[d] + \delta_{x=d})(\beta_1 + \Delta_{\beta})}{1 - (M_{11}[d] + \delta_{x=d})}, \quad (1a)$$

$$\beta_{2\lambda} = \frac{1 - M_{11}[\lambda_{\max}] + \delta_{x=\lambda_{\max}}}{M_{12}[\lambda_{\max}]} \times$$

$$\times [(M_{11}[\lambda_{\max}] - \delta_{x=\lambda_{\max}})(1 - (M_{11}[\lambda_{\max}] - \delta_{x=\lambda_{\max}})) - M_{12}[\lambda_{\max}]]. \quad (16)$$

Действительно, пренебрегая малыми второго и третьего порядка, из (1) получаем

$$\Delta_{\beta,\lambda} = \frac{1 - M_{11}^2[\lambda_{\max}] - M_{21}[\lambda_{\max}]}{M_{21}[\lambda_{\max}]} \delta_{x=\lambda_{\max}}, \quad \Delta_{\alpha,d} = \frac{\delta_{x=d}\beta_1 + M_{11}[d]\Delta_{\beta}}{1 - (M_{11}[d] + \delta_{x=d})},$$

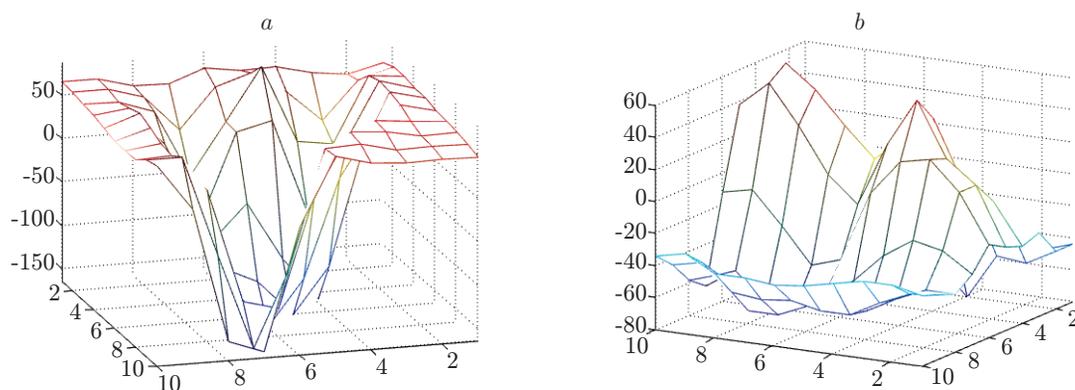


Рис. 2. Распределения яркостей в окне 10×10 пикселей фоноцелевого кадра: со слабоконтрастным изображением ДО для ситуации H_2 (a), с изображением фона для ситуации H_1 (b)

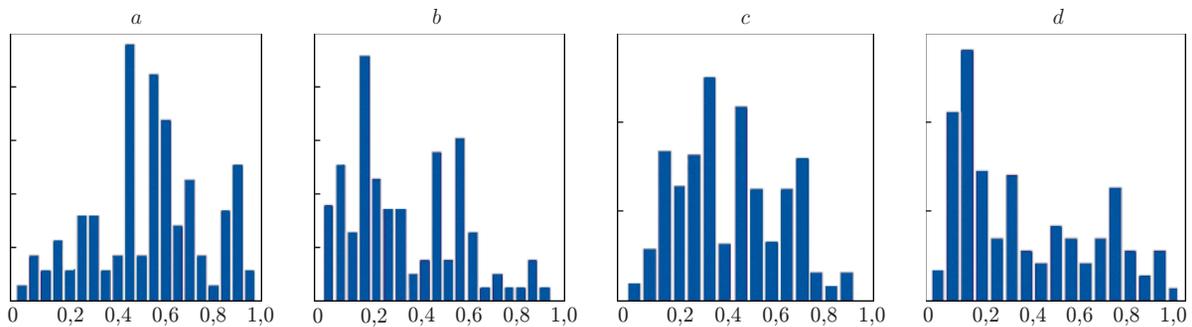


Рис. 3. Гистограммы: фрактальной размерности изображения в окне фоноцелевого кадра для ситуаций H_2 (a), H_1 (b) и максимального собственного значения корреляционной матрицы того же изображения для ситуаций H_2 (c), H_1 (d)

где δ_x — параметр близости первого момента бета-распределений случайной величины λ_{\max} , приведённой к интервалу $0 \leq x = \lambda_{\max} \leq 1$, или случайной величины d , также приведённой к интервалу $0 \leq x = d \leq 1$, при ситуациях $H_{k=2}$ и $H_{k=1}$; M_{11} — первый момент, M_{12} — центральный второй момент при ситуации H_1 , их количественные значения оценены по реальным ситуациям моделированием (см. рис. 4). Очевиден вывод: первые моменты для рассматриваемых ситуаций $H_{k=1}$ и $H_{k=2}$ отличаются на малую величину δ_x , а вторые — практически равны, и, как следствие, значения параметров β_2 и α_2 отличаются в соответствии с (1) на малые величины Δ_β , Δ_α от параметров β_1 и α_1 .

Из близости гистограмм, или функций правдоподобия ситуаций, следует, что достоверное обнаружение ДО в сложных условиях возможно только с использованием локально наиболее мощных критериев, т. е. с использованием статистики в виде эффективного информационного вклада для x . Известными методами [4–6], непосредственно относящимися к проблематике обнаружения точечных объектов, задача эффективного обнаружения ДО в сложных фоновых условиях (при близких ситуациях) по существу неразрешима.

Итак, возникает актуальная научно-техническая задача разработки фрактально-корреляционного метода обнаружения ДО по малоразмерному слабоконтрастному изображению при наличии в поле зрения ОЭП малоразмерных облаков, образующих целеподобные точечные изображения.

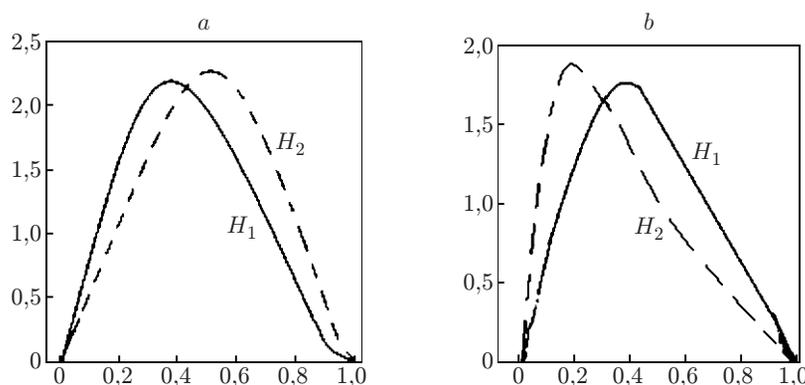


Рис. 4. Бета-распределения: a — параметры для H_1 : $\beta_{1d} = 3,7$, $\alpha_{1d} = 2,9$, $M_{11} = 0,42$, $M_{12} = 0,03$, для H_2 : $\beta_{2d} = 3,7$, $\alpha_{2d} = 3,2$, $M_{21} = 0,47$, $M_{22} = 0,03$; b — параметры для H_1 : $\beta_{1\lambda} = 2,5$, $\alpha_{1\lambda} = 2,25$, $M_{11} = 0,47$, $M_{12} = 0,043$, для H_2 : $\beta_{2\lambda} = 2,6$, $\alpha_{2\lambda} = 2,25$, $M_{21} = 0,46$, $M_{22} = 0,043$

Цель данной работы — обоснование критерия обнаружения ДО и оценка вероятностных характеристик фрактально-корреляционного алгоритма обнаружения ДО по информации, содержащейся в малоразмерных точечных слабоконтрастных изображениях, формируемых ОЭП в сложных фоноцелевых условиях. Обнаружение ДО должно осуществляться без использования априорной информации относительно текущего состояния и параметров контролируемой фоноцелевой обстановки при допустимой вероятности принятия ложного решения об обнаружении ДО.

Критерий обнаружения динамического объекта. Структуру критерия обнаружения ДО, как следует из изложенного, синтезируем с использованием отношения близких функций правдоподобия $H_{k=1}$ и $H_{k=2}$ векторной выборки со статистически независимыми компонентами: d_{ν_i} — фрактальной размерностью и $\lambda_{\max \nu_i}$ — максимальным собственным значением пространственной корреляционной матрицы, т. е. с помощью выражения (для любого ν_i -го окна на i -м фоноцелевом кадре)

$$\Lambda(\lambda, d) = \frac{p_1(\lambda_{\max \nu_i} | \beta_1, \lambda - \Delta_{\beta, \lambda}, \alpha_2, H_1)}{p_1(\lambda_{\max \nu_i} | \beta_1, \alpha_1, H_1)} \frac{p_1(d_{\nu_i} | \beta_2, \alpha_1, d + \Delta_{\alpha, d}, H_1)}{p_1(d_{\nu_i} | \beta_1, \alpha_1, H_1)},$$

из которого имеем выражения информационных вкладов [7] как производные логарифма правдоподобий

$$\Lambda(\lambda_{\max \nu_i}, \beta) = \frac{(\partial/\partial\beta)p_1(\lambda_{\max \nu_i} | \beta, \alpha; H_1)}{p_1(\lambda_{\max \nu_i} | \beta, \alpha; H_1)} \Delta_{\beta, \lambda}; \tag{2}$$

$$\Lambda(d, \alpha(\beta)) = \frac{(\partial/\partial\alpha)p_1(d_{\nu_i} | \beta, \alpha(\beta); H_1)}{p_1(d_{\nu_i} | \beta, \alpha(\beta); H_1)} \frac{d\alpha}{d\beta}$$

для $\lambda_{\max \nu_i}$ и d_{ν_i} соответственно. При этом критерий обнаружения ДО становится [7] локальным наиболее мощным по отношению к близкой ситуации $H_{k=2}$ и записывается в виде $\Lambda(\cdot) \geq \rho$, где $\rho = \rho_d, \rho_\lambda$ — пороговый уровень обнаружения ДО по выборкам $d_{\nu_i}, \lambda_{\max \nu_i}$ (принцип расчёта ρ изложен далее).

В выражении (2) $p_1(\cdot | \beta, \alpha; H_1)$ — плотность бета-распределения, которая в обобщённой форме, т. е. для интервалов $\mu_{k0} \leq x \leq \mu_{k1}$ ($\mu_{k0} = \mu_{k0d}, \mu_{k0\lambda_{\max}}$; $\mu_{k1} = \mu_{k1d}, \mu_{k1\lambda_{\max}}$) значений случайной величины x ($x = \lambda_{\max}, x = d$), записывается в виде [2]

$$p_1(x | \beta_1, \alpha_1, H_1) = \frac{1}{\mu_{11} - \mu_{10}} \frac{\Gamma(\beta_1 + \alpha_1)}{\Gamma(\beta_1)\Gamma(\alpha_1)} \left(\frac{x - \mu_{10}}{\mu_{11} - \mu_{10}} \right)^{\beta_1 - 1} \left(1 - \frac{x - \mu_{10}}{\mu_{11} - \mu_{10}} \right)^{\alpha_1 - 1},$$

$$p_1(x | \beta_1, \alpha_1, H_1) = 0 \quad \text{в противном случае,}$$

где $\Gamma(\cdot)$ — гамма-функция, а в интервале $0 \leq x \leq 1$ та же плотность записывается при $\mu_{11} = 1, \mu_{10} = 0$.

Информационные вклады (2) несложным преобразованием сводятся к виду нелинейных форм от получаемых выборок в каждом ν_i -м окне i -го фоноцелевого кадра, или к виду статистик обнаружения ДО. Пусть для выборки фрактальной размерности выражение такой формы (статистики) непосредственно выводится из второго выражения (2):

$$\Lambda(d, \alpha(\beta)) = \frac{\partial}{\partial\alpha} \frac{p_1(d_{\nu_i} | \beta, \alpha(\beta); H_1)}{p_1(d_{\nu_i} | \beta, \alpha(\beta); H_1)} \frac{d\alpha}{d\beta} =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\frac{\partial}{\partial \alpha_1} \frac{\Gamma(\beta_1 + \alpha_1)}{\Gamma(\beta_1)\Gamma(\alpha_1)} \left(\frac{d_{\nu_i} - \mu_{20}}{\mu_{21} - \mu_{20}}\right)^{\beta_1 - 1} \left(1 - \frac{d_{\nu_i} - \mu_{20}}{\mu_{21} - \mu_{20}}\right)^{\alpha_1 - 1}}{\frac{\Gamma(\beta_1 + \alpha_1)}{\Gamma(\beta_1)\Gamma(\alpha_1)} \left(\frac{d_{\nu_i} - \mu_{10}}{\mu_{11} - \mu_{10}}\right)^{\beta_1 - 1} \left(1 - \frac{d_{\nu_i} - \mu_{10}}{\mu_{11} - \mu_{10}}\right)^{\alpha_1 - 1}} \frac{d\alpha_1}{d\beta_1} = \\
&= \frac{\partial}{\partial \alpha_1} \ln \left[\frac{\Gamma(\beta_1 + \alpha_1)}{\Gamma(\beta_1)\Gamma(\alpha_1)} \left(\frac{d_{\nu_i} - \mu_{10}}{\mu_{11} - \mu_{10}}\right)^{\beta_1 - 1} \left(1 - \frac{d_{\nu_i} - \mu_{10}}{\mu_{11} - \mu_{10}}\right)^{\alpha_1 - 1} \right] \frac{d\alpha_1}{d\beta_1} = \\
&= \left[\frac{\partial}{\partial \alpha_1} \ln \Gamma(\beta_1 + \alpha_1) - \frac{\partial}{\partial \alpha_1} \ln \Gamma(\alpha_1) + \ln(\mu_{11} - d_{\nu_i}) - \ln(\mu_{11} - \mu_{10}) \right] \frac{d\alpha_1}{d\beta_1}.
\end{aligned}$$

Из полученного выражения для $\Lambda(d, \alpha(\beta))$ — эффективного информационного вклада — следует искомая статистика $\ln(\mu_{11} - d_{\nu_i})$ (нелинейная форма), и критерий $\Lambda(\cdot) \geq \rho$ формируется как критерий Неймана — Пирсона обнаружения ДО в ν_i -м окне i -го фоноцелевого кадра:

$$\begin{aligned}
\ln(\mu_{11} - d_{\nu_i}) &\geq -\frac{\partial}{\partial \alpha_1} \ln \Gamma(\beta_1 + \alpha_1) + \frac{\partial}{\partial \alpha_1} \ln \Gamma(\alpha_1) + \\
&+ \ln(\mu_{11} - \mu_{10}) + \frac{\rho d}{(d\alpha_1)/(d\beta_1)} \rightarrow h_{\nu_i d} = 1, \quad \frac{\partial \alpha_1}{\partial \beta_1} = \frac{M_{11}[d]}{1 - M_{11}[d]}, \quad (3)
\end{aligned}$$

где ρd — пороговая константа компонент порога $\Pi(\alpha_{\text{доп}}; d_{\nu_i})$, определяемого по выражению

$$\int_{\Pi(\alpha_{\text{доп}}, d_{\nu_i})}^{\mu_{11}} P(\ln(\mu_{11} - d_{\nu_i}) | H_1) d(\ln(\mu_{11} - d_{\nu_i})) \leq \alpha_{\text{доп}, d}, \quad (4)$$

$$\Pi(\alpha_{\text{доп}}; d_{\nu_i}) = \frac{\partial}{\partial \alpha_1} \ln \Gamma(\beta_1 + \alpha_1) - \frac{\partial}{\partial \alpha_1} \ln \Gamma(\alpha_1) + \ln(\mu_{11} - \mu_{10}) + \frac{\rho d}{(d\alpha_1)/(d\beta_1)}$$

для допустимой вероятности $\alpha_{\text{доп}}$ — ложного обнаружения ДО на i -м фоноцелевом изображении;

$$\frac{\partial \Gamma(\beta_1 + \alpha_1)}{\partial \alpha_1} = \frac{\partial}{\partial \alpha_1} \int_0^1 (\ln(1/t))^{\beta_1 + \alpha_1} dt, \quad \frac{\partial \Gamma(\alpha_1)}{\partial \alpha_1} = \frac{\partial}{\partial \alpha_1} \int_0^1 (\ln(1/t))^{\alpha_1} dt.$$

При невыполнении правила (3) принимается решение о том, что ДО не обнаружен ($h_{\nu_i} = 0$).

Отметим, что $h_{\nu_i d} = 0$ и $h_{\nu_i d} = 1$ — результаты бинарного квантования статистики $\ln(\mu_{11} - d_{\nu_i})$ при пороговом уровне $\Pi(\alpha_{\text{доп}}; d_{\nu_i})$. Расчётное выражение для плотности $P(\ln(\mu_{11} - d_{\nu_i}) | H_1)$ в (4) записывается по общему правилу [8, гл. 22]

$$p(y | H_1) = f(\varphi^{-1}(y) | H_1) |(\varphi^{-1}(y))'_y|,$$

где $y = \ln(\mu_{11} - d_{\nu_i}) = \varphi(d_{\nu_i})$, $f(\varphi^{-1}(y) | H_1)$ — бета-распределение, $\varphi^{-1}(y) = e^y$, $(\varphi^{-1}(y))'_y = e^y$, и принимает вид

$$p(y | H_1) = \frac{1}{\mu_{11} - \mu_{10}} \frac{\Gamma(\beta_1 + \alpha_1)}{\Gamma(\beta_1)\Gamma(\alpha_1)} \left(\frac{e^y - \mu_{10}}{\mu_{11} - \mu_{10}} \right)^{\beta_1 - 1} \left(1 - \frac{e^y - \mu_{10}}{\mu_{11} - \mu_{10}} \right)^{\alpha_1 - 1} e^y.$$

При этом вычисление искомого порога $\Pi(\alpha_{\text{доп}}; d_{\nu_i})$ оказывается проще выполнить на единичном интервале значений d_{ν_i} , $\lambda_{\max \nu_i}$. Так, порог принятия решения о возможном нахождении ДО в зоне обзора ОЭП по выборке $y = \ln(1 - d_{\nu_i})$ определяется (с учётом $-\infty \leq y \leq 0$, $\mu_{10} = 0$, $\mu_{11} = 1$) по выражению

$$\frac{\Gamma(\beta_1 + \alpha_1)}{\Gamma(\beta_1)\Gamma(\alpha_1)} \int_{\Pi(\alpha_{\text{доп}}, d)}^{\infty} \exp\{-y\beta_1\}(1 - \exp\{-y\})^{\alpha_1 - 1} dy \leq \alpha_{\text{доп}, d}. \quad (4a)$$

Это выражение достаточно просто реализуется на ПЭВМ. При $\alpha_{\text{доп}, d} = 0,3$, $\beta_1 = 3,7$, $\alpha_1 = 2,9$ получаем $\Pi(\alpha_{\text{доп}}; d_{\nu_i}) = 0,65$ (рис. 5 и 6). По найденному $\Pi(\alpha_{\text{доп}}; d_{\nu_i})$ и выражению для него в (4) можно вычислить (при необходимости) и значение пороговой константы ρ_d .

Аналогичным образом формируется правило принятия решения об обнаружении ДО на i -м фоноцелевом изображении ОЭП по статистике максимального собственного значения. Такое правило является непосредственным результатом преобразования первого соотношения в (2) и записывается в виде

$$\ln(\mu_{11} - \lambda_{\max \nu_i}) \geq \Pi(\alpha_{\text{доп}}; \lambda_{\max}) \rightarrow h_{\nu_i \lambda} = 1, \quad (5)$$

пороговый уровень в котором устанавливается по выражению, аналогичному (4a).

Теперь на основе результатов (3) и (5) сформируем искомую структуру критерия обнаружения ДО в зоне обзора ОЭП. Для этого предварительно отметим, что результаты бинарного квантования статистик $\ln(\mu_{11} - d_{\nu_i})$ и $\ln(\mu_{11} - \lambda_{\max \nu_i})$ (считаем $\mu_{11} = 1$), обусловленные целеподобными изображениями от малоразмерных облаков, объективно могут иметь место равновероятно при любом их сочетании ($h_{\nu_i d} h_{\nu_i \lambda} = 10, 01, 00, 11$) в любых положениях ν_i -го окна на i -м фоноцелевом кадре и между такими результатами нет закономерности. Однако результаты квантования при условии нахождения ДО в зоне обзора ОЭП могут быть, как установлено моделированием, в определённых положениях ν_i -го окна на i -м фоноцелевом кадре и представляться сочетанием (11) либо сочетанием (00) из-за сложности фона. Сочетания же (10) и (01) — события редкие и не образуют повторную выборку в последовательности фоноцелевых кадров. В связи с априорной неопределённостью ситуации их порождения такие сочетания преобразуем в сочетание (00). Сочетания $h_{\nu_i d} h_{\nu_i \lambda} = 10, 01, 00, 11$ альтернативны в ν_i -м окне на i -м фоноцелевом кадре. Поэтому критерий обнаружения ДО (в ν_i -м окне i -го фоноцелевого кадра) целесообразно основывать на логике «два из двух» — на сочетании (11), а искомый критерий принятия решения об обнаружении ДО в зоне обзора ОЭП сформировать на логике бинарного накопителя (БН), т. е. на логике бинарной серийной процедуры из N окон последовательных фоноцелевых кадров. Согласно этой логике БН подсчитывает число единиц при выполнении « $h_{\nu_i d} = 1 \& h_{\nu_i \lambda} = 1$ », сравнивает результат накопления единиц с порогом $\Pi_{\text{БН}}$ и при его превышении вырабатывает решение о том, что обнаружен ДО. Порог $\Pi_{\text{БН}}$ допустимо установить [9] по приближённому выражению $\Pi_{\text{БН}} = 1,5\sqrt{N}$ ($N = 5$, $\Pi_{\text{БН}} = 3$).

Примечания к рис. 5 (изображения a, b, f — контраст изображения ДО отрицательный, c — переход от отрицательного контраста ДО к положительному (преобладает положительный контраст), d — переход от положительного контраста ДО к отрицатель-

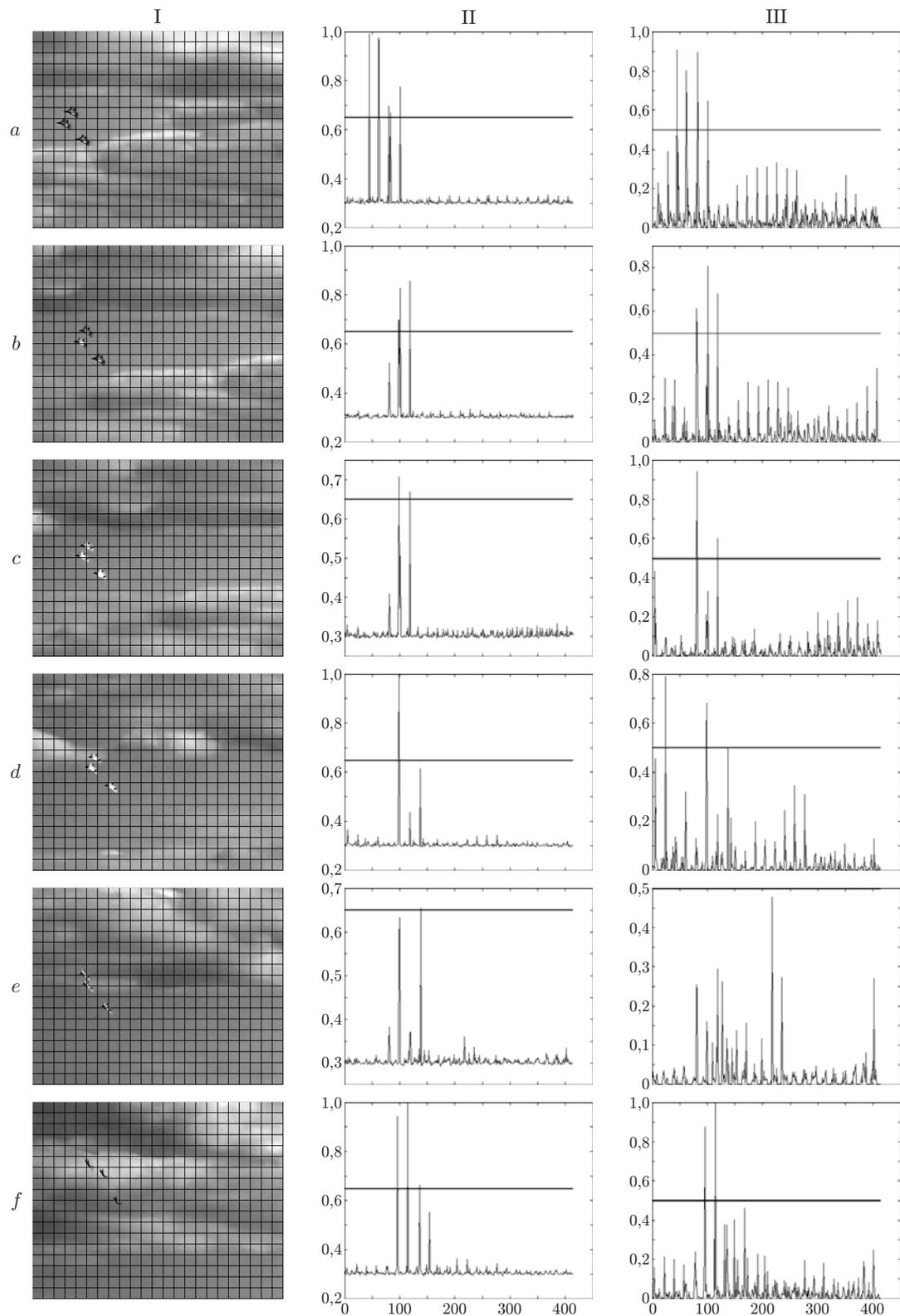


Рис. 5. Результаты обработки последовательности фоноцелевых кадров: столбец I — реальные изображения; II — вычисленные алгоритмом фрактальные размерности изображений окон 10×10 пикселей кадров в ситуации H_2 ; III — вычисленные алгоритмом максимальные собственные значения изображений в тех же окнах кадров в ситуации H_2 . Горизонтальные линии — порог обнаружения

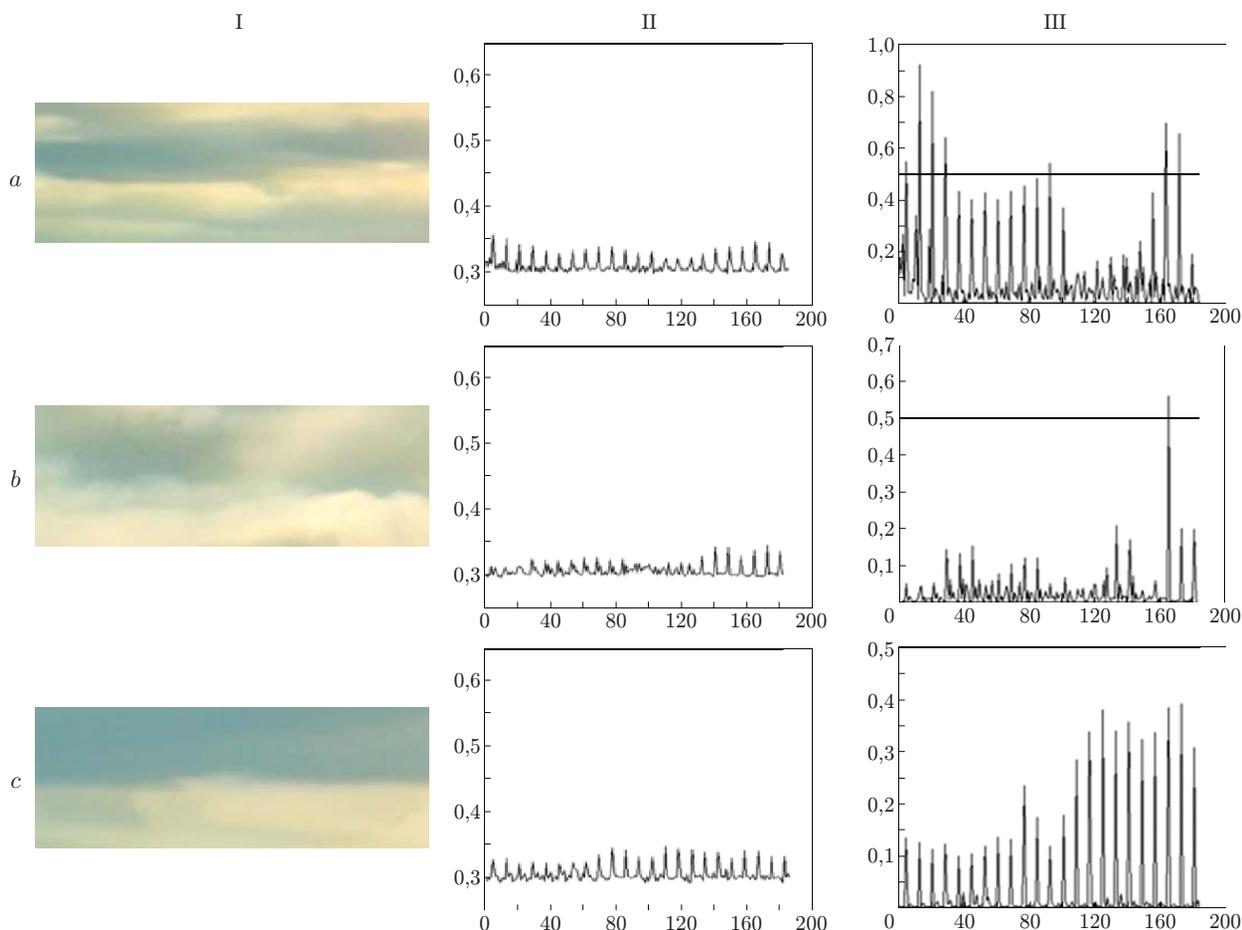


Рис. 6. Результаты обработки последовательности фоновых кадров: столбец I — реальные изображения сложного фона, II — вычисленные алгоритмом фрактальные размерности изображений окон 10×10 пикселей кадров в ситуации H_1 , III — вычисленные алгоритмом максимальные собственные значения корреляционных матриц изображений в тех же окнах кадров в ситуации H_1 . Горизонтальные линии — порог обнаружения

ному (преобладает положительный контраст), e — переход от положительного контраста ДО к отрицательному).

1. По выборкам максимальных собственных значений и фрактальных размерностей оконных изображений фоноцелевых кадров a – d формируется сочетание (1 1), по изображению окна кадра e — сочетание (1 0) вследствие изменения контраста изображения ДО с положительного на отрицательный.

2. По выборкам максимальных собственных значений и фрактальных размерностей оконных изображений фоноцелевого кадра f формируется сочетание (1 1).

3. Порог обнаружения ДО по изображениям окон фоноцелевых кадров для статистики фрактальной размерности $\Pi(\alpha_{\text{доп}}; d) = 0,65$ и статистики максимального собственного значения $\Pi(\alpha_{\text{доп}}; \lambda) = 0,51$.

Примечания к рис. 6.

1. По выборкам максимальных собственных значений и фрактальных размерностей изображений в окнах фоноцелевых кадров a, b формируется сочетание (0 1), на кадре c — сочетание (0 0);

2. Порог обнаружения ДО по изображениям окон фоноцелевых кадров $\Pi(\alpha_{\text{доп}}; d) = 0,65$ и $\Pi(\alpha_{\text{доп}}; \lambda) = 0,51$.

Итак, построен критерий обнаружения ДО на сложном фоне как критерий классификации близких простых гипотез по выборке бинарно квантованных нелинейных форм статистик в виде эффективных информационных вкладов фрактальной размерности и максимального собственного значения корреляционных матриц изображений окон серии из N фоноцелевых кадров.

Структура алгоритма обнаружения динамических объектов. В соответствии с изложенным структура алгоритма представляется последовательностью следующих вычислительных операций:

1. Формирование окна на изображении с использованием метрики-расстояния $r = \max\{|i - h|, |j - k|\}$ на фоноцелевом кадре, i, j — координаты центра окна, h, k — координаты пикселя, отстоящего от центра не более чем на r ($r = 5$).

2. Вычисление фрактальной размерности изображения в окне методом покрытия по предложенной в [10] программе для ПЭВМ.

3. Нахождение смещённой корреляционной матрицы изображения в окне.

4. Определение максимального собственного значения корреляционной матрицы.

5. Вычисление статистик $\ln(\mu_{11d} - d_{\nu_i})$, $\ln(\mu_{11\lambda_{\max}} - \lambda_{\max\nu_i})$ критерия обнаружения ДО на фоноцелевом изображении (при «сдвиге» выборок d_{ν_i} , $\lambda_{\max\nu_i}$ в интервалы $[0, 1]$ и $\mu_{11d}, \mu_{11\lambda_{\max}} = 1$).

6. Проверка выполнения критериев Неймана — Пирсона (3) и (5) обнаружения ДО на фоноцелевом изображении по статистикам $\ln(\mu_{11d} - d_{\nu_i})$, $\ln(\mu_{11\lambda_{\max}} - \lambda_{\max\nu_i})$ операции 5.

7. Формирование бинарно квантованных сигналов (серии из единиц, нулей) по результатам операции 6 как исходных статистик «да/нет» для операции 8.

8. Принятие решения бинарным накопителем об обнаружении ДО по правилу «3 из 5» в зоне обзора ОЭП.

Алгоритм реализован на ПЭВМ.

Оценки показателей качества алгоритма обнаружения динамических объектов. Показателями качества приняты: P_0 — вероятность правильного обнаружения ДО на фоноцелевом кадре, P_1 — вероятность правильного обнаружения ДО по серии фоноцелевых кадров и N — объём серии, необходимый для принятия правильного решения при допустимой вероятности ложного обнаружения ДО.

Вероятность $P_0 \approx 0,6$ оценена при отношении сигнал/шум (С/Ш) $\simeq 3$ теоретико-экспериментальным методом с использованием теоретической зависимости [11] P_0 от отношения С/Ш. Оценка выполнена при представлении экспериментально полученных в реальных условиях (см. рис. 1, 2, 5, 6) слабоконтрастных малоразмерных изображений ДО «пачкой» с числом $\gg 15$ пиксельных импульсов случайных яркостей (амплитуд), при вероятности ложной тревоги в пикселе $P_{\text{ЛТ}} \leq 10^{-4}$, обусловленной внутренним гауссовым шумом ОЭП, и обнаружении ДО по логике «3 из 5», близкой к наилучшей «3 из 4» [11], по «пачке» пиксельных импульсов в окне фоноцелевого кадра. Установлено моделированием (см. рис. 3), что эта же вероятность P_0 есть и вероятность формирования сочетания (1 1) как события, непосредственно обусловленного той же «пачкой» пиксельных импульсов, а вероятность возникновения сочетания (1 0) или (0 1) достаточно мала ($\leq 0,037$), и из таких сочетаний не образуются повторные выборки.

В ситуации H_1 (в зоне ОЭП только сложный фон) имеет место ложное обнаружение сочетаний (1 1), что непосредственно следует и из полученных моделированием гистограмм (см. рис. 3) для статистик фрактальной размерности и максимального собственного значения корреляционной матрицы изображения окна фоноцелевого кадра. В этой ситуации вероятность $P_{\text{ЛТ}} = 0,25-0,3$ при $P_0 \approx 0,6$.

Обнаружение ДО бинарным накопителем (обнаружителем) информации осуществляется по серии из $N = 5$ последовательных слабоконтрастных фоноцелевых кадров при пороге обнаружения $\text{П}_{\text{БН}} = 3$. Объём серии вычислен при вероятности ложного обнаруже-

ния $\simeq 0,12$. При этом вероятность P_1 для принятого критерия «3 из 5» определяется как кумулятивная по рекуррентному выражению [12] $P_1(3, 5; n) = P_1(3, 5; n-1) + f_1(3, 5; n)$, где $P_1(3, 5; n)$ — вероятность выполнения критерия «3 из 5» хотя бы 1 раз за n выборок из последовательных фоноцелевых кадров; $P_1(3, 5; n-1)$ — та же вероятность за $(n-1)$ выборок; $f_1(3, 5; n)$ — вероятность выполнения критерия «3 из 5» впервые на n -й выборке. В рассматриваемом случае в бинарный обнаружитель поступают выборки из серии окон, «скользящих» по фоноцелевым кадрам. Вычисление P_1 выполняется для любой серии выборок из пяти последовательных кадров $n = 1, 2, 3, 4, 5$.

Очевидно, что при $n = 1, 2$ вероятность $P_1 = 0$, а при $n = 3$ $P_1 = 0,6^3$. Теперь, воспользовавшись рекуррентным выражением, получаем $P_1 = 0,66$ при $n = 4$ и $P_1 \approx 0,83$ при $n = 5$. Для повышения последней до $\geq 0,9$ объём серии целесообразно увеличить до 6–7 кадров.

Отметим, что при применении классического [13] (нелокального) критерия обнаружения ДО при близких ситуациях H_1 и H_2 вероятность $P_{\text{ЛТ}}$ возрастает до 0,6. Построенный в [13] обнаружитель, по существу, не является оптимальным: в нём величину порога сравнения отношения правдоподобия $\Lambda = \exp[(a_i/\sigma^2)(y_i - 0,5a_i)]$ [13, с. 291] рекомендуется устанавливать при любом выборе a_i из диапазона $[a_{\min}, a_{\max}]$ — минимального и максимального значений получаемого ОЭП сигнала, $a_{\min} > 0$, $a_{\max} > 0$. Такой выбор допустим только при положительном контрасте яркости обнаруживаемого ДО, и при этом мощность правила принятия решения об обнаружении ДО не будет превышать мощность правила Неймана — Пирсона для уровня значимости, вычисленного в [13, с. 293, (5.26)]: $P_{\text{ЛТ}} = 1 - Lp(\ln \Lambda_{\text{п}} + 0,5a_{\max}^2/\sigma^2)$, где Lp — обозначение функции Лапласа. Утверждение основывается на известном [14] доказательстве леммы Неймана — Пирсона.

Обнаружитель ДО, предложенный в [15] по критерию Неймана — Пирсона, также не является оптимальным: он построен при предположении, что яркость объекта в точке изображения имеет равномерное распределение на известном интервале значений со среднеквадратическим отклонением, много меньшим длины этого интервала, и что апостериорное распределение вероятностей параметров смещения и поворотов изображения, обусловленных движением датчика, является гауссовым с известными апостериорными дисперсиями. Очевидно, что показатели эффективности такого обнаружителя существенно зависят от достоверности используемых в нём априорных данных, однако методов по их обоснованию в [15] не предложено.

Заключение. В предлагаемой работе синтезирован алгоритм обнаружения ДО по слабоконтрастным точечным изображениям, полученным ОЭП на сложном фоне по локально наиболее мощному критерию альтернативных близких простых ситуаций «ДО на сложном фоне» и «сложный фон» в условиях априорной неопределённости относительно опорных изображений.

Предложенный алгоритм обеспечивает в сложных фоновых условиях по сравнению с известными существенное повышение вероятности правильного обнаружения ДО при снижении ложной тревоги не менее чем в 2 раза по накопленным малоразмерным (точечным) слабоконтрастным изображениям серии из 5–7 фоноцелевых кадров ОЭП.

При применении для обнаружения ДО статистик как максимальных инвариантов в виде максимального собственного значения корреляционной матрицы изображения и его фрактальной размерности не требуется введения априорных данных подобно принятым в [13, 15]. Обнаружитель ДО в полном смысле становится оптимальным по локально наиболее мощному критерию, а его структура — универсальной для малоразмерных точечных изображений ДО как при положительном, так и при отрицательном контрасте яркости ДО. Справедливость утверждения исходит непосредственно из свойства положительной определённости корреляционной матрицы и независимости алгоритма вычисления фрактальной размерности от знака контраста яркости ДО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Храмичев А. А., Ковальчук М. П., Васильев В. Б. Методика определения пространственно-частотных характеристик фона небосвода // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана «Антенны и устройства радио- и оптического диапазонов». Сер. Приборостроение. 2009. С. 246–252.
2. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. М.: Мир, 1969. 396 с.
3. Щиголев Б. М. Математическая обработка наблюдений. М.: ФМЛ, 1962. 344 с.
4. Потапов А. А. Фракталы, дробные операторы и скейлинг — основа новых методов обработки информации, синтеза фрактальных радиосистем, антенн и импедансов // Proc. of the 20th Intern. Crimean Conf. «Microwave & Telecommunication Technology». Ukraine, 2010. P. 39–46.
5. Борзов С. М., Потатуркин О. И. Обнаружение малоразмерных динамических объектов подвижной системой наблюдения // Автометрия. 2012. 48, № 1. С. 23–29.
6. Киричук В. С., Косых В. П. Построение многоканального фильтра для обнаружения точечных объектов в изображении, формируемом матричным фотоприёмником // Автометрия. 2012. 48, № 5. С. 82–92.
7. Кокс Д., Хинкли Д. Теоретическая статистика. М.: Мир, 1978. 560 с.
8. Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1975. 648 с.
9. Сосулин Ю. Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации. М.: Радио и связь, 1992. 304 с.
10. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. М.: Постмаркет, 2000. 352 с.
11. Кузьмин С. З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Сов. радио, 1974. 432 с.
12. Башаринов А. Е., Флейшман Б. С. Методы статистического последовательного анализа и их приложения. М.: Сов. радио, 1962. 352 с.
13. Мосягин Г. М., Немтинов В. Б., Лебедев Е. Н. Теория оптико-электронных средств. М.: Машиностроение, 1990. 432 с.
14. Френкс Л. Теория сигналов. М.: Сов. радио, 1974. 344 с.
15. Алпатов Б. А., Бабаян П. В., Балашов О. Е., Степашин А. И. Системы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. М.: Радиотехника, 2008. 176 с.

Поступила в редакцию 14 марта 2014 г.
