

## АДАПТИВНЫЙ МЕТОД И АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОКОНТРАСТНЫХ ОБЪЕКТОВ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМ СРЕДСТВОМ

© 2014 г. А. Н. Катулев, доктор техн. наук; А. А. Колонсков, аспирант;  
А. А. Храмичев, канд. техн. наук; С. В. Ягольников, доктор техн. наук

Научно-исследовательский центр противовоздушной обороны 4 Центрального  
научно-исследовательского института Министерства обороны Российской Федерации,  
Тверь

Предложен адаптивный метод обнаружения объектов на изображении оптико-электронного средства. Метод основан на восстановлении опорного сигнала-изображения и формировании статистики в виде максимального собственного значения выборочной корреляционной матрицы для принятия решения об обнаружении объекта по критерию Неймана–Пирсона.

Используется информация, содержащаяся в регистрируемых изображениях при отсутствии априорных данных о фоне-целевой обстановке. Приведены блок-схема алгоритма и результаты оценки показателей эффективности обнаружения объектов в различных условиях.

**Ключевые слова:** изображение, опорный сигнал, оптико-электронное средство, фон, уравнение наблюдения, критерий обнаружения, метод, алгоритм.

Коды OCIS: 100.0100, 100.2000

Поступила в редакцию 02.08.2013

### Актуальность задачи, уравнение наблюдения

Существующими методами, разработанными для пассивных систем различного назначения [1], задача эффективного обнаружения малоконтрастных объектов оптико-электронными средствами (ОЭС) в сложных фоновых условиях трудно разрешима. Принципиальной причиной такому утверждению является то, что ОЭС – элемент пассивной некорреляционной системы обзора заданного пространства. Система не излучает и не имеет опорного сигнала-изображения.

В известном алгоритме обнаружения объектов на реальных изображениях используются эталонные опорные сигналы-изображения, задаваемые оператором ОЭС [2]. Заметим, что подобное допущение было введено в работе [3], а в работе [4] оно введено при сегментации и сопровождении объектов на сложном фоне. Однако возможность использования эталонных сигналов, как и допущения [3], для решения задачи автоматического обнаружения и сопровождения объектов в различных фоновых условиях не доказана. Частный подход к раз-

работке алгоритма выделения сигналов изображений на фоне бимодальных гауссовоподобных импульсных помех для условий априорной неопределенности о распределении сигналов изображений предложен в работе [5]. Для решения задачи обнаружения таких сигналов предложено использовать пуассоновские условные распределения – функции правдоподобия [6]. Адаптивный алгоритм выделения и обнаружения воздушных объектов, когда в качестве фоновой составляющей может рассматриваться облачное небо с перепадами яркости, описываемыми регрессионной моделью, приведен в работе [7]. Очевидно, это частная модель описания фона и ее применение возможно при стационарном не сплошном облачном фоне. Способ обнаружения тепловых объектов на фоне небосвода с помощью инфракрасных ОЭС с широким полем зрения изложен в работе [8]. Он основан на использовании отличий пространственных спектров излучения точечного теплового объекта и протяженного, более холодного, атмосферного фона. При этом обнаружение объекта осуществляется посредством разбиения фоново-целевого изображения (ФЦИ) на однородные (сходные) области (сегменты), представления ФЦИ в виде

матрицы отношений общей дисперсии яркостного контраста сегмента к дисперсии яркости по строкам сегмента ФЦИ, выделения сегментов, в которых предположительно обнаружено излучение теплового точечного объекта, и формирования бинарного изображения для обеспечения только визуального обнаружения объектов.

Исследованы вопросы фрактального обнаружения протяженных малоконтрастных объектов на изображениях (в том числе радиолокационных) с использованием фрактальной модели отражающей поверхности, построены эмпирические характеристики обнаружения объекта на фоне однородной фрактальной поверхности в зависимости от отношения его площади к площади "окна" при фиксированных его размерах [9]. При этом собственно алгоритм автоматического обнаружения объекта в этой работе не излагается. Вопросы сопровождения объектов на изображении в инфракрасном диапазоне волн рассмотрены в работе [10].

В связи с этим возникает актуальная научно-техническая задача разработки адаптивного метода обнаружения малоконтрастных объектов ОЭС с автоматическим восстановлением опорного сигнала-изображения для алгоритма обнаружения объектов на изображениях в сложных, в общем случае нестационарных, фоновых условиях. Обнаружение объектов должно осуществляться в реальном времени работы ОЭС без использования априорной информации относительно текущего состояния контролируемого фона-целевого пространства.

Цель статьи – обоснование метода и алгоритма автоматического обнаружения объектов на изображениях ОЭС в различных фоновых условиях при адаптивном восстановлении опорного сигнала для выборочного корреляционного интеграла и формирование для него выборки в виде максимального собственного значения "оконной" выборочной корреляционной матрицы, а также оценка вероятностных характеристик алгоритма.

В основу метода положен принцип формирования в пространственной спектральной области опорного сигнала (с последующим преобразованием его в пространственную область) непосредственно по выдаваемым ОЭС изображениям в текущих условиях функционирования без априорной информации о фона-целевой обстановке. При этом учитываются следующие обстоятельства:

- внутренний шум ОЭС не зависит от излучения фона в любом направлении сектора обзора

ра пространства, он аддитивен по отношению к излучению объекта и фона,

- ОЭС – линейное безынерционное измерительное устройство, которое реагирует на мгновенную интенсивность входного поля и формирует его изображение (поле яркости),

- измеренная интенсивность поля, формируемая в изображении, в любой момент времени является реализацией нестационарного пространственно коррелированного двумерного случайного процесса с неизвестным априори законом распределения вероятностей, который как функция двух пространственных переменных обладает всеми свойствами корреляционной функции [11],

- интенсивность излученного поля от объекта распространяется так же, как и корреляция в соответствии со стохастическими дифференциальными уравнениями Гельмгольца, решение которых по существу представляет механизм ее (интенсивности) образования или, что то же, уравнение наблюдения. Формально структура уравнения представляется в каждый момент времени мультиаддитивной операцией в матричной форме вида

$$f(t, x, y) = \phi(t, x, y)S(t, x, y) + n(t, x, y),$$

где  $f(t, x, y)$  – матричная функция изменения интенсивности (яркости) изображения,  $\phi(t, x, y)$  – матричная функция изменения характеристик среды распространения излучений,  $S(t, x, y)$  – матричная функция изменения поля от объекта,  $n(t, x, y)$  – матрица внутреннего шума ОЭС.

Левая часть уравнения наблюдения представляет одну из фундаментальных составляющих статистики обнаружения объекта на простом и сложном фонах в виде двумерного корреляционного интеграла для линейного ОЭС. Другая фундаментальная составляющая этой статистики есть двумерный опорный сигнал-изображение, по определению априори несущий информацию о возможном излучении от объекта. Однако априори достоверно сформировать такой сигнал для конкретных текущих условий функционирования неизлучающего ОЭС практически невозможно. Но его можно сформировать для фрагментов ("окон") текущего изображения при предварительном оценивании их фрактальных размерностей и спектрально-энергетических свойств с целью использования при обработке последующего изображения.

Фрактальную размерность можно оценить известным клеточным методом [12, 13].

Изменения в пространственно-энергетическом спектре (а, значит, и в корреляции значений яркости) могут обнаруживаться при применении двумерного "оконного" преобразования Фурье или вейвлет-преобразования как преобразований, обладающих разрешающей способностью по пространственным частотам при перемещении "окна" на изображении. Отметим, что вейвлет-метод по сравнению с "оконным" преобразованием Фурье позволяет выделить особенности спектра, связанные с возникновением новых или исчезновением имевшихся частот в спектре фрагмента изображения.

### Адаптивный принцип формирования опорного сигнала

Принцип формирования опорного сигнала заключается в следующем: на каждом изображении вводится сетка окон и в каждом положении окна вычисляется фрактальная размер-

ность изображения и фиксируются координаты окон, в которых фрактальная размерность превышает известное [12] значение фона (рис. 1). Далее выполняется последовательное вычисление пространственного спектра в окнах с фрактальной размерностью, превышающей фрактальную размерность облаков, каждого текущего изображения с использованием операции прямого двумерного вейвлет-преобразования. Затем выполняется вычитание пространственного спектра внутреннего шума ОЭС из вычисленного вейвлет-спектра. Вычитание допустимо в силу того, что спектр шума аддитивен по отношению к спектру излучений сторонними источниками в секторе обзора пространства ОЭС.

Получаемый в результате операции вычитания спектр формально в соответствии с обобщенной теоремой умножения Эфроса [14] можно представить выражением вида

$$\ln W(\omega_x, \omega_y) = \ln U(\omega_x, \omega_y) + \ln F[q(\omega_x, \omega_y)] \quad (1)$$

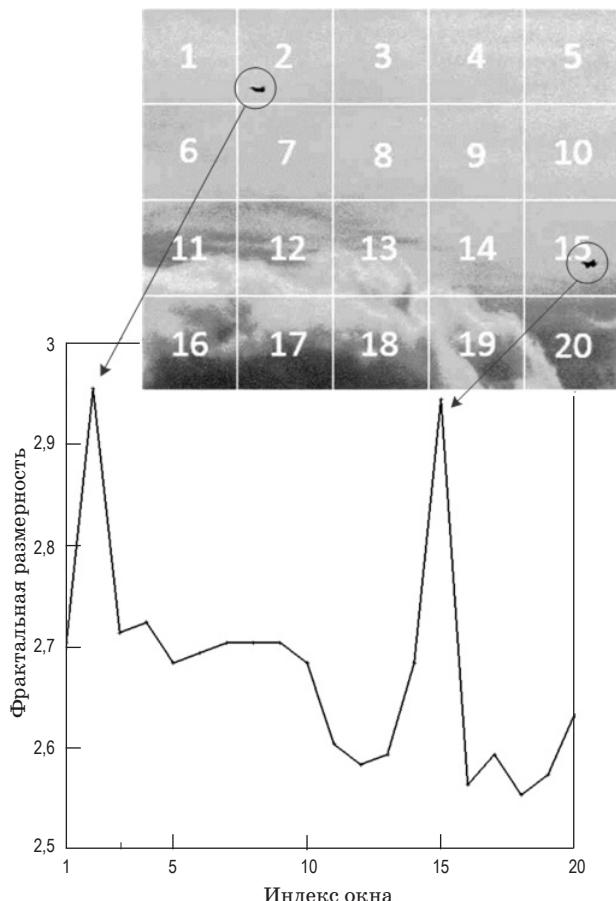


Рис. 1. Фрактальная размерность в окнах исходного изображения.

с неизвестными для текущего изображения матричными спектральными слагаемыми, где  $\omega_x$ ,  $\omega_y$  – пространственные частоты в системе координат изображения,  $U(\omega_x, \omega_y)$  – двумерный спектр излучения объекта,  $F[q(\omega_x, \omega_y)]$  – двумерный спектр излучения других природных фоновых источников в секторе пространства, накрываемом вейвлет-окном, где может находиться объект,  $W(\omega_x, \omega_y)$  – вычисленный двумерным вейвлет-преобразованием спектр окна анализируемого изображения.

Далее выполняется операция сравнения вычисленных спектров в каждом текущем и смежных с ним окнах с целью выявления компактных сосредоточений – всплесков спектральных составляющих. Спектральные всплески, как установлено математическим моделированием и натурными экспериментами, могут порождаться излучениями пространственно-протяженных объемных образований от объекта на фоне ясного неба и облачности различных типов. Они в силу особенностей интерференции электромагнитного излучения (формально в силу обобщенной теоремы умножения Эфроса) усиливаются при появлении объекта на фоне или внутри пространственно-протяженных образований от облаков.

Сосредоточения спектральных всплесков представляются в выражении (1) первым слагаемым в правой части.

Выполняется операция вычисления первого слагаемого правой части формулы (1) по выражению

$$\ln U(\omega_x, \omega_y) = \ln W(\omega_x, \omega_y) - \ln F[q_c(\omega_x, \omega_y)], \quad (2)$$

где  $F[q_c(\omega_x, \omega_y)]$  – спектр смежного окна, в котором значение спектрального всплеска незначительно.

Затем, после потенцирования результата вычитания по выражению (2), выполняется обратное вейвлет-преобразование спектра  $U(\omega_x, \omega_y)$ .

Результат выполнения, аналогичным образом в конкретном фрагменте на предыдущем изображении, преобразования есть не что иное, как опорный сигнал (опорное изображение) для текущего анализируемого окна на очередном (текущем) анализируемом изображении. То есть, это реализация случайной двумерной

функции изменения интенсивности поля с признаком фрактальной размерности от объекта в рассматриваемом окне текущего изображения. С использованием выявленного таким образом опорного сигнала формируется взаимная корреляционная матрица (это теплицева матрица) для последующего решения задачи обнаружения объекта на очередном текущем изображении ОЭС. На рис. 2 представлены результаты вычисления взаимной корреляционной матрицы в окнах изображения для различных ситуаций (рис. 3). Видно, что максимальные ее значения однозначно соответствуют нахождению объекта в таком окне. Однако статистика в виде выборочной корреляционной матрицы не является инвариантом относительно любых невырожденных преобразований и тем более – не является максимальным инвариантом.

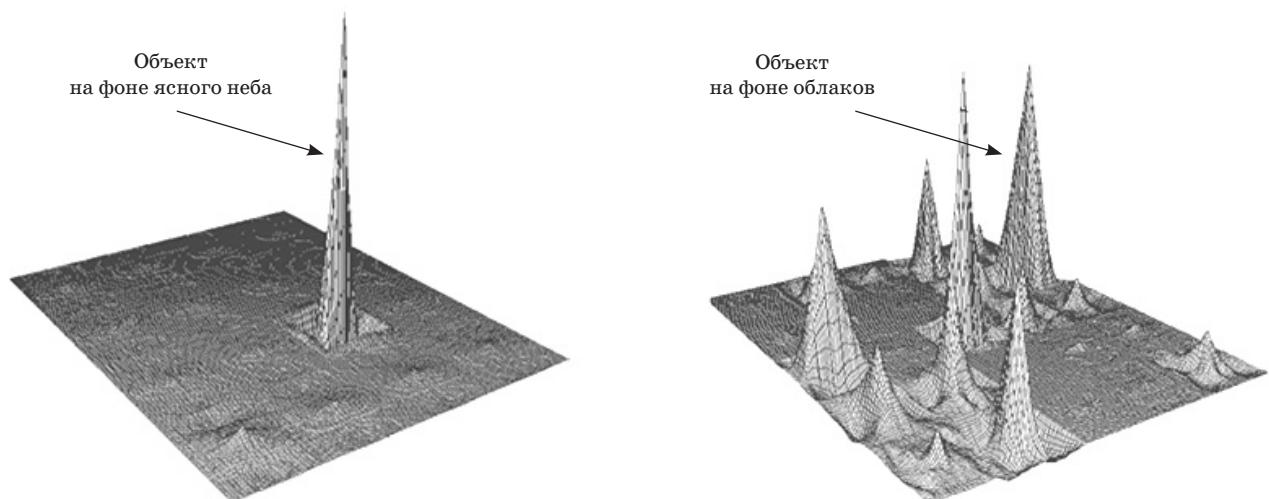


Рис. 2. Выборочные корреляционные матрицы в окнах изображений.

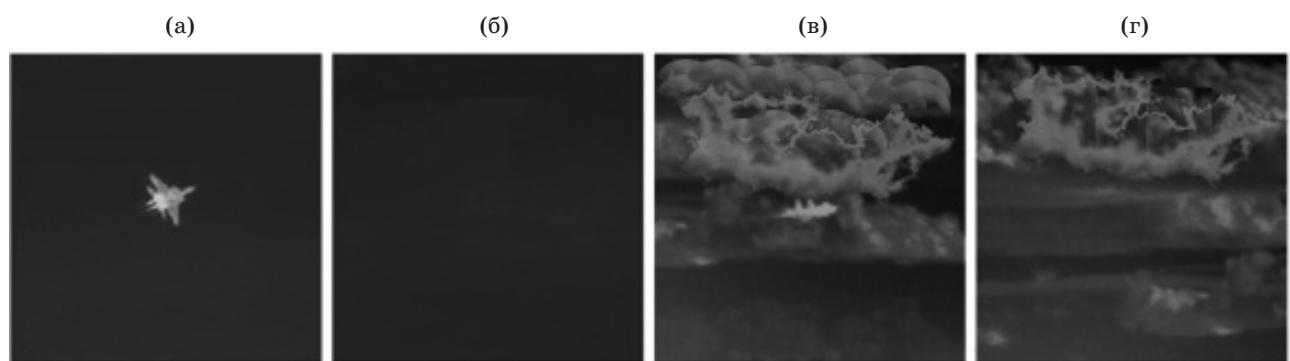


Рис. 3. Типовые фоново-целевые ситуации. а – объект на фоне ясного неба, б – ясное небо, в – объект на фоне облаков, г – облака.

## Моменты максимальных собственных значений для типовых фоно-целевых ситуаций

Объект на фоне ясного неба	Ясное небо	Объект на фоне облаков	Облака
максимальное собственное значение			
35315,85	10,16	13078,1	1078,35
коэффициент соответствия положения окна месту объекта на фоно-целевой сцене (максимальное значение коэффициента равно 1)			
0,99			0,85

Максимальными инвариантами являются совокупность собственных значений корреляционной матрицы и сами собственные значения. Естественно, максимальные инварианты в виде собственных значений представляются одномерными независимыми случайными величинами. Собственные значения можно упорядочить по убыванию, так как они всегда положительны и различны в силу того, что корреляционная матрица есть вещественная симметрическая положительно определенная.

Максимальные собственные значения существенно (на порядки) доминируют над всеми другими и содержат практическую полную информацию о действительной ситуации в соответствующем анализируемом окне изображения. На рис. 4 приведено полученное математическим моделированием поле максимальных собственных значений изображения ОЭС для ситуации "Объект на фоне облаков", а в таблице приведены моменты максимальных собствен-

ных значений для окон изображений, содержащих и не содержащих изображения объекта, полученных в результате моделирования [15].

Из анализа этих результатов следует возможность формирования по корреляционной матрице одномерной статистики обнаружения объекта на изображении – статистики в виде максимального собственного значения. Отметим также, что такая статистика обуславливает близкий к единице коэффициент соответствия положения "окна" месту нахождения объекта на изображении фоно-целевой сцены.

Для максимального собственного значения получены гистограммы условных распределений вероятностей (функций правдоподобия) при различных фоновых условиях: на фоне ясного неба, облаков, при экранировании объекта облаком. Так из рис. 5 видно, что гистограммы для ситуаций "Объект на фоне ясного неба" и "Объект на фоне облаков" односторонние и перекрываются только частично с гистограммами для условий отсутствия объекта.

В связи с этим можно установить пороговый уровень с учетом требования по достоверности принятия автоматического решения об обнаружении объекта на изображении по значениям максимального собственного значения корреляционной матрицы. Пороговый уровень не изменяется и при учете ситуации "Объект находится в перистом облаке или в нижнем слое перисто-слоистого облака (объект экранируется облаком)", так как область определения гистограммы для этой ситуации перекрывается в основном областью определения ситуации "Объект на фоне облаков".

Пороговый уровень в условиях априорной неопределенности относительно контролируемого ОЭС пространства целесообразно устанавливать в соответствии с известной леммой Неймана–Пирсона [16]. При этом последняя определяет и структуру алгоритма обнаружения объекта на изображении.

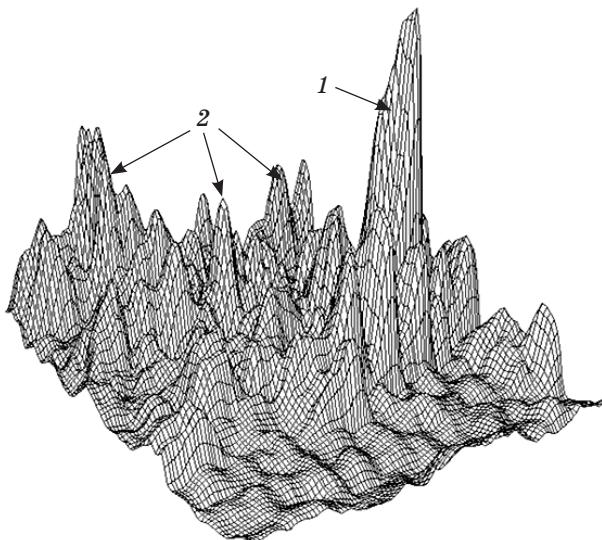
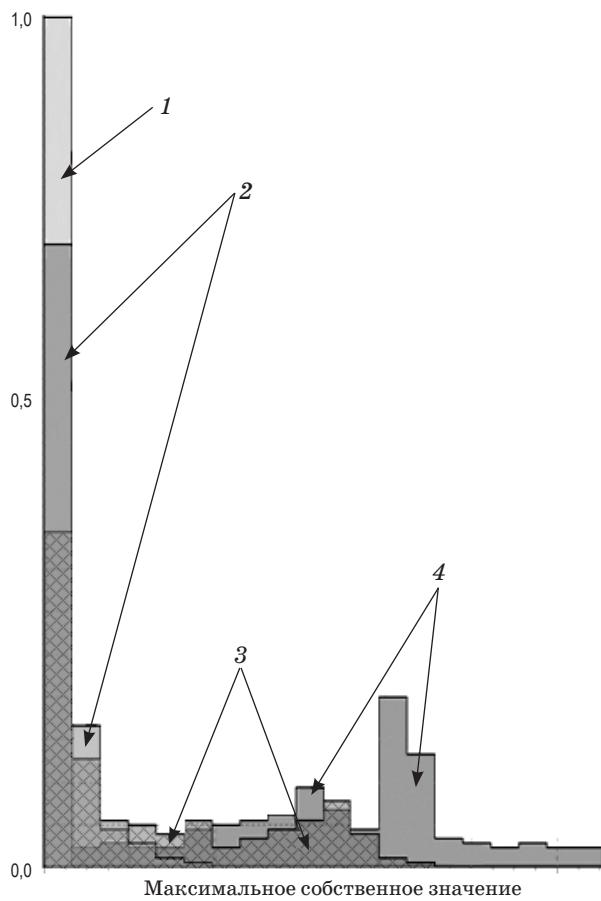


Рис. 4. Поле максимальных собственных значений на изображении. 1 – объект, 2 – фоновые помехи.



**Рис. 5.** Гистограммы максимального собственного значения для типовых фона-целевых ситуаций. 1 – ясное небо, 2 – облака, 3 – объект на фоне облаков, 4 – объект на фоне ясного неба.

Покажем, что восстановленное опорное изображение является наилучшим в среднеквадратическом смысле приближением к неизвестному истинному. Действительно, составим выражение ошибки определения опорного изображения

$$\delta = \ln U(\omega_x, \omega_y) + \ln F[q(\omega_x, \omega_y)] - \ln F[q_1(\omega_x, \omega_y)]$$

и выражение дисперсии этой ошибки

$$\begin{aligned} \overline{\delta^2} &= [\ln U(\omega_x, \omega_y)]^2 + \\ &+ \{\ln F[q(\omega_x, \omega_y)] - \ln F[q_1(\omega_x, \omega_y)]\}^2 + \\ &+ 2[\ln U(\omega_x, \omega_y)]\{\ln F[q(\omega_x, \omega_y)] - \ln F[q_1(\omega_x, \omega_y)]\}, \end{aligned}$$

где черта сверху обозначает усреднение по совокупности изображений. Такое усреднение реализуемо по накопленным изображениям на малом отрезке времени, на котором они составляют повторную выборку.

Очевидно, последнее слагаемое в выражении дисперсии равно нулю, так как спектр излучения объекта не коррелируется с разностью спектров излучений сторонних источников в отображаемых ОЭС в текущем и смежных с ним окнах на одном и том же изображении, поэтому

$$\begin{aligned} \overline{\delta^2} &= [\ln U(\omega_x, \omega_y)]^2 + \\ &+ \{\ln F[q(\omega_x, \omega_y)] - \ln F[q_1(\omega_x, \omega_y)]\}^2. \end{aligned}$$

Это означает, что значение дисперсии ошибки формирования опорного изображения в условиях априорной неопределенности о параметрах поля объекта будет минимальным только при минимальном значении дисперсии разности спектров излучений от сторонних фоновых источников природного происхождения, отображаемых в текущем и смежном с ним окнах.

Минимизацию дисперсии разности

$$\{\ln F[q(\omega_x, \omega_y)] - \ln F[q_1(\omega_x, \omega_y)]\}^2$$

выше было предложено выполнять на множестве смежных окон без привлечения априорной информации, что и обуславливает сущность и достаточное условие реализации принципа адаптивного формирования опорного изображения для каждого окна на текущем изображении.

### Критерий и алгоритм принятия решения об обнаружении объекта

Обнаружение объекта на изображении  $f(t, x, y)$  сводится, по определению, к установлению координат центральной точки скользящего "окна", где оконное выборочное поле из  $f(t, x, y)$  соответствует с требуемой достоверностью полю излучений от объекта и сопутствующих ему помех от внешних фоновых источников, а также к выделению на изображении "окна" граничных точек объекта.

Решение первой части задачи обнаружения объекта выполняется при следующих исходных положениях:

- выборочное изображение формально представимо в любой фиксированный момент времени матричным уравнением наблюдения,
- возможные ситуации, порождающие выборочное изображение, альтернативны, однако в различных положениях окна на исходном (отдельно взятом для анализа) изображении могут проявляться не альтернативные совокупности коррелированных значений яркости, так

как ОЭС одновременно может принимать излучения от различных объектов искусственного и естественного происхождения, слабоконтрастных и контрастных,

- априорная информация о распределении вероятностей для возможных фоно-целевых ситуаций отсутствует,

• в математических терминах связь выборочного изображения с возможными ситуациями описывается функциями правдоподобия. Такие функции были восстановлены моделированием для максимальных собственных значений выборочных корреляционных матриц для различных возможных условий обнаружения объектов на изображении. На рис. 5 функции правдоподобия представлены гистограммами. Запишем их в соответствии с уравнением наблюдения в виде

$$\begin{aligned} p\{\mathbf{A}[f(t, x, y)]|\varphi(t, x, y)S(t, x, y)\} &= \\ &= p\{\mathbf{A}[f(t, x, y)] - \varphi(t, x, y)S(t, x, y)\}, \end{aligned}$$

где  $\mathbf{A}$  – оператор преобразования к скалярному максимальному собственному значению корреляционной матрицы анализируемого "окна" на  $f(t, x, y)$ ,  $\varphi(t, x, y) S(t, x, y)$  – слагаемое уравнения наблюдения – выборки  $f(t, x, y)$

$$S(t, x, y) = \begin{cases} S(t, x, y) & \text{и } \varphi(t, x, y) = \begin{cases} \varphi_1(t, x, y) \\ \varphi_{c1} \\ \varphi_{c2} \end{cases} \\ 1 \end{cases}.$$

Здесь  $\varphi_1, \varphi_{c1}, \varphi_{c2}$  – обозначают различные источники фонового излучения, действующие на ОЭС ("ясное небо", "облачность" и "рваная облачность" соответственно).

Функции правдоподобия при анализе серии из  $N$  изображений, принятых ОЭС на отрезке времени  $[t_1, t_N]$  таком, что серия в силу свойства безынерционности ОЭС представляет повторную выборку независимых изображений, записывается в виде

$$\begin{aligned} \prod_{i=1}^N p\{\mathbf{A}[f(t_i, x, y)]|\varphi(t_i, x, y)S(t_i, x, y)\} &= \\ &= \prod_{i=1}^N p\{\mathbf{A}[f_i(t_i, x, y)] - \varphi(t_i, x, y)S(t_i, x, y)\}, \\ t_i &\in [t_1, t_N]. \end{aligned}$$

При этом заметим, что отрезок времени  $[t_1, t_N]$  "скользит" по временной оси и состав серий будет меняться. Поэтому при вычислении функции правдоподобия можно воспользоваться рекуррентной схемой как необходимым условием адаптации алгоритма принятия решения об обнаружении объекта.

Обеспечение требуемой достоверности установления местоположения окна, накрывающего изображение от объекта с сопутствующим ему уровнем яркости излучения от фоновых источников, заключается в достижении минимальной вероятности  $\beta_d$  – пропуска обнаружения объекта при непревышении допустимого уровня вероятности ложной тревоги –  $\alpha_d$ .

При таких исходных данных структура оптимального правила принятия решения однозначно формируется в соответствии с принципом (критерием) Неймана–Пирсона в виде

$$\min_{\{d_0, d_1\}} \{\beta_d + \lambda \alpha_d\}$$

с установлением оптимального порогового уровня принятия решения ( $d_1$  либо  $d_0$ ) в общем случае для каждой пары альтернативных ситуаций из возможного их количества  $C_M^2$  ( $M$  – количество исходных альтернативных ситуаций).

Принимается решение (обнаружен объект), если

$$\frac{\prod_{i=1}^N p\{\mathbf{A}[f(t_i, x, y)]|\varphi(t_i, x, y)S(t_i, x, y)\}}{\prod_{i=1}^N p\{\mathbf{A}[f(t_i, x, y)]|\varphi_\gamma(t_i, x, y)\}} \geq \pi_\gamma(\alpha)$$

при  $\forall \gamma = 1, 01, 02$ ,

иначе принимается альтернативное решение  $d_0$ . При этом отметим, что окончательное решение об обнаружении объекта предполагается принимать по алгоритму серийной процедуры с однопороговым критерием, например как в работе [16].

При невозможности обоснованного задания допустимого значения ложной тревоги  $\alpha$  критерий принятия решения сводится к критерию максимума правдоподобия и пороговый уровень принятия решения становится равным единице независимо от проверяемых пар альтернативных ситуаций, т.е. решение  $d_1$  в этом случае принимается, когда

$$\begin{aligned} \prod_{i=1}^N p\{\mathbf{A}[f(t_i, x, y)]|\varphi(t_i, x, y)S(t_i, x, y)\} &\geq \\ &\geq \prod_{i=1}^N p\{\mathbf{A}[f_i(t_i, x, y)]|\varphi_\gamma(t_i, x, y)\} \\ &\text{при } \forall \gamma = 1, 01, 02, \end{aligned}$$

в противном случае утверждается решение  $d_0$ .

Построенные правила при дополнительном их преобразовании [17] распространяются на случай обнаружения объекта при слабой ин-

тенсивности принимаемого от него поля – при экранировании объекта облаком. Для этого случая правило принятия решения выведено в работе [15].

Соответствующий адаптивный алгоритм включает вычислительные операции по реализации названных в предыдущем подразделе операций формирования опорного сигнала, вычисления взаимной корреляционной матрицы, ее максимального собственного значения и операции по реализации критерия Неймана–Пирсона.

Структура включает следующие информационно связанные базисные вычислительные операции:

- формирование и перемещение на изображении "окна" заданных размеров,

• вычисление статистически фрактальной размерности (клеточным методом) изображений, накрываемых скользящим "окном" на текущем кадре ОЭС, с последующей выдачей ее в алгоритм вычисления взаимной корреляционной матрицы изображений "окон" предыдущего и текущего кадров ОЭС,

• сглаживание изображения локально-полиномиальным второй степени оператором (фильтрация внутреннего гауссова шума ОЭС),

• формирование в пространственной области опорного сигнала-изображения по изображению "окна" с фрактальной размерностью, превышающей фрактальную размерность естественного фона,

• вычисление взаимной корреляционной матрицы изображения "окна" текущего кадра ОЭС и опорного изображения предшествующего кадра,

• вычисление максимального собственного значения взаимной корреляционной матрицы с последующей выдачей его как реализации в алгоритм обнаружения объекта,

• первичное обнаружение объекта на основе реализации максимального собственного значения по критерию Неймана–Пирсона в "окнах" текущего изображения,

• принятие решения по логике "хотя бы один раз из трех последовательных кадров" об обнаружении объекта в контролируемом ОЭС пространстве,

• объединение смежных "окон" изображения с обнаруженными объектами,

• выделение интегральным оператором дифференцирования граничных точек объекта,

• построение контура обнаруженного объекта,

- формирование информации для алгоритма сопровождения объекта.

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 6. Алгоритм программно реализован на ПЭВМ.

Вторая часть задачи обнаружения объекта решается при условии принятия решения  $d_1$  и заключается в выделении граничных точек контура в общем случае пространственно-протяженного объекта в соответствующем окне анализируемого изображения.

Для этого воспользуемся интегральным оператором дифференцирования изображения в окне, так как он при вычислении производных входного сигнала (двумерного изображения в окне) одновременно выполняет требование по подавлению высокочастотных составляющих шума [18].

Структура такого оператора  $D^p$  принимается аналогичной структуре идеального интегрального оператора дифференцирования (в точке  $(\alpha, \beta)$ )

$$\begin{aligned} D_i^p Z(t, \alpha, \beta) &= \frac{\partial^{k+l} f(t, \alpha, \beta)}{\partial x^k \partial y^l} \Big|_{x=\alpha, y=\beta} = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi^{k,l}(\alpha, x, \beta, y) f(t, x, y) dx dy = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta^{(k)}(\alpha - x) \delta^{(l)}(\beta - y) f(t, x, y) dx dy, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Psi^{k,l}(\alpha, x, \beta, y) &= \Psi^{k,l}(\alpha - x, \beta - y) = \\ &= \Psi^k(\alpha - x) \Psi^l(\beta - y) = \delta^k(\alpha - x) \delta^l(\beta - y), \end{aligned}$$

где  $p = k + l$  – порядок производной,  $\delta(x)$  и  $\delta(y)$  – дельта-функции от  $x$  и  $y$ ,  $\alpha \in [-c, c]$ ,  $\beta \in [-d, d]$ ,  $\Psi$  – весовая функция относится к типу разделимых пространственно-инвариантных весовых функций.

При этом обнаружение граничных точек перепадов на изображениях можно осуществлять путем последовательной обработки выборочных данных  $f(t, x, y)$  в окне с объектом в зависимости от одной какой-либо координаты для каждого значения другой, например, в зависимости от  $y_\mu \in [-d, d]$ ,  $\mu = 1, \dots, n_2$  для произвольного  $x_v \in [-c, c]$ ,  $v = 1, \dots, n_1$ ;  $[-d, d]$  и  $[-c, c]$  – размеры скользящего окна на изображении.

Отметим, что по выделенным граничным точкам можно восстановить контур обнаруженного пространственно протяженного объекта.

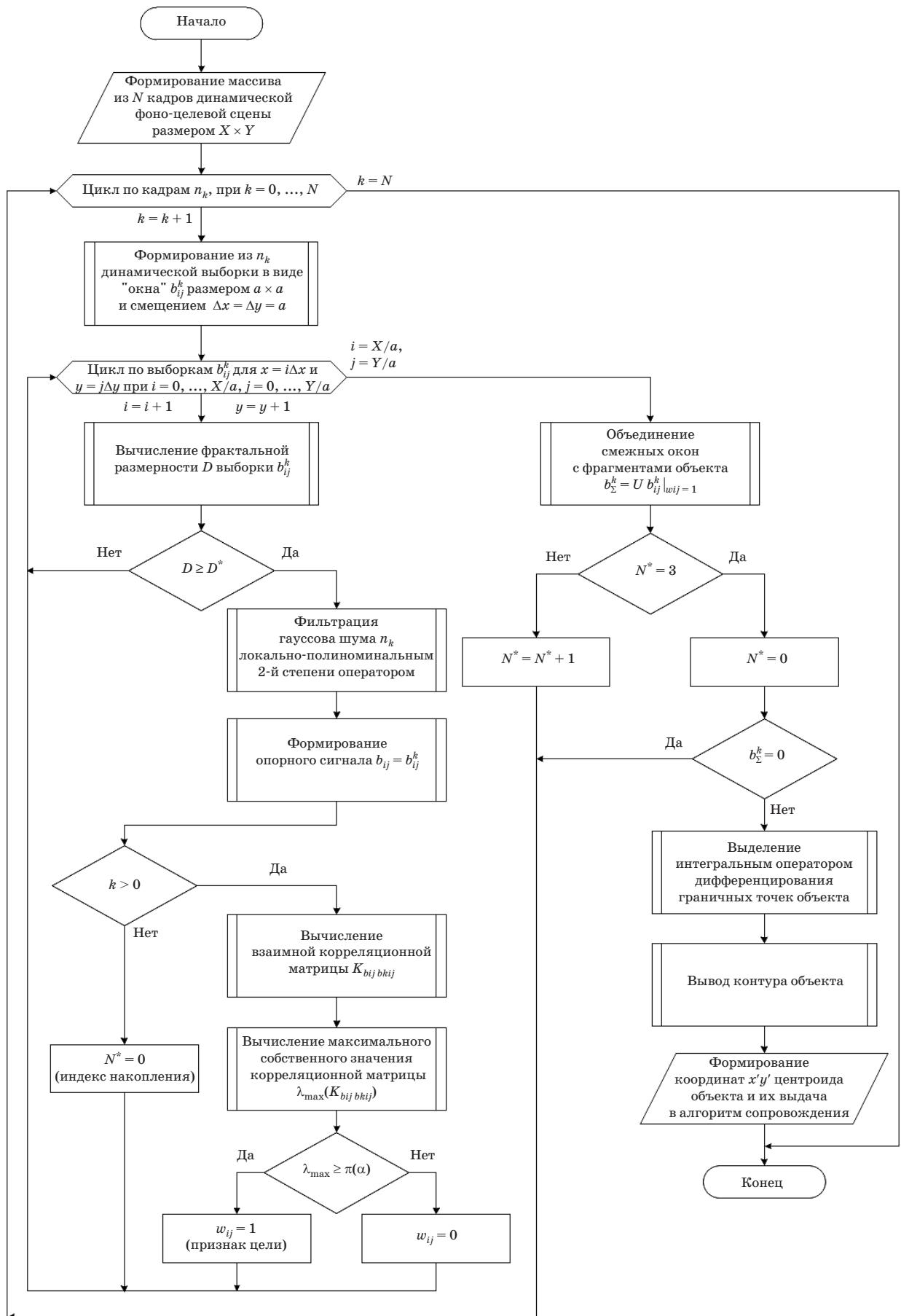


Рис. 6. Блок-схема алгоритма.

Весовая функция реального оператора  $D^p$  синтезирована [18] с учетом требования ее практической финитности по пространственным координатам  $x$  и  $y$ , сохранения частотного спектра выходного случайного поля  $f(t, x, y)$  на конечном носителе  $[-\Omega_x, \Omega_x] \times [-\Omega_y, \Omega_y]$  – окне и подавления высокочастотных составляющих.

### **Показатели качества адаптивного алгоритма обнаружения объекта**

Показателем качества в соответствии с критерием Неймана–Пирсона принята вероятность правильного обнаружения объекта на отдельном изображении ( $1 - \beta_d$ ) при фиксированном допустимом значении вероятности ложной тревоги  $\alpha_d$ . Их оценки получены методом математического моделирования функционирования алгоритма обнаружения объекта в типовых фоново-целевых условиях, зарегистрированных в ходе экспериментальных работ при использовании ОЭС инфракрасного диапазона для различных типов объектов.

Адаптивный алгоритм обеспечивает повышение вероятности правильного обнаружения объекта при обработке последовательности из трех кадров изображений ОЭС, функционирующего в сложных фоновых условиях. Такая серия изображений составляет повторную выборку, так как она формируется в интервале времени, не более 0,03–0,04 с, в течение которого справедливо допущение, что объект является "неподвижным излучателем".

Проведенные исследования показали, что значение вероятности правильного обнаружения объекта в сложных фоновых условиях может составить 0,87–0,93 по критерию обнаружения "хотя бы один раз из трех кадров".

В простых условиях функционирования ОЭС такое значение соответствующей вероятности достигается при обработке одиночного изображения. Вероятность ложной тревоги независимо от типа сложных фоновых условий принята 0,15, а в простых условиях ее значение не превышает 0,01.

### **Заключение**

Предложенный новый адаптивный метод обнаружения объектов ОЭС является фрактально-статистическим и осуществляется в автоматическом режиме функционирования ОЭС без использования априорной информации о фоново-целевой сцене. При этом восстанавливается опорный сигнал-изображение по короткой серии изображений, вычисляется в каждом положении скользящего "окна" на изображении выборочная корреляционная матрица, формируется достаточная статистика в виде максимального собственного значения корреляционной матрицы и принимается решение об обнаружении объекта по критерию Неймана–Пирсона.

По результатам обнаружения объектоврабатывается информация для их автоматического сопровождения.

Метод программно реализован на ПЭВМ. Проведены вычислительные эксперименты алгоритма с использованием изображений ОЭС, полученных в инфракрасном и видимом диапазонах.

Результаты экспериментов подтвердили высокую эффективность метода в простых и сложных фоновых условиях обнаружения объектов ОЭС как по точечным, так и по протяженным целям.

\* \* \* \* \*

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
2. Фесенко В.Т., Фесенко Т.Ю. Автоматическое сопровождение объектов в компьютерных системах обработки изображений // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 11. С. 39–45.
3. Шестов Н.С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. М.: Сов. радио, 1967. 348 с.
4. Борисова И.В. Сегментация и сопровождение объектов на сложном фоне // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 5. С. 27–30.
5. Самойлин Е.А. Оптимальное по критерию объединенных ограничений выделение сигналов изображений на фоне бимодальных гауссовоподобных импульсных помех // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 4. С. 26–35.

6. *Федосеев В.И.* Оптимизация обработки сигналов матричных приемников с использованием "метода окна" // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 4. С. 60–69.
7. *Муравьев В.С., Муравьев С.И.* Адаптивный алгоритм выделения и обнаружения воздушных объектов для систем автосопровождения // Научно-техн. конф. "Техническое зрение в системах управления". Москва, 14–16 марта 2012. С. 66–68.
8. *Гурченков Д.А., Жендарев М.В., Набатчиков А.С., Якименко И.В.* Способ обнаружения точечных тепловых объектов на сложном атмосферном фоне // Математическая морфология. Электронный математический и медико-биологический журнал. 2012. Т. 11. В. 3. С. 1–9.
9. *Сосулин Ю.Г., Русскин А.Б.* Фрактальное обнаружение протяженных малоконтрастных объектов на изображении // Радиотехника. 2009. № 12. С. 48–57.
10. *Yilmaz A., Shaque K., Shah M.* Target tracking in airborne forward looking infrared imagery // Image Vision Computing. 2003. № 21. Р. 623–635.
11. *Пугачев В.С.* Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. М.: Физматгиз, 1960. 884 с.
12. *Феддер Е.* Фракталы. М.: Мир, 1991. 254 с.
13. *Потапов А.А.* Фракталы в радиофизике и радиолокации. М.: Логос, 2002. 664 с.
14. *Лаврентьев М.А., Шабат Б.В.* Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука, 1973. 678 с.
15. *Катулев А.Н., Храмичев А.А., Ягольников С.В.* Фрактально-статистический метод обнаружения объектов на двумерном изображении // Радиотехника. 2012. № 11. С. 85–90.
16. *Левин Б.Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. Книга вторая. М.: "Сов. радио", 1975. 392 с.
17. *Башаринов А.Е., Флейшман Б.С.* Методы статистического последовательного анализа и их радиотехнические приложения. М.: Советское радио, 1962. С. 230–241.
18. *Катулев А.Н., Кудинов А.Н., Малевинский М.А., Соломаха Г.М.* Интегральный оператор дифференцирования двумерных случайных полей // Радиотехника. В. 126. Конфликтно-устойчивые радиоэлектронные системы. 2008. № 14. С. 15–21.