

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 621.396

ОБНАРУЖЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ, ЗАТЕНЯЮЩИХ ФОН

П. М. Южно

*Государственный научно-исследовательский испытательный институт
проблем технической защиты информации
Федеральной службы по техническому и экспортному контролю,
394030, г. Воронеж, ул. Студенческая, 36
E-mail: jukhnopr@mail.ru*

Выполнен статистический синтез структуры квазиоптимального устройства совместного обнаружения и оценки положения подвижного пространственного объекта, наблюдаемого в аппликативной смеси со случайным фоном. Показано, что существующие алгоритмы обнаружения неподвижного объекта позволяют получать только граничные оценки вероятности обнаружения.

Ключевые слова: пространственный объект, вероятность обнаружения, статистический синтез, функционал правдоподобия, уравнение Стратоновича.

Введение. При обнаружении пространственного объекта на случайном подстилающем фоне необходимо использовать гипотезу не об аддитивной, а об аппликативной смеси сигналов объекта и фона, когда изображение объекта замещает участок фона, на котором расположен объект. Задачи синтеза и анализа оптимального обнаружителя при аппликативной смеси полезного и фоновых сигналов получили развитие в [1–4]. В этих работах рассматривается случай обнаружения неподвижного объекта с известными местоположением и формой его внешней границы. Исследования, проведенные в [1, 2], основываются на допущении о том, что наблюдателю точно известна пространственно-яркостная структура как подлежащего обнаружению объекта, так и реализации участка фона, который расположен под этим объектом. Вместе с тем вполне очевидно, что такая информация о фоне в большинстве реальных ситуаций наблюдателю недоступна в принципе. В [3, 4] решается задача обнаружения пространственного объекта для случая, когда пространственно-яркостные структуры объекта и фона описываются двумя разными реализациями случайных гауссовских полей. При этом предполагается, что наблюдателю известны не конкретные реализации этих полей, имеющие место в текущем акте наблюдения, а только их статистические характеристики. В то же время в большинстве практических ситуаций наблюдатель в каждом акте наблюдения имеет дело с одной визируемой им вполне конкретной реализацией фона, которая может изменяться от акта к акту наблюдения. Во многих случаях пространственно-яркостная структура объекта также известна наблюдателю. Таким образом, формальные постановки задач обнаружения пространственных объектов, использованные в [1–4], не вполне согласуются с потребностями практических приложений. При этом не получен ответ на вопрос о том, могут ли и каким образом будут интерпретироваться результаты этих работ в применении к обнаружению пространственных объектов.

Целью данной работы является обсуждение особенностей и возможных подходов к решению задачи обнаружения пространственных объектов, наблюдаемых в аппликативной

смеси с известной реализацией фона, которая является выборкой из случайного гауссовского поля с заданными статистическими характеристиками.

Обнаружение подвижных объектов. Как указывалось выше, использованное в [1, 2] допущение о наличии у наблюдателя информации о пространственно-яркостной структуре участка фона, расположенного под объектом, не согласуется с практикой обнаружения неподвижных пространственных объектов. Однако при обнаружении подвижных объектов такое допущение становится вполне обоснованным. Вопросы обнаружения подвижных пространственных объектов, наблюдаемых в аппликативной смеси с фоном, рассматриваются в [5, 6] и в других работах. Их особенностью является исследование случая прямолинейного движения объекта с неизвестным вектором скорости. Также предполагается фиксированным время наблюдения. За пределами внимания авторов этих работ остался формальный аппарат [7], соответствующий существованию задач обнаружения и оценки параметров подвижных объектов по их изображениям и позволяющий снять ограничения, накладываемые в [5, 6] и в других работах на характер движения объекта и время наблюдения. С учётом этого синтезируем структуру квазиоптимального устройства совместного обнаружения и оценки параметров (положения) подвижного объекта, в том числе имея ввиду и конкретизацию на этой основе особенностей интерпретации существующих подходов к решению задачи обнаружения неподвижных объектов.

Итак, пусть наблюдается изображение объекта в аппликативной смеси с фоном:

$$u(\mathbf{x}, t) = \mu d(\mathbf{x} - \boldsymbol{\nu}) s(\mathbf{x} - \boldsymbol{\nu}) + (1 - \mu d(\mathbf{x} - \boldsymbol{\nu})) p(\mathbf{x}) + n(\mathbf{x}, t). \quad (1)$$

Здесь $s(\mathbf{x}) = s(x_1, x_2)$ — известная функция вектора пространственных переменных $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$, описывающая пространственно-яркостную структуру объекта в выпуклой области L его существования; $d(\mathbf{x})$ — функция окна, равная 1 в области L и 0 всюду за её пределами; $p(\mathbf{x})$ — известная реализация случайного гауссовского поля, описывающего фон и заданного в области анализа M ($M \supset L$); $n(\mathbf{x}, t)$ — пространственно-временной шум наблюдений, в частном случае δ -коррелированный; $\boldsymbol{\nu} = (\nu_1, \nu_2)$ — вектор сдвигов изображения объекта; μ — параметр обнаружения, принимающий значение 1, когда объект на изображении есть, и 0, когда объект отсутствует. Закон перемещения объекта в общем случае задаётся системой дифференциальных уравнений относительно элементов вектора сдвигов:

$$\begin{aligned} \dot{\nu}_1 &= f_1(\nu_1, \nu_2, t) + g_{11}(t) n_{01}(t); \\ \dot{\nu}_2 &= f_2(\nu_1, \nu_2, t) + g_{22}(t) n_{02}(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где n_{01}, n_{02} — процессы формирующего белого шума с единичной спектральной плотностью. Систему (2) необходимо дополнить очевидным дифференциальным уравнением для параметра обнаружения

$$\dot{\mu} = 0. \quad (3)$$

Требуется синтезировать оптимальное (квазиоптимальное) решающее устройство оценки параметров ν_1, ν_2, μ по результатам наблюдения текущего изображения $u(\mathbf{x}, t)$. Такой синтез может быть выполнен путём решения соответствующего уравнения Стратоновича, распространённого в [7] на случай исследования вопросов обработки изображений (в общем случае n -мерных пространственно-временных полей). Уравнение Стратоновича является дифференциальным уравнением в частных производных относительно апостериорной плотности распределения подлежащих оценке параметров. В общем случае оно не поддаётся строгому аналитическому решению. Решение уравнения Стратоновича

в квазилинейном (гауссовском) приближении, когда апостериорная плотность вероятности аппроксимируется функцией, содержащей только математические ожидания и корреляционные моменты оценок параметров, сводится к решению следующей системы дифференциальных уравнений [8], определяющей оптимальные по критерию максимального правдоподобия оценки параметров $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$:

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\lambda}_i}{dt} &= f_i(\hat{\lambda}, t) + \sum_{j=1}^3 r_{ij}(t) \frac{\partial F(\hat{\lambda}, t)}{\partial \lambda_j}; \\ \frac{dr_{ij}(t)}{dt} &= \sum_{k=1}^3 \left[\frac{\partial f_j(\hat{\lambda}, t)}{\partial \lambda_k} r_{ik}(t) + \frac{\partial f_i(\hat{\lambda}, t)}{\partial \lambda_k} r_{jk}(t) \right] + \\ &+ \sum_{k=1}^3 g_{ik}(t) g_{jk}(t) + \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 r_{ik}(t) r_{jl}(t) \frac{\partial^2 F(\hat{\lambda}, t)}{\partial \lambda_k \partial \lambda_l}. \end{aligned} \quad (4)$$

В этих выражениях члены с нижними индексами, которые отсутствуют в выражениях (2), (3), полагаются равными 0, а для упрощения записи последующих выражений введено новое обозначение для вектора оцениваемых параметров: $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (\nu_1, \nu_2, \mu)$. Если белый пространственно-временной шум наблюдений $n(\mathbf{x}, t)$ имеет корреляционную функцию $N\delta(\Delta\mathbf{x})\delta(\Delta t)$, то в соответствии с [7] производная по времени логарифма функционала правдоподобия $F(\lambda, t)$, входящая в (4), принимает вид

$$F(\lambda, t) = -\frac{1}{2N} \iint_M (u(\mathbf{x}, t) - c(\mathbf{x}, \lambda))^2 d\mathbf{x}. \quad (5)$$

Причём, как это следует из (1), здесь

$$\begin{aligned} c(\mathbf{x}, \lambda) &= \lambda_3 d(x_1 - \lambda_1, x_2 - \lambda_2) s(x_1 - \lambda_1, x_2 - \lambda_2) + \\ &+ (1 - \lambda_3 d(x_1 - \lambda_1, x_2 - \lambda_2)) p(x_1, x_2). \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, выражения (4)–(6) представляют в общем виде структуру квазиоптимального устройства совместного обнаружения и оценки координат подвижного пространственного объекта, изображение которого образует аппликативную смесь со случайным гауссовским фоном. Причём решение об обнаружении объекта может приниматься, когда оценка $\hat{\lambda}_3$ при наблюдаемой реализации фона будет удовлетворять неравенству $\hat{\lambda}_3 > 0,5$. Оценка показателей эффективности этого устройства, например характеристик обнаружения, при работе по ансамблю реализаций фона с заданными статистическими характеристиками может быть выполнена методами имитационного моделирования. При этом в каждом акте моделирования при наборе статистики устройству должны предъявляться для обнаружения различные реализации фона.

Дальнейшая детализация полученных выражений и определение методами имитационного моделирования количественных оценок показателей обнаружения для какой-либо конкретной ситуации не связаны с преодолением принципиальных трудностей и выходят за рамки данной работы. Здесь же мы остановимся на анализе основных особенностей обработки изображений при обнаружении и оценке параметров объекта, определяемых

последним слагаемым правой части первого уравнения системы (4), а точнее — производной $\partial F(\boldsymbol{\lambda}, t)/\partial \lambda_i$. Для неэнергетических параметров $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, каковыми они являются в рассматриваемом случае, выражение, например, для $\partial F(\boldsymbol{\lambda}, t)/\partial \lambda_2$ принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(\boldsymbol{\lambda}, t)}{\partial \lambda_2} &= \frac{1}{N} \iint_M u(\mathbf{x}, t) \frac{\partial c(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})}{\partial \lambda_2} d\mathbf{x} = \\ &= \frac{1}{N} \iint_M u(\mathbf{x}, t) \left[\lambda_3 \frac{\partial d(\mathbf{x} - \boldsymbol{\lambda})}{\partial \lambda_2} [s(\mathbf{x} - \boldsymbol{\lambda}) - p(\mathbf{x})] + \lambda_3 d(\mathbf{x} - \boldsymbol{\lambda}) \frac{\partial s(\mathbf{x} - \boldsymbol{\lambda})}{\partial \lambda_2} \right] d\mathbf{x}. \end{aligned} \quad (7)$$

Если $x_2 = v_u(x_1)$ — уравнение верхней (выпуклой) части границы объекта, а $x_2 = v_d(x_1)$ — уравнение нижней (вогнутой) части границы, то частная производная $\partial d(\mathbf{x} - \boldsymbol{\lambda})/\partial \lambda_2$ запишется как

$$\frac{\partial d(\mathbf{x} - \boldsymbol{\lambda})}{\partial \lambda_2} = \begin{cases} \delta(x_2 - v_u(x_1 - \lambda_1)) & \text{(на верхней границе),} \\ 0 & \text{(всюду, кроме границ),} \\ -\delta(x_2 - v_d(x_1 - \lambda_1)) & \text{(на нижней границе).} \end{cases} \quad (8)$$

С учётом (8) и свойств входящих в это выражение δ -функций (7) преобразуется к следующему виду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(\boldsymbol{\lambda}, t)}{\partial \lambda_2} &= \frac{\lambda_3}{N} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} u(x_1, v_u(x_1 - \lambda_1), t) [s(x_1 - \lambda_1, v_u(x_1 - \lambda_1) - \lambda_2) - p(x_1, v_u(x_1 - \lambda_1))] dx_1 + \\ &+ \frac{\lambda_3}{N} \int_{x_{\max}}^{x_{\min}} u(x_1, v_d(x_1 - \lambda_1), t) [s(x_1 - \lambda_1, v_d(x_1 - \lambda_1) - \lambda_2) - p(x_1, v_d(x_1 - \lambda_1))] dx_1 + \\ &+ \frac{\lambda_3}{N} \iint_M u(\mathbf{x}) d(\mathbf{x} - \boldsymbol{\lambda}) \frac{\partial s(\mathbf{x} - \boldsymbol{\lambda})}{\partial \lambda_2} d\mathbf{x}. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь x_{\min}, x_{\max} — граничные по оси x_1 точки области определения $s(\mathbf{x})$ (области L). Сумма первых двух интегралов в (9) есть не что иное, как криволинейный интеграл по контуру объекта от произведения текущего изображения и разности сигналов объекта и фона на границе объекта. Последний интеграл в (9) определяет вклад в качество оценок внутренней структуры поля яркости объекта. Как можно заметить, он соответствует случаю оценки местоположения объекта при отсутствии случайного фона.

Выражение для $\partial F(\boldsymbol{\lambda}, t)/\partial \lambda_1$, также фигурирующее в (4), представим в виде, аналогичном (9). И наконец $\partial F(\boldsymbol{\lambda}, t)/\partial \lambda_3$ запишется как

$$\frac{\partial F(\boldsymbol{\lambda}, t)}{\partial \lambda_3} = \frac{1}{N} \iint_M u(\mathbf{x}, t) d(\mathbf{x} - \boldsymbol{\lambda}) [s(\mathbf{x} - \boldsymbol{\lambda}) - p(\mathbf{x})] d\mathbf{x}. \quad (10)$$

При этом необходимо отметить, что хотя выражение (10) и не содержит криволинейного интеграла, тем не менее оценка параметра обнаружения будет зависеть от перепада яркости изображения на границе объекта и фона. Действительно, из (4) следует, что дифференциальное уравнение, определяющее оценку λ_3 , также зависит от $\partial F(\boldsymbol{\lambda}, t)/\partial \lambda_1$ и $\partial F(\boldsymbol{\lambda}, t)/\partial \lambda_2$. Таким образом, полученные выражения указывают на существенную зависимость качества оценок параметров сдвига и характеристик обнаружения от информации, содержащейся в перепаде яркости наблюдаемой сцены на границе объекта с фоном. А это хорошо согласуется и с очевидными физическими представлениями о том, что эффективность обнаружения объектов, наблюдаемых человеком-оператором в аппликативной смеси со случайным фоном, должна существенно зависеть от перепада яркостей на границе объекта с фоном, имеющего место в данном конкретном акте наблюдения.

Обнаружение неподвижных объектов. При обнаружении неподвижных пространственных объектов с точно известным местоположением поле яркости фона, находящееся под объектом, недоступно наблюдению, вследствие чего полученные результаты на этот случай не распространяются. Как отмечалось выше, адекватная физическим представлениям и потребностям практических приложений постановка и тем более решение задачи обнаружения пространственного объекта на аппликативном фоне в настоящее время отсутствуют. Полученные в работах [1–4] результаты по определению вероятности обнаружения таких объектов могут интерпретироваться только как некоторые оценки этой вероятности. Остановимся на рассмотрении особенностей трактовки таких оценок.

Вполне очевидно, что качество алгоритма обнаружения в общем случае определяется полнотой учёта доступной информации о характеристиках наблюдаемых объектов, фонов и шума при решении задачи синтеза этого алгоритма. Оценки снизу характеристик обнаружения формируются тогда, когда в постановке соответствующей задачи синтеза обнаружителя используется не в полном объёме вся доступная наблюдателю информация. Так, к этому классу оценок применительно к рассматриваемой задаче принадлежат оценки типа [3, 4], т. е. оценка снизу значений вероятности обнаружения полностью известного неподвижного объекта на аппликативном случайном фоне может быть получена, если предположить, что известны только статистические характеристики фона, но не вид его конкретной реализации, окружающей объект в каждом акте наблюдения, доступной наблюдателю и позволяющей, в частности, экстраполировать значения фона на область, замещённую объектом. В этом случае задача обнаружения объекта при точно известном его местоположении ставится следующим образом. Наблюдаемая в области L аппликативная смесь сигнала объекта с фоном имеет вид

$$u(\mathbf{x}) = \begin{cases} s(\mathbf{x}) + n(\mathbf{x}), & \mathbf{x} \in L \quad (\text{гипотеза } H_1), \\ p(\mathbf{x}) + n(\mathbf{x}), & \mathbf{x} \in L \quad (\text{гипотеза } H_0). \end{cases} \quad (11)$$

В (11) $n(\mathbf{x})$ — шум наблюдений с корреляционной функцией $R_n(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = N\delta(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2)$; $p(\mathbf{x})$ — некоторая случайная реализация фона, относительно которой известно только то, что она принадлежит к ансамблю гауссовских фонов с известной корреляционной функцией $R_p(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$. Тогда функционал правдоподобия для гипотезы H_1 с точностью до несущественного постоянного множителя может быть представлен следующим образом [8, 9]:

$$F_1 = \exp \left(-\frac{1}{2N} \int_L \int_L (u^2(\mathbf{x}) - 2s(\mathbf{x})u(\mathbf{x}) + s^2(\mathbf{x})) d\mathbf{x} \right).$$

В соответствии с [9] функционал правдоподобия для гипотезы H_0 имеет вид

$$F_0 = \exp \left(-\frac{1}{2} \iint_L u(\mathbf{x})v(\mathbf{x})d\mathbf{x} \right),$$

где

$$v(\mathbf{x}) = \frac{1}{N} \left(u(\mathbf{x}) - \int_L u(\mathbf{y})h(\mathbf{x}, \mathbf{y})d\mathbf{y} \right) = \frac{1}{N} (u(\mathbf{x}) - v_1(\mathbf{x})).$$

Здесь $h(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ — это весовая функция оптимального пространственного винеровского фильтра для случайного фона, наблюдаемого в аддитивном пространственном белом шуме. Причём эта весовая функция определяется решением интегрального уравнения

$$Nh(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \iint_L h(\mathbf{x}, \mathbf{z})R_p(\mathbf{z}, \mathbf{y})d\mathbf{z} = R_p(\mathbf{x}, \mathbf{y}). \quad (12)$$

В свою очередь, $v_1(\mathbf{x}) = \int_L u(\mathbf{y})h(\mathbf{x}, \mathbf{y})d\mathbf{y}$ есть не что иное, как реакция этого винеровского фильтра на наблюдаемую реализацию $u(\mathbf{x})$. Теперь после очевидных преобразований решающее правило для обнаружения объекта, следующее из логарифма отношения функционалов правдоподобия ($\ln(F_1/F_0)$), запишем в виде

$$\iint_L u(\mathbf{x})(2s(\mathbf{x}) - v_1(\mathbf{x}))d\mathbf{x} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \Pi.$$

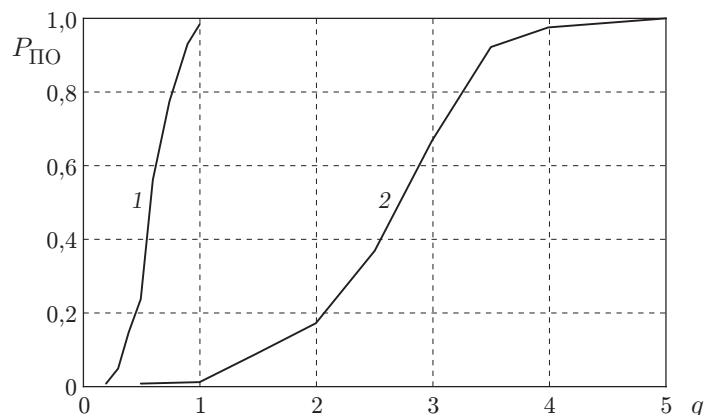
Когда интервал корреляции фона меньше линейных размеров области интегрирования L , пределы интегрирования в (12) можно заменить бесконечными. Преобразовав (12) по Фурье, нетрудно определить передаточную функцию линейного винеровского фильтра $F_h(v_1, v_2)$, соответствующую весовой функции $h(\mathbf{x}, \mathbf{y})$. Для фона с корреляционной функцией вида

$$R_p(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = \sigma^2 \exp \left(-\frac{1}{\delta_1} |\Delta x_1| - \frac{1}{\delta_2} |\Delta x_2| \right) \quad (13)$$

получим

$$F_h(v_1, v_2) = \frac{4\sigma^2 \delta_1 \delta_2}{N(\delta_1^2 v_1^2 + 1)(\delta_2^2 v_2^2 + 1) + 4\sigma^2 \delta_1 \delta_2}. \quad (14)$$

Расчёты оценок снизу вероятности правильного обнаружения ($P_{\text{ПО}}$) по критерию Неймана — Пирсона выполнялись методом имитационного моделирования. При этом корреляционная функция фона и передаточная функция оптимального фильтра задавались выражениями (13), (14). Рассматривалась задача обнаружения равнояркого квадрата с размером сторон $a \times b$ и яркостью B . На рисунке кривая 2 представляет рассчитанные по полученным выражениям зависимости оценки снизу $P_{\text{ПО}}$ от отношения сигнал/шум $q = \sqrt{B^2 ab/N}$. Расчёты выполнялись при $a = b = 100$ пикселей, $2\delta_1/a = 2\delta_2/b = 0,1$, $\sigma/B = 5$ и при вероятности ложной тревоги ($P_{\text{ЛТ}}$), равной 0,001. При моделировании порог обнаружения для заданной $P_{\text{ЛТ}}$ фиксировался по 10000 реализаций случайных полей, в то время как $P_{\text{ПО}}$ определялась по 1000 реализаций.



Граничные оценки вероятности правильного обнаружения: кривая 1 — оценка сверху, 2 — оценка снизу

Оценка сверху значений вероятности обнаружения объекта на аппликативном случайном фоне может быть получена, если предположить, что точно известен не только сигнал объекта $s(\mathbf{x})$, но и конкретная реализация участка фона $p(\mathbf{x})$, замещённого объектом, имеющая место в данном акте наблюдения. В этом случае наблюдаемая аппликативная смесь сигнала объекта с фоном также представляется выражением (11). Однако в нём реализация фона $p(\mathbf{x})$ полагается априори точно известной. Решающее правило для этого случая имеет следующий вид:

$$\iint_L u(\mathbf{x})(s(\mathbf{x}) - p(\mathbf{x}))d\mathbf{x} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \Pi. \quad (15)$$

При любом критерии обнаружения порог (Π) вследствие его зависимости от величины интеграла $\int p^2(\mathbf{x})d\mathbf{x}$ должен изменяться с изменением реализации фона $p(\mathbf{x})$. Однако, во-первых, если интервал корреляции фона существенно меньше линейных размеров обнаруживаемого объекта, то флуктуациями члена $\int p^2(\mathbf{x})d\mathbf{x}$ в силу их малости можно пренебречь. Во-вторых, поскольку мы предполагаем получить характеристики обнаружения, соответствующие заданному множеству реализаций фона, то вполне оправданным является использование фиксированного порога $P_{\text{ДТ}} = 0,001$ на рассматриваемом множестве реализаций фона. Именно такой порог берётся при получении количественных характеристик вероятности обнаружения в данном случае.

Расчёты вероятности правильного обнаружения выполнялись с учётом критерия Неймана — Пирсона на имитационной модели, реализующей решающее правило (15). Причём исходные данные при моделировании полагались аналогичными приведённым выше. Результаты оценки сверху вероятности правильного обнаружения представляет кривая 1 на рисунке. Различия между оценками снизу и сверху вероятности обнаружения хорошо иллюстрируют кривые рисунка. Ломаный характер кривых обусловлен ограниченным объёмом статистики, полученной при моделировании.

Заключение. Таким образом, путём приближённого решения уравнения Стратоновича, распространённого на случай обработки изображений, синтезирована структура квазиоптимального устройства совместного обнаружения и оценки положения подвижного перемещающегося по случайной траектории объекта, наблюдаемого в аппликативной смеси со случайным подстилающим фоном. При этом показано, что алгоритм обработки наблюдаемого изображения включает операцию вычисления криволинейного интеграла по замкнутому контуру, ограничивающему фигуру объекта. Однако синтезированное устройство

не применимо к решению задачи обнаружения неподвижного пространственного объекта даже при априори известном его местоположении. Существующие подходы к решению данной задачи фактически определяют только оценки сверху и снизу вероятности обнаружения. Вопрос о решении задачи обнаружения неподвижного пространственного объекта, наблюдаемого в аппликативной смеси со случайным фоном, в рамках теории статистических решений остаётся открытым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бычков А. А., Понькин В. А.** Обнаружение изображений пространственно-протяженных затеняющих фон объектов // *Автометрия*. 1992. № 4. С. 33–40.
2. **Иванкин Е. Ф., Понькин В. А.** Теоретические основы защиты информации об объектах наблюдения. М.: Горячая линия-Телеком, 2008. 448 с.
3. **Трифонов А. П., Прибытков Ю. Н.** Обнаружение случайных изображений пространственно-протяженных объектов, затеняющих фон // *Автометрия*. 2000. № 4. С. 14–22.
4. **Трифонов А. П., Прибытков Ю. Н.** Обнаружение квазидетерминированного изображения при наличии фона с неизвестными параметрами // *Автометрия*. 2002. **38**, № 4. С. 19–31.
5. **Трифонов А. П., Куцов Р. В.** Обнаружение движущегося с произвольной скоростью объекта при неизвестных интенсивностях изображения и фона // *Автометрия*. 2006. **42**, № 4. С. 3–16.
6. **Трифонов А. П., Куцов Р. В.** Обнаружение и оценка скорости движения неоднородного пространственно-протяженного объекта по изображению // *Теория и системы управления*. 2008. № 2. С. 115–125.
7. **Южно П. М.** Траекторно-пространственная фильтрация в корреляционно-экстремальных системах // *АиТ*. 1992. № 7. С. 79–85.
8. **Тихонов В. И., Кульман Н. К.** Нелинейная фильтрация и квазикогерентный прием сигналов. М.: Сов. радио, 1975. 704 с.
9. **Ван Трис Г.** Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 3: Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1977. 664 с.

Поступила в редакцию 28 декабря 2011 г.
