РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

АВТОМЕТРИЯ

2005, том 41, № 1

АНАЛИЗ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 621.391

А. П. Трифонов, Р. В. Куцов

(Воронеж)

ОБНАРУЖЕНИЕ ДВИЖУЩЕГОСЯ ПРОСТРАНСТВЕННО ПРОТЯЖЕННОГО ОБЪЕКТА НА ФОНЕ С НЕИЗВЕСТНОЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ*

Выполнены синтез и анализ квазиправдоподобного и максимально правдоподобного алгоритмов обнаружения изображения движущегося пространственно протяженного объекта с неизвестной интенсивностью при наличии фона с неизвестной интенсивностью для аппликативной модели взаимодействия полезного изображения и фона.

В последнее время существенно возросла разрешающая способность систем дистанционного наблюдения, что стимулировало развитие теории обнаружения объектов по их изображениям с учетом затенения фона. Вопросы обнаружения пространственно протяженных объектов (ППО) рассматриваются в [1–5] и других работах. В [2, 3] показано, что использование аддитивной модели взаимодействия ППО и фона может приводить к недостоверным результатам. В [2–4] на основе аппликативной модели, учитывающей эффекты затенения объектом участка фона, получены характеристики обнаружения неподвижного ППО. В работе [5] исследованы потенциальные возможности обнаружения и маскирования средствами камуфляжа движущегося детерминированного ППО, наблюдаемого на неравномерном детерминированном фоне. Однако на практике часто возникают ситуации, когда параметры изображения движущегося ППО и неподвижного фона априори неизвестны.

Целью работы является синтез и анализ квазиправдоподобного и максимально правдоподобного алгоритмов обнаружения движущегося ППО по его изображению с неизвестными параметрами при наличии фона с неизвестными параметрами.

Пусть в двумерной области   в течение интервала времени $[0, T]$ доступна наблюдению реализация гауссовского случайного поля $x(\mathbf{r}, t)$, где $\mathbf{r}$ (r_1, r_2) – радиус-вектор точки на плоскости, принадлежащей , а t – время. Положим [5], что при гипотезе H_1 поле $x(\mathbf{r}, t)$ содержит изображения

* Работа выполнена при поддержке CRDF и Министерства науки и образования РФ (проект № VZ-010-00).

движущегося со скоростью V объекта $s(\mathbf{r}\quad \mathbf{V}t)$, неподвижного фона $\quad(\mathbf{r})$ и аддитивный гауссовский пространственно-временной белый шум $n(\mathbf{r},t)$ с нулевым математическим ожиданием и корреляционной функцией

$$K_n(\mathbf{r}_1,t_1;\,\mathbf{r}_2,t_2)\quad \langle n(\mathbf{r}_1,t_1)\,n(\mathbf{r}_2,t_2)\rangle\quad N_0\quad(\mathbf{r}_1\quad \mathbf{r}_2)\quad(t_1\quad t_2)\big/2,$$

где N_0 – односторонняя спектральная плотность белого шума.

В соответствии с аппликативной моделью, учитывающей эффекты затенения объектом участка фона, полагаем, что изображение объекта занимает часть $\quad_s$ области $\quad$, а фоновое излучение формируется оставшейся частью области наблюдения. При отсутствии объекта фон занимает всю область наблюдения. Тогда в течение интервала времени $[0,T]$ наблюдению доступна реализация изображения в картинной плоскости

$$x(\mathbf{r},t)\quad \begin{array}{l} \quad(\mathbf{r};\mathbf{b}_0)\quad n(\mathbf{r},t):H_0;\\ s(\mathbf{r}\quad \mathbf{V}t;\mathbf{a}_0)I_s(\mathbf{r}\quad \mathbf{V}t)\quad\ (\mathbf{r};\mathbf{b}_0)[1\quad I_s(\mathbf{r}\quad \mathbf{V}t)]\quad n(\mathbf{r},t):H_1,\end{array} \tag{1}$$

где $\mathbf{a}_0$ и $\mathbf{b}_0$ – истинные значения векторов неизвестных параметров полезного изображения и фона соответственно; $I_s(\mathbf{r})\quad 1$ при $\mathbf{r}\quad\ \ _s$ и $I_s(\mathbf{r})\quad 0$ при $\mathbf{r}\quad\ \ _s$ – индикаторная функция, описывающая форму изображения объекта.

Для решения задачи проверки гипотезы H_1 против альтернативы H_0 необходимо формировать логарифм функционала отношения правдоподобия (ФОП). В работах [6–9] приведены выражения для ФОП в случаях, когда при одной из гипотез наблюдаемое поле представляет собой реализацию гауссовского белого шума. Введем вспомогательную гипотезу H, при которой $x(\mathbf{r},t)\quad n(\mathbf{r},t)$. Очевидно, что ФОП при проверке гипотезы H_1 против H_0 есть отношение ФОП при проверке гипотез H_1 и H_0 против простой альтернативы H, т. е. $\quad[H_1\,|\,H_0]\qquad[H_1\,|\,H]\,/\quad[H_0\,|\,H]$. Следовательно, логарифм ФОП $L(\mathbf{a},\mathbf{b})\quad \ln\quad[H_1\,|\,H_0]\quad L_1(\mathbf{a},\mathbf{b})\quad L_0(\mathbf{b})$, где

$$L_0(\mathbf{b})\quad \ln\quad[H_0\,|\,H]\quad \frac{2}{N_0}\ {}_0^T\quad x(\mathbf{r},t)\quad(\mathbf{r};\mathbf{b})d\mathbf{r}dt\quad \frac{1}{N_0}\ {}_0^T\quad\ {}^2(\mathbf{r};\mathbf{b})d\mathbf{r}dt, \tag{2}$$

$$L_1(\mathbf{a},\mathbf{b})\quad \ln\quad[H_1\,|\,H]$$

$$\frac{2}{N_0}\ {}_0^T\quad x(\mathbf{r},t)\{s(\mathbf{r}\quad \mathbf{V}t;\mathbf{a})I_s(\mathbf{r}\quad \mathbf{V}t)\quad\ (\mathbf{r};\mathbf{b})[1\quad I_s(\mathbf{r}\quad \mathbf{V}t)]\}d\mathbf{r}dt$$

$$\frac{1}{N_0}\ {}_0^T\quad \{s^2(\mathbf{r}\quad \mathbf{V}t;\mathbf{a})I_s(\mathbf{r}\quad \mathbf{V}t)\quad\ {}^2(\mathbf{r};\mathbf{b})[1\quad I_s(\mathbf{r}\quad \mathbf{V}t)]\}d\mathbf{r}dt \tag{3}$$

– логарифмы ФОП при проверке гипотез H_0 и H_1 против альтернативы H соответственно. Тогда

$$L(\mathbf{a},\mathbf{b})\quad \frac{2}{N_0}\ {}_0^T\quad x(\mathbf{r},t)[s(\mathbf{r}\quad \mathbf{V}t;\mathbf{a})\quad\ (\mathbf{r};\mathbf{b})]I_s(\mathbf{r}\quad \mathbf{V}t)d\mathbf{r}dt$$

$$\frac{1}{N_0}\ {}_0^T\quad [s^2(\mathbf{r}\quad \mathbf{V}t;\mathbf{a})\quad\ {}^2(\mathbf{r};\mathbf{b})]I_s(\mathbf{r}\quad \mathbf{V}t)d\mathbf{r}dt.$$

Если истинные значения параметров полезного изображения $\mathbf{a}_0$ и фона $\mathbf{b}_0$ априори известны, то решение о наличии объекта в области наблюдения выносится на основе сравнения величины $L \quad L(\mathbf{a}_0, \mathbf{b}_0)$ с порогом h, определяемым выбранным критерием оптимальности [6–10]:

$$L \overset{H_1}{\underset{H_0}{\quad}} h. \qquad (4)$$

При неизвестных истинных значениях параметров изображения и фона возможно применение квазиправдоподобного обнаружителя (КПО) [7]. Для синтеза КПО вместо истинных значений $\mathbf{a}_0, \mathbf{b}_0$ используются ожидаемые (прогнозируемые) значения неизвестных параметров $\mathbf{a}_*, \mathbf{b}_*$. Решение о наличии или отсутствии объекта в области наблюдения выносится путем сравнения величины $L_* \quad L(\mathbf{a}_*, \mathbf{b}_*)$ с порогом в соответствии с правилом (4). В общем случае $\mathbf{a}_* \quad \mathbf{a}_0$, $\mathbf{b}_* \quad \mathbf{b}_0$, однако при $\mathbf{a}_* \quad \mathbf{a}_0$, $\mathbf{b}_* \quad \mathbf{b}_0$ КПО переходит в оптимальный обнаружитель. Определим, в какой степени рассогласование между истинными $\mathbf{a}_0, \mathbf{b}_0$ и прогнозируемыми $\mathbf{a}_*, \mathbf{b}_*$ значениями параметров изображения объекта и фона ухудшает характеристики обнаружения.

Обычно эффективность алгоритма обнаружения характеризуется величинами вероятностей ложной тревоги и пропуска объекта (или вероятностью правильного обнаружения $P_0 \quad 1 \quad$). Поскольку логарифм ФОП представляет собой линейное преобразование гауссовского поля, величина L_* подчиняется гауссовскому закону распределения. Отсюда

$$_* \quad 1 \quad [(h \quad m_0)/ \quad _0]; \qquad _* \quad [(h \quad m_1)/ \quad _1], \qquad (5)$$

где $(x) \quad {}^{x} \exp(\quad y^2/2)dy/\sqrt{2 \quad}$ – интеграл вероятности; $m_i \quad \langle L_* \mid H_i \rangle$; ${}^2_i$ $\langle L_*^2 \mid H_i \rangle \quad m_i^2$. Выполняя усреднение, находим

$$m_0 \quad \frac{2}{N_0} {}_0^T \quad (\mathbf{r}; \mathbf{b}_0)[s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t; \mathbf{a}_*) \quad (\mathbf{r}; \mathbf{b}_*)] I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t) d\mathbf{r}dt$$

$$\frac{1}{N_0} {}_0^T \quad [s^2(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t; \mathbf{a}_*) \quad {}^2(\mathbf{r}; \mathbf{b}_*)] I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t) d\mathbf{r}dt,$$

$$m_1 \quad \frac{2}{N_0} {}_0^T \quad s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t; \mathbf{a}_0)[s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t; \mathbf{a}_*) \quad (\mathbf{r}; \mathbf{b}_*)] I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t) d\mathbf{r}dt$$

$$\frac{1}{N_0} {}_0^T \quad [s^2(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t; \mathbf{a}_*) \quad {}^2(\mathbf{r}; \mathbf{b}_*)] I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t) d\mathbf{r}dt,$$

$${}^2_0 \quad {}^2_1 \quad {}^2 \quad \frac{2}{N_0} {}_0^T \quad [s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t; \mathbf{a}_*) \quad (\mathbf{r}; \mathbf{b}_*)]^2 I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t) d\mathbf{r}dt.$$

Положим, что используется критерий оптимальности Неймана – Пирсона. Тогда при заданной вероятности ложной тревоги $_*$ порог $h \quad h \quad m_0 \quad _0 q_1$, где $q_1 \quad \mathrm{arc} \quad (1 \quad)$ (здесь $\mathrm{arc} \quad (\ )$ – функция, обратная интегралу вероятности). Подставляя порог h в выражение для вероятности пропуска объекта, получим $_* \quad 1 \qquad (q_* \quad q_1 \qquad)$, где

$$q_*^2 \qquad \left(\frac{m_1 \quad m_0}{\qquad}\right)^2$$

$$\frac{2}{N_0}\frac{\left(\int_0^T [s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t;\, \mathbf{a}_0) \qquad (\mathbf{r};\, \mathbf{b}_0)][s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t;\, \mathbf{a}_*) \qquad (\mathbf{r};\, \mathbf{b}_*)]I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)d\mathbf{r}dt\right)^2}{\int_0^T [s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t;\, \mathbf{a}_*) \qquad (\mathbf{r};\, \mathbf{b}_*)]^2 I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)d\mathbf{r}dt}$$

– параметр обнаружения при использовании КПО. В случае оптимального обнаружителя (при известных значениях $\mathbf{a}_0, \mathbf{b}_0$) для заданной вероятности ложной тревоги $_0$ вероятность пропуска объекта $_0 \quad 1 \qquad (q_0 \quad q_1 \qquad)$, где параметр обнаружения [5]

$$q_0^2 \quad \frac{2}{N_0}\int_0^T [s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t;\mathbf{a}_0) \qquad (\mathbf{r};\mathbf{b}_0)]^2 I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)d\mathbf{r}dt \quad \frac{z^2}{z_F^2}(z_F^2 \quad 2 \;\; z_F \quad 1).$$

Здесь

$$z^2 \quad \frac{2}{N_0}\int_0^T s^2(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t;\mathbf{a}_0)I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)d\mathbf{r}dt \tag{6}$$

– отношение сигнал/шум (ОСШ) для изображения объекта;

$$z_F^2 \quad \frac{z^2}{z^2} \quad \int_0^T s^2(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t;\mathbf{a}_0)I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)d\mathbf{r}dt \Big/ \int_0^T \; ^2(\mathbf{r};\mathbf{b}_0)I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)d\mathbf{r}dt \tag{7}$$

– отношение сигнал/фон (ОСФ);

$$z^2 \quad \frac{2}{N_0}\int_0^T \; ^2(\mathbf{r};\mathbf{b}_0)I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)d\mathbf{r}dt \tag{8}$$

– отношение фон/шум (ОФШ), а величина $\quad [0,1]$ определяет степень корреляции изображения объекта и фона в просмотренной области $_1$:

$$\frac{\int_0^T s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t;\,\mathbf{a}_0) \;\; (\mathbf{r};\,\mathbf{b}_0)I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)d\mathbf{r}dt}{\sqrt{\int_0^T s^2(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t;\,\mathbf{a}_0)I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)d\mathbf{r}dt \int_0^T \; ^2(\mathbf{r};\,\mathbf{b}_0)I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)d\mathbf{r}dt}}. \tag{9}$$

Положим, что область наблюдения и скорость движения объекта таковы, что за время T объект не пересекает границ области наблюдения. Тогда ОСШ (6) можно переписать в виде

$$z^2 \quad 2T \int_s s^2(\mathbf{r};\mathbf{a}_0)d\mathbf{r}\Big/N_0 \quad 2E_s\Big/N_0,$$

где $E_s \quad T \quad s^2(\mathbf{r};\mathbf{a}_0)d\mathbf{r}$ – энергия изображения объекта, наблюдаемая за время T.

При вычислении интеграла в (8) необходимо учесть, что следящее окно, описываемое функцией $I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)$, перемещается со временем, просматривая все новые участки фона, причем общая площадь просмотренного участка фона $\quad_1$ равна $S_1 \quad S_s \quad VTl$, где S_s – площадь объекта, V – модуль скорости движения объекта, l – размер объекта в направлении, перпендикулярном движению. Тогда величину интеграла в (8) приближенно можно оценить по формуле [5]

$$z^2 \quad \frac{2T}{N_0}\frac{S_s}{S_s \quad VTl} \quad {}^2(\mathbf{r};\mathbf{b}_0)\,d\mathbf{r}. \tag{10}$$

В силу монотонной зависимости вероятности обнаружения от величины параметра q, ухудшение качества обнаружения можно характеризовать отношением

$$\frac{q_0}{q_*} \quad \frac{1}{R}$$

$$\frac{\sqrt{\int_0^T [s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t;\mathbf{a}_*) \quad (\mathbf{r};\mathbf{b}_*)]^2 I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)\,d\mathbf{r}dt \int_0^T [s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t;\mathbf{a}_0) \quad (\mathbf{r};\mathbf{b}_0)]^2 I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)\,d\mathbf{r}dt}}{\int_0^T [s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t;\mathbf{a}_0) \quad (\mathbf{r})][s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t;\mathbf{a}_*) \quad (\mathbf{r};\mathbf{b}_*)]I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)\,d\mathbf{r}dt},$$

где R – коэффициент корреляции между пространственно-временными сигналами $[s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t;\mathbf{a}_*) \quad (\mathbf{r};\mathbf{b}_*)]I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)$ и $[s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t;\mathbf{a}_0) \quad (\mathbf{r};\mathbf{b}_0)]I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)$.

Рассмотрим величину в случае, когда сигнал и фон известны с точностью до амплитудных множителей $s(\mathbf{r};a_0) \quad a_0 s_1(\mathbf{r})$, $(\mathbf{r};b_0) \quad b_0 \, {}_1(\mathbf{r})$, в то время как ожидаются $s(\mathbf{r};a_*) \quad a_* s_1(\mathbf{r})$ и $(\mathbf{r};b_*) \quad b_* \, {}_1(\mathbf{r})$, где $s_1(\mathbf{r})$ и ${}_1(\mathbf{r})$ – известные функции, причем $\max s_1(\mathbf{r}) \quad 1$, $\max \, {}_1(\mathbf{r}) \quad 1$. Тогда

$$R^{\;1} \quad \sqrt{(1 \quad 2 \;\; z_F \quad z_F^2)(\;^2 \quad 2 \;\; z_F \quad z_F^2)}\Big/[\quad z_F(1 \quad) \quad z_F^2], \tag{11}$$

где

$$a_0 b_*/a_* b_0; \quad z_F^2 \quad a_0^2 T \quad s_1^2(\mathbf{r})\,d\mathbf{r}\Big/ \; b_0^2 \int_0^T {}_1^2(\mathbf{r}) I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)\,d\mathbf{r}dt \;;$$

$$\int_0^T s_1(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t) \; {}_1(\mathbf{r}) I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)\,d\mathbf{r}dt \Big/ \sqrt{T \quad s_1^2(\mathbf{r})\,d\mathbf{r} \int_0^T {}_1^2(\mathbf{r}) I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)\,d\mathbf{r}dt}. \tag{12}$$

Для сравнения качества работы различных алгоритмов обнаружения используем значение порогового ОСШ z_t, при котором вероятности ошибок ложной тревоги и пропуска объекта равны заданной величине $P \quad 1/2$ [6]:

$$P. \tag{13}$$

Решая систему уравнений (5), (13), находим пороговые ОСШ для оптимального z_{0t} и квазиправдоподобного z_{*t} алгоритмов:

$$z_{0t} \quad 2z_F \operatorname{arc} \quad (1 \quad P) \Big/ \sqrt{z_F^2 \quad 2 \quad z_F \quad 1}, \tag{14}$$

$$z_{*t} \quad 2z_F \operatorname{arc} \quad (1 \quad P) \sqrt{z_F^2 \quad 2 \quad z_F \quad {}^2} \Big/ [\quad (1 \quad) \quad z_F \quad z_F^2 \,]. \tag{15}$$

Проигрыш в величине порогового ОСШ для КПО по сравнению с оптимальным обнаружителем $\quad z_{*t} / z_{0t}$ определяется выражением (11), формально совпадающим с аналогичным выражением, полученным в [4], для неподвижного объекта.

Обнаружение движущегося объекта по его изображению с неизвестной интенсивностью при наличии детерминированного фона. С целью повышения качества обнаружения при неизвестных параметрах объекта и фона можно одновременно производить оценку неизвестных параметров. Заменяя значения неизвестных параметров на их оценки максимального правдоподобия, получаем обобщенный алгоритм максимального правдоподобия (АМП) [7–9].

Пусть неизвестна интенсивность объекта. Проводя максимизацию логарифмов ФОП (2), (3):

$$L_0(b) \quad \frac{2b}{N_0} {}_0^T \; x(\mathbf{r},t) \quad {}_1(\mathbf{r})\, d\mathbf{r}dt \quad \frac{b^2}{N_0} {}_0^T \quad {}_1^2(\mathbf{r})\, d\mathbf{r}dt, \tag{16}$$

$$\begin{aligned} L_1(a,b) \quad & \frac{2a}{N_0} {}_0^T \; x(\mathbf{r},t) s_1(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t) I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)\, d\mathbf{r}dt \\ & \frac{2b}{N_0} {}_0^T \; x(\mathbf{r},t) \quad {}_1(\mathbf{r})[1 \quad I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)]\, d\mathbf{r}dt \\ \frac{a^2}{N_0} {}_0^T \; & s_1^2(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t) I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)\, d\mathbf{r}dt \quad \frac{b^2}{N_0} {}_0^T \quad {}_1^2(\mathbf{r})[1 \quad I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)]\, d\mathbf{r}dt, \end{aligned} \tag{17}$$

по неизвестному параметру а [9], получим

$$\begin{aligned} L_{m1} \quad \sup_a L_1(a,b_0) \quad L_0(b_0) \quad & \frac{\left({}_0^T \; x(\mathbf{r},t) s_1(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t) I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)\, d\mathbf{r}dt \right)^2}{N_0 {}_0^T \; s_1^2(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t) I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)\, d\mathbf{r}dt} \\ & \frac{2b_0}{N_0} {}_0^T \; x(\mathbf{r},t) \quad {}_1(\mathbf{r}) I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)\, d\mathbf{r}dt \quad \frac{z^2}{2}, \end{aligned} \tag{18}$$

где

$$z^2 \quad \frac{2b_0^2}{N_0} \int_0^T \quad {}_1^2(\mathbf{r}) I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)\, d\mathbf{r}dt \qquad (19)$$

– ОФШ. В отличие от КПО и оптимального алгоритма обнаружения АМП является существенно нелинейным.

Решение о наличии или отсутствии объекта по-прежнему выносится на основе сравнения логарифма ФОП (18) с порогом h в соответствии с правилом (4). Найдем вероятности ложной тревоги и пропуска объекта (5). Для этого получим закон распределения достаточной статистики (18). Введем в рассмотрение стандартные гауссовские случайные величины

$$(p \quad m_p)/ \quad _p; \qquad (q \quad m_q)/ \quad _q, \qquad (20)$$

где

$$p \quad \frac{2a_0}{N_0} \int_0^T x(\mathbf{r},t) s_1(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t) I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)\, d\mathbf{r}dt;$$

$$q \quad \frac{2b_0}{N_0} \int_0^T x(\mathbf{r},t) \quad _1(\mathbf{r}) I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)\, d\mathbf{r}dt;$$

$m_p, m_q, \quad {}_p^2, \quad {}_q^2$ – математические ожидания и дисперсии случайных величин p и q. Величины , являются центрированными гауссовскими случайными величинами с единичной дисперсией и коэффициентом корреляции R . Подставляя в (18) реализацию наблюдаемых данных (1), запишем значения логарифма ФОП при гипотезах H_0 и H_1 с учетом обозначений (20):

$$L_{m1}[H_0] \quad (\quad z \quad)^2/2 \quad z \quad z^2/2,$$

$$L_{m1}[H_1] \quad (\quad z)^2/2 \quad z \quad z^2/2 \quad zz \quad ,$$

где

$$z^2 \quad \frac{2a_0^2}{N_0} \int_0^T s_1^2(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t) I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)\, d\mathbf{r}dt \quad \frac{2a_0^2 T}{N_0} \int_s s_1^2(\mathbf{r})\, d\mathbf{r}$$

– ОСШ, а определено в (12).

Записав совместную плотность вероятности величин , и пользуясь методом функционального преобразования плотностей вероятностей [6], найдем выражения для плотностей вероятности логарифма ФОП при обеих гипотезах. На их основе получим точные выражения для вероятностей ошибок ложной тревоги и пропуска объекта:

$$_1 \quad 1 \quad \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{Y_0(h)} \exp(\quad y^2/2) \quad \frac{(z \quad y) \quad \sqrt{2h \quad 2yz \quad z^2}}{\sqrt{1 \quad ^2}}$$

$$\frac{(z \quad y) \quad \sqrt{2h \quad 2yz \quad z^2}}{\sqrt{1 \quad ^2}} \quad dy, \tag{21}$$

$$_1 \quad \frac{1}{\sqrt{2}} \; _{Y_1(h)} \exp(\quad y^2/2) \quad \frac{z \quad y \quad \sqrt{2h \quad 2yz \quad 2 \; zz \quad z^2}}{\sqrt{1 \quad ^2}}$$

$$\frac{z \quad y \quad \sqrt{2h \quad 2yz \quad 2 \; zz \quad z^2}}{\sqrt{1 \quad ^2}} \quad dy, \tag{22}$$

где $Y_0(h) \quad (h/z \quad z \quad /2)$, $Y_1(h) \quad (h/z \quad z \quad z \quad /2)$.

Для определения порогового ОСШ z_m, при котором $_1 \quad _1 \quad P$, необходимо подставить выражения (21), (22) в систему уравнений

$$_1(z_m, h) \quad P; \qquad _1(z_m, h) \quad P. \tag{23}$$

Решить систему (23) затруднительно, поэтому получим приближенное выражение для z_m. С этой целью представим значение логарифма ФОП при гипотезе H_i, $i \quad 0,1$, в виде $L_{m1}[H_i] \quad w \quad _i$, где $w \quad ^2/2$ – негауссовская случайная величина с математическим ожиданием $m_w \quad 1/2$ и дисперсией $^2_w \quad 1/2$, а $_i$ – гауссовские случайные величины с математическими ожиданиями

$$m_{\;0} \quad z^2(1 \quad ^2)/2; \qquad m_{\;1} \quad (z^2 \quad z^2 \quad 2 \; zz \quad)/2 \tag{24}$$

и дисперсиями

$$^2_{\;0} \quad 2m_{\;0}; \qquad ^2_{\;1} \quad 2m_{\;1}. \tag{25}$$

Если $z^2 \quad 1$, $z^2 \quad 1$, то $^2_w \quad \min(^2_{\;0}, \; ^2_{\;1})$, поэтому $L_{m1}[H_i] \quad 1/2 \quad _i$, а логарифм ФОП (18) можно приближенно считать гауссовской случайной величиной с математическими ожиданиями и дисперсиями

$$m_i \quad 1/2 \quad m_{\;i}; \qquad ^2_i \quad ^2_{\;i}. \tag{26}$$

Используя выражения (24)–(26), находим гауссовские аппроксимации для вероятностей ошибок ложной тревоги и пропуска объекта:

$$_1 \quad _{1G} \quad 1 \quad \frac{2h \quad 1 \quad z^2(1 \quad ^2)}{2z \quad \sqrt{1 \quad ^2}} \; ;$$

$$_1 \quad _{1G} \quad \frac{2h \quad 1 \quad z^2 \quad z^2 \quad 2 \; zz}{2\sqrt{z^2 \quad z^2 \quad 2 \; zz}} \; . \tag{27}$$

Подставляя (27) в систему уравнений (23) с учетом соотношения $z \quad z/z_F$ и решая ее относительно z_m, находим выражение для порогового ОСШ в гауссовском приближении: $z_m \quad z_{1G}$, где

$$z_{1G} \quad \frac{2z_F \,\mathrm{arc} \quad (1 \quad P) \sqrt{1 \quad ^2} \quad \sqrt{z_F^2 \quad 2 \quad z_F \quad 1}}{[(z_F \quad)^2 \quad 2(1 \quad ^2)]}. \tag{28}$$

Точность формулы (28) растет с уменьшением вероятности ошибки P, т. е. с ростом порогового ОСШ.

Проигрыш в пороговом ОСШ для АМП в гауссовском приближении по сравнению с пороговым ОСШ для оптимального обнаружителя (14) запишется в виде

$$_{1G} \quad z_{1G}/z_{0t} \quad \frac{\sqrt{1 \quad 2 \quad z_F \quad z_F^2} \sqrt{1 \quad ^2} \quad \sqrt{z_F^2 \quad 2 \quad z_F \quad 1}}{[(z_F \quad)^2 \quad 2(1 \quad ^2)]}. \tag{29}$$

Обнаружение детерминированного изображения движущегося объекта при наличии фона с неизвестной интенсивностью. Пусть теперь неизвестна интенсивность фона. Проводя максимизацию логарифмов ФОП (16), (17) по неизвестному параметру b [9], получим

$$L_{m2} \quad \sup_b L_1(a_0, b) \quad \sup_b L_0(b) \quad \frac{2a_0}{N_0} \int_0^T x(\mathbf{r},t) s_1(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t) I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)\, d\mathbf{r}dt$$

$$\frac{\left[\int_0^T x(\mathbf{r},t) \,_1(\mathbf{r})[1 \quad I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)]d\mathbf{r}dt\right]^2}{N_0 \int_0^T \,_1^2(\mathbf{r})[1 \quad I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)]d\mathbf{r}dt} \quad \frac{\left[\int_0^T x(\mathbf{r},t) \,_1(\mathbf{r})d\mathbf{r}dt\right]^2}{N_0 T \int \,_1^2(\mathbf{r})d\mathbf{r}} \quad \frac{z^2}{2}. \tag{30}$$

Решение о наличии или отсутствии объекта выносится на основе сравнения логарифма ФОП (30) с порогом h в соответствии с правилом (4). Введем в рассмотрение стандартные гауссовские случайные величины

$$(p \quad m_p)/\,_p; \qquad (q \quad m_q)/\,_q; \qquad (l \quad m_l)/\,_l, \tag{31}$$

где

$$p \quad \frac{2b_0}{N_0} \int_0^T x(\mathbf{r},t) \,_1(\mathbf{r})[1 \quad I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)]d\mathbf{r}dt;$$

$$q \quad \frac{2a_0}{N_0} \int_0^T x(\mathbf{r},t) s_1(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t) I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)\, d\mathbf{r}dt; \qquad l \quad \frac{2b_0}{N_0} \int_0^T x(\mathbf{r},t) \,_1(\mathbf{r})d\mathbf{r}dt;$$

$m_p, m_q, m_l, \,_p^2, \,_q^2, \,_l^2$ – математические ожидания и дисперсии случайных величин p, q и l. Случайные величины , и имеют нулевые математические ожидания 0, единичные дисперсии и коэффициенты взаимной корреляции R 0, R $\sqrt{(\quad 1)/}$ и R $/\sqrt{\ }$, где

$$T \quad {}_1^2(\mathbf{r})d\mathbf{r} \Big/ \int_0^T \quad {}_1^2(\mathbf{r})I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)\,d\mathbf{r}dt \tag{32}$$

– отношение энергии фона во всей области наблюдения, принятой за время T, к энергии фона в просмотренной за это время области (1). Подставляя в (30) реализацию наблюдаемых данных (1), запишем значения логарифма ФОП при гипотезах H_0 и H_1 с учетом обозначений (31):

$$L_{m2}[H_0] \quad (\quad z \quad \sqrt{\quad} \quad 1)^2 \big/ 2 \quad z \quad (\quad z \ \sqrt{\ })^2 \big/ 2 \quad zz \quad z^2 \big/ 2,$$

$$L_{m2}[H_1] \quad (\quad z \quad \sqrt{\quad} \quad 1)^2 \big/ 2 \quad z \quad \{ \quad [\ z \quad z \ (\quad 1)] \big/ \sqrt{\ }\}^2 \big/ 2 \quad z^2 \big/ 2.$$

Записав совместную плотность вероятности величин , , и пользуясь методом функционального преобразования плотностей вероятностей [6], найдем выражения для плотностей вероятности логарифма ФОП при обеих гипотезах. На их основе получим точные выражения для вероятностей ошибок ложной тревоги и пропуска объекта:

$$_2 \quad 1 \quad \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\quad}{\quad ^2}} \iint_{C_0(h)} \exp \frac{\quad}{2(\quad ^2)} \ y^2 \quad x^2 \quad 2yx \frac{\quad}{\sqrt{\ }}$$

$$\sqrt{\frac{\quad ^2}{1 \quad ^2}} \ \sqrt{\quad 1} \ \ z \quad \frac{y \quad x\sqrt{\ }}{\quad ^2}$$

$$\sqrt{2h \quad 2yz \quad (x \quad z \ \sqrt{\ })^2 \quad zz \quad \frac{z^2}{2}}$$

$$\sqrt{\frac{\quad ^2}{1 \quad ^2}} \ \sqrt{\quad 1} \ \ z \quad \frac{y \quad x\sqrt{\ }}{\quad ^2}$$

$$\sqrt{2h \quad 2yz \quad (x \quad z \ \sqrt{\ })^2 \quad zz \quad \frac{z^2}{2}} \quad dxdy, \tag{33}$$

$$_2 \quad \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\quad}{\quad ^2}} \iint_{C_1(h)} \exp \frac{\quad}{2(\quad ^2)} \ y^2 \quad x^2 \quad 2yx \frac{\quad}{\sqrt{\ }}$$

$$\sqrt{\frac{\quad ^2}{1 \quad ^2}} \ \sqrt{2h \quad 2yz \quad x \quad \frac{z}{\sqrt{\ }} \quad z \quad \frac{1}{\sqrt{\ }} ^2 \quad \frac{z^2}{2}}$$

$$\sqrt{\quad 1} \quad z \qquad \frac{y \quad x\sqrt{\ }}{2}$$

$$\sqrt{\frac{\quad 2}{1 \quad 2}} \sqrt{2h \quad 2yz \quad x \quad \frac{z}{\sqrt{\ }} \quad z \quad \frac{1}{\sqrt{\ }}^{\ 2} \quad \frac{z^2}{2}}$$

$$\sqrt{\quad 1} \quad z \qquad \frac{y \quad x\sqrt{\ }}{2} \qquad dxdy. \tag{34}$$

В выражениях (33), (34) области интегрирования $C_0(L)$ и $C_1(L)$ определяются неравенствами

$$C_0(L)\!: 2L \quad 2yz \quad (x \quad z \ \sqrt{\ })^2 \quad zz \quad z^2/2 \quad 0,$$

$$C_1(L)\!: 2L \quad 2yz \quad \{x \quad [\ z \quad z \ (\quad 1)]/\sqrt{\ }\}^2 \quad z^2/2 \quad 0.$$

Найти точное решение системы уравнений

$$_2(z_m, h) \quad P; \qquad _2(z_m, h) \quad P \tag{35}$$

не удается, поэтому получим приближенное выражение для порогового ОСШ z_m. С этой целью представим значение логарифма ФОП при гипотезе H_i, $i \quad 0{,}1$, в виде $L_{m2}[H_i] \quad w \quad _i$, где $w \quad (\ ^2 \quad ^2)/2$ – негауссовская случайная величина с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $^2_w \quad 1/\ $, а $\ _i$ – гауссовские случайные величины с математическими ожиданиями

$$m_{\ 0} \qquad (z^2 \quad z^2 \quad 2 \ zz \ )/2;$$

$$m_{\ 1} \quad \{z^2 \quad z^2(\quad 1) \quad [\ z \quad z \ (\quad 1)]^2/\ \}/2 \tag{36}$$

и дисперсиями

$$^2_{\ 0} \quad 2m_{\ 0}; \qquad ^2_{\ 1} \quad 2m_{\ 1}. \tag{37}$$

Если $z^2 \quad 1$, $z^2 \quad 1$, то $^2_w \quad \min(\ ^2_{\ 0}, \ ^2_{\ 1})$, поэтому $L_{m2}[H_i] \quad _i$, а сам логарифм ФОП (30) можно приближенно считать гауссовской случайной величиной с математическими ожиданиями и дисперсиями

$$m_i \quad m_{\ i}; \qquad ^2_i \quad ^2_{\ i}. \tag{38}$$

Используя выражения (36)–(38), находим гауссовские аппроксимации для вероятностей ошибок ложной тревоги и пропуска объекта:

$$_2 \qquad _{2G} \quad 1 \qquad \frac{2h \quad z^2 \quad z^2 \quad 2 \ zz}{2\sqrt{z^2 \quad z^2 \quad 2 \ zz}} \ ,$$

$$_2 \quad _{2G} \qquad \frac{2h \quad z^2 \quad z^2 (\quad 1) \quad [\, z \quad z \;(\quad 1)]^2 \big/}{2\sqrt{z^2 \quad z^2(\quad 1) \quad [\, z \quad z \;(\quad 1)]^2 \big/}} \; .$$

Подставляя выражения для $_2$ и $_2$ с учетом соотношения $z \quad z/z_F$ в систему уравнений (35) и решая ее относительно z_m, находим выражение для порогового ОСШ в гауссовском приближении: $z_m \quad z_{2G}$, где

$$z_{2G} \qquad \frac{2\mathrm{arc} \quad (1 \quad P) z_F \quad \sqrt{z_F^2 \qquad 1 \quad (\, z_F \qquad 1)^2 \big/} \qquad \sqrt{z_F^2 \quad 2 \; z_F \quad 1}}{[\qquad 2 \; z_F \quad 2z_F^2 \quad (\, z_F \qquad 1)^2 \big/ \quad].} \; . \qquad (39)$$

Точность формулы (39) растет с уменьшением вероятности ошибки P, т. е. с ростом порогового ОСШ. Проигрыш в пороговом ОСШ для АМП в гауссовском приближении по сравнению с пороговым ОСШ (14) при оптимальном обнаружении запишется в виде

$$_{2G} \quad \frac{z_{2G}}{z_{0t}} \quad \sqrt{1 \quad 2 \; z_F \quad z_F^2} \; \frac{\sqrt{z_F^2 \qquad 1 \quad (\, z_F \qquad 1)^2 \big/} \qquad \sqrt{z_F^2 \quad 2 \; z_F \quad 1}}{2 \; z_F \quad 2z_F^2 \quad (\, z_F \qquad 1)^2 \big/} \, . \qquad (40)$$

Обнаружение движущегося объекта по его изображению с неизвестной интенсивностью при наличии фона с неизвестной интенсивностью. Пусть теперь неизвестны интенсивности объекта и фона. Проводя максимизацию логарифмов ФОП (16), (17) по неизвестным параметрам a, b [9], получим

$$L_{m3} \quad \sup_{a,\,b} L_1(a,b) \quad \sup_{b} L_0(b) \quad \frac{\left[\int_0^T x(\mathbf{r},t) s_1(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t) I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)\, d\mathbf{r} dt\right]^2}{N_0 \int_0^T s_1^2(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t) I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)\, d\mathbf{r} dt}$$

$$\frac{\left[\int_0^T x(\mathbf{r},t) \; _1(\mathbf{r})[1 \quad I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)] d\mathbf{r} dt\right]^2}{N_0 \int_0^T \; _1^2(\mathbf{r})[1 \quad I_s(\mathbf{r} \quad \mathbf{V}t)] d\mathbf{r} dt} \qquad \frac{\left[\int_0^T x(\mathbf{r},t) \; _1(\mathbf{r})\, d\mathbf{r} dt\right]^2}{N_0 \int_0^T \; _1^2(\mathbf{r})\, d\mathbf{r} dt} \, . \qquad (41)$$

Решение о наличии или отсутствии объекта по-прежнему выносится на основе сравнения логарифма ФОП (41) с порогом h в соответствии с правилом (4). При этом вероятности ошибок ложной тревоги и пропуска объекта определяются формулами [4]

$$_3 \quad 1 \quad \frac{\sqrt{\;}}{2} \int_{C_0(h)} \exp \quad \frac{1}{2}(y^2 \qquad x^2 \qquad 2yx\sqrt{\;(\quad 1)})$$

$$\frac{z \qquad (y\sqrt{\quad 1} \quad x\sqrt{\;}) \quad \sqrt{2h \quad (y \quad z \; \sqrt{\quad 1})^2 \quad (x \quad z \; \sqrt{\;})^2}}{\sqrt{1 \quad ^2}}$$

$$\frac{z \quad (y\sqrt{\quad 1} \quad x\sqrt{\ }) \quad \sqrt{2h \quad (y \quad z \quad \sqrt{\quad 1})^2 \quad (x \quad z \quad \sqrt{\ })^2}}{\sqrt{1 \quad ^2}} \quad dxdy, \qquad (42)$$

$$_3 \quad \frac{\sqrt{\ }}{2} \quad _{C_1(h)} \quad \exp \quad \frac{1}{2}(y^2 \quad x^2 \quad 2yx\sqrt{\ (\quad 1)})$$

$$\frac{z \quad (y\sqrt{\quad 1} \quad x\sqrt{\ }) \quad \sqrt{2h \quad (y \quad z \quad \sqrt{\quad 1})^2 \quad [x \quad (z \quad z \ (\quad 1))/\sqrt{\ }\ ]^2}}{\sqrt{1 \quad ^2}}$$

$$\frac{z \quad (y\sqrt{\quad 1} \quad x\sqrt{\ }) \quad \sqrt{2h \quad (y \quad z \quad \sqrt{\quad 1})^2 \quad [x \quad (z \quad z \ (\quad 1))/\sqrt{\ }\ ]^2}}{\sqrt{1 \quad ^2}} \quad dxdy. \qquad (43)$$

В выражениях (42), (43) области интегрирования $C_0(L)$ и $C_1(L)$ определяются неравенствами

$$C_0(L)\text{: } 2L \quad (y \quad z \quad \sqrt{\quad 1})^2 \quad (x \quad z \quad \sqrt{\ })^2 \quad 0,$$

$$C_1(L)\text{: } 2L \quad (y \quad z \quad \sqrt{\quad 1})^2 \quad \{x \quad [\ z \quad z \ (\quad 1)]/\sqrt{\ }\}^2 \quad 0.$$

При $z^2 \quad 1, \quad z^2 \quad 1$ приведем гауссовские аппроксимации для вероятностей ошибок ложной тревоги и пропуска объекта [4]:

$$_3 \qquad _{3G} \quad 1 \qquad \frac{2h \quad 1 \quad z^2(1 \quad ^2)}{2z \quad \sqrt{1 \quad ^2}} \ ,$$

$$_3 \qquad _{3G} \qquad \frac{2h \quad 1 \quad z^2 \quad z^2(\quad 1) \quad [\ z \quad z \ (\quad 1)]^2/}{2\sqrt{z^2 \quad z^2(\quad 1) \quad [\ z \quad z \ (\quad 1)]^2/}} \ ,$$

так что пороговое ОСШ в гауссовском приближении

$$z_{3G} \qquad \frac{2z_F \,\mathrm{arc} \quad (1 \quad P) \quad \sqrt{z_F^2 \quad 2\ z_F \quad 1 \quad (\ z_F \quad 1)^2/} \qquad \sqrt{1 \quad ^2}}{[(z_F \quad)^2 \quad 2(1 \quad ^2) \quad (\ z_F \quad 1)^2/\ ]}. \qquad (44)$$

Точность формулы (44) растет с уменьшением вероятности ошибки P, т. е. с увеличением порогового ОСШ. Проигрыш в пороговом ОСШ в гауссовском приближении по сравнению с пороговым ОСШ для оптимального обнаружителя (14) запишется в виде

$$_{3G} \quad z_{3G}/z_{0t} \qquad \frac{\sqrt{1 \quad 2\ z_F \quad z_F^2} \quad \sqrt{z_F^2 \quad 2\ z_F \quad 1 \quad (\ z_F \quad 1)^2/} \qquad \sqrt{1 \quad ^2}}{[(z_F \quad)^2 \quad 2(1 \quad ^2) \quad (\ z_F \quad 1)^2/\ ].}. \qquad (45)$$

Обнаружение движущегося объекта с линейчатой текстурой на структурно-подобном фоне. Для примера рассмотрим обнаружение изображения прямоугольного объекта, движущегося параллельно одной из своих сторон (вдоль оси X), с линейчатой текстурой рисунка, ориентированной перпендикулярно направлению движения

$$s(x \quad Vt, y) \quad a_0[1 \quad m_s \sin(2 \ (x \quad Vt)/ \quad)]/(1 \quad m_s)$$

на структурно-подобном фоне

$$(x, y) \quad b_0[1 \quad m \ \sin(2 \ x/ \quad)]/(1 \quad m \ ),$$

где $\quad L/N$ – период полос (L – длина объекта в направлении движения, N – натуральное число); $0 \quad m_s \quad 1$; $0 \quad m \quad 1$. При движении объекта со скоростью V коэффициент корреляции изображения объекта и фона (12)

$$1 \quad \frac{m_s m}{2} \frac{\sin(2 \quad)}{2} \Bigg/ \sqrt{1 \quad \frac{m_s^2}{2} \quad 1 \quad \frac{m^2}{2}} \ ,$$

где $\quad VT/$ – отношение пути, пройденного объектом за время наблюдения, к периоду текстуры изображения объекта. Для неподвижного объекта коэффициент корреляции

$$_0 \quad (1 \quad m_s m \quad /2)\Big/\sqrt{(1 \quad m_s^2/2)(1 \quad m^2/2)}.$$

Для объекта, движущегося относительно быстро (проходящего за время наблюдения путь порядка 4–6 периодов текстуры изображения объекта), коэффициент корреляции

$$1\Big/\sqrt{(1 \quad m_s^2/2)(1 \quad m^2/2)}.$$

На рис. 1 показаны зависимости проигрыша в пороговом ОСШ в гауссовском приближении из-за незнания интенсивностей объекта и фона от z_F в случае $m_s \quad 0{,}9$, $m \quad 0{,}5$ и $\quad 2$. Линии 1 соответствуют обнаружению неподвижного объекта, линии 2 – обнаружению быстро движущегося объекта. Пунктирными линиями показаны зависимости величины проигрыша $_{1G}(z_F)$ при неизвестной интенсивности изображения объекта и известной интенсивности фона, рассчитанные по формуле (29); штриховыми линиями показаны зависимости величины проигрыша $_{2G}(z_F)$ при неизвестной интенсивности фона и известной интенсивности изображения объекта, рассчитанные по формуле (40); сплошными линиями показаны зависимости величины проигрыша $_{3G}(z_F)$ при априори неизвестных интенсивностях изображения объекта и фона, рассчитанные по формуле (45). Как видно, АМП обеспечивает относительно небольшой проигрыш в пороговом ОСШ по сравнению со случаем априори известных интенсивностей изображения объекта и фона, причем минимальное значение проигрыша достигается при значениях ОСФ z_F, близких к единице. Сопоставление кривых 1 и 2 на рис. 1 позволяет определить влияние движения объекта на величину проигрыша в эффективности обнаружения.

Зависимости отношения порогового ОСШ для быстро движущегося объекта к пороговому ОСШ для неподвижного объекта в гауссовском при-

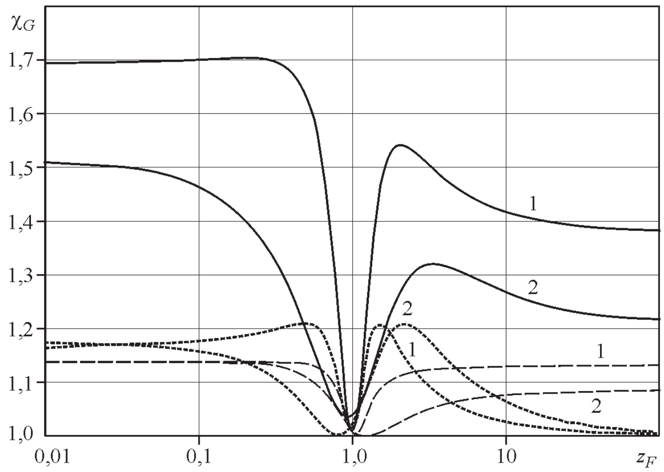

Рис. 1

ближении $_j$ $z_{jG}\big|$ $\big/ z_{jG}\big|$ $_0$, j $\overline{1,3}$, от z_F в случае m_s 0,9, m 0,5 и

2 показаны на рис. 2. Пунктирной линией показана зависимость $_1(z_F)$ при неизвестной интенсивности изображения объекта и известной интенсивности фона, рассчитанная по формуле (28); штриховой линией показана зависимость $_2(z_F)$ при неизвестной интенсивности фона и известной интенсивности изображения объекта, рассчитанная по формуле (39); сплошной линией показана зависимость $_3(z_F)$ при априори неизвестных интенсивностях изображения объекта и фона, рассчитанная по формуле (44); штрих-пунктирной линией показана зависимость величины $_0$ $z_{0t}\big|$ $\big/ z_{0t}\big|$ $_0$

от z_F для оптимального алгоритма (при априори известных интенсивностях изображения объекта и фона), рассчитанная по формуле (14). Как видно, движение объекта приводит к уменьшению порогового ОСШ. Значит, неравномерно окрашенный движущийся объект, наблюдаемый на неравномерном фоне, может обнаруживаться лучше, чем неподвижный объект, наблюдаемый в тех же условиях.

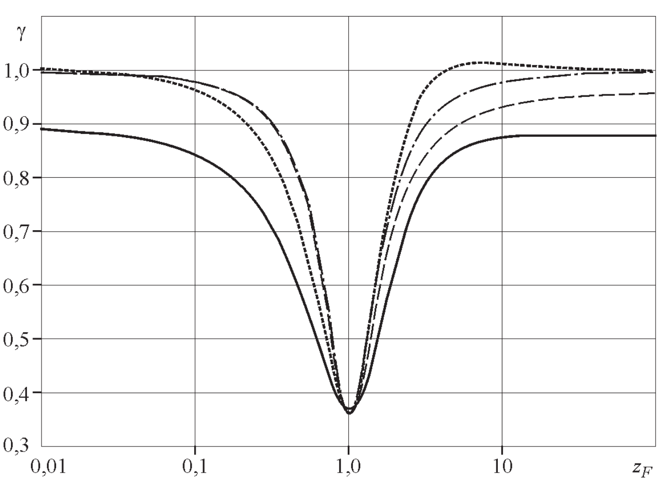

Рис. 2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Островитянов Р. В., Басалов В. Ф. Статистическая теория радиолокации протяжен- ных объектов. М.: Радио и связь, 1982.
2. Трифонов А. П., Прибытков Ю. Н. Обнаружение случайных изображений пространственно протяженных объектов, затеняющих фон // Автометрия. 2000. № 4. С. 14.
3. Бычков А. А., Понькин В. А. Обнаружение изображений пространственно протяженных затеняющих фон объектов // Автометрия. 1992. № 4. С. 33.
4. Трифонов А. П., Прибытков Ю. Н. Обнаружение квазидетерминированного изображения при наличии фона с неизвестными параметрами // Автометрия. 2002. 38, № 4. С. 19.
5. Ефремов В. В., Ковалев Г. С., Лаптев И. В., Понькин В. А. Потенциальные возможности обнаружения и маскирования движущихся объектов на неравномерных фонах // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2003. № 4. С. 24.
6. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М.: Сов. радио, 1966.
7. Трифонов А. П., Нечаев Е. П., Парфенов В. И. Обнаружение стохастических сигналов с неизвестными параметрами /Под ред. А. П. Трифонова. Воронеж: ВГУ, 1991.
8. Акимов П. С., Бакут П. А., Богданович В. А. и др. Теория обнаружения сигналов /Под ред. П. А. Бакута. М.: Радио и связь, 1984.
9. Трифонов А. П., Шинаков Ю. С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. М.: Радио и связь, 1986.
10. Васильев К. К., Драган Я. П., Казаков В. А. и др. Прикладная теория случайных процессов и полей /Под ред. К. К. Васильева, В. А. Омельченко. Ульяновск: УлГТУ, 1995.

Воронежский государственный университет,
E-mail: trif@rf.phys.vsu.ru

Поступила в редакцию
22 марта 2004 г.