

271

271

ISSN 0021-3470



ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ
ЗАВЕДЕНИЙ

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

ТОМ 51

9-10
сентябрь-октябрь

ИЗДАНИЕ
НАЦИОНАЛЬНОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
УКРАИНЫ
«КИЕВСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ»

2008

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА,
ДВИЖУЩЕГОСЯ В НЕИЗВЕСТНОМ НАПРАВЛЕНИИ***

С учетом затенения фона выполнены синтез и анализ максимально правдоподобного алгоритма обнаружения неоднородного изображения пространственно протяженного объекта, направление движения которого априори неизвестно.

Необходимость обнаружения объектов по их изображениям возникает, как правило, в процессе обработки результатов дистанционного наблюдения. Обычно объекты наблюдаются на некоторой подстилающей поверхности, и сигнал, рассеянный этой поверхностью, образует фоновое излучение (фон). Высокая разрешающая способность современных систем дистанционного наблюдения позволяет не только выделить пространственно-протяженный объект (ППО) [1] по перепаду интенсивности на границе объект-фон, но и различать неоднородности распределения интенсивности изображения объекта.

В [2] исследованы потенциальные возможности обнаружения ППО, движущихся с известной скоростью в заданном направлении. В [4, 5] рассмотрен случай, когда направление движения объекта известно, но неизвестна величина скорости, а в [6] определена эффективность обнаружения ППО, движущихся с неизвестным вектором скорости. Однако, на основе результатов [6] не удастся получить характеристики обнаружения ППО, движущихся с заданной скоростью в априори неизвестном направлении, что не позволяет оценить влияние априорного незнания направления движения объекта на эффективность обнаружения его изображения.

Целью работы являются синтез и анализ максимально правдоподобного (МП) алгоритма обнаружения ППО, движущегося в неизвестном направлении, по его изображению.

Пусть в двумерной области Ω в течение интервала времени $[0, T]$ наблюдению доступна реализация гауссовского случайного поля $\Xi(x, y, t)$, где t — время, а (x, y) — координаты принадлежащей области Ω точки в прямоугольной системе координат XY . Положим, что при гипотезе H_1 поле $\Xi(x, y, t)$ содержит изображение $\mathcal{A}(x - V_0 t \cos \varphi_0, y - V_0 t \sin \varphi_0)$ объекта, движущегося с известной скоростью V_0 из заданного положения в априори неиз-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ и администрации Воронежской области (проекты 06-07-96301 и 07-01-00042)

вестном направлении, составляющем угол φ_0 с осью X , неподвижный фон $v(x, y)$ и аддитивный гауссовский пространственно-временной белый шум $n(x, y, t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0 . При гипотезе H_0 поле $\Xi(x, y, t)$ содержит фон $v(x, y)$ и аддитивный шум $n(x, y, t)$.

В соответствии с аппликативной моделью [1–5], учитывающей эффекты затенения объектом участка фона, полагаем, что изображение объекта занимает часть Ω_s области Ω , а фон — оставшуюся часть области наблюдения. При отсутствии объекта фон занимает всю область наблюдения. Будем считать, что разрешающая способность системы наблюдения достаточно высока, так что размеры неоднородностей объекта и фона велики по сравнению с размерами элемента разрешения, в результате чего оказывается существенной зависимость интенсивности изображения объекта от пространственных координат. Тогда в течение интервала времени $[0, T]$ наблюдению доступна реализация изображения

$$\Xi(x, y, t) = \gamma_0 s(x - V_0 t \cos \varphi_0, y - V_0 t \sin \varphi_0) I_s(x - V_0 t \cos \varphi_0, y - V_0 t \sin \varphi_0) + v(x, y) [1 - \gamma_0 I_s(x - V_0 t \cos \varphi_0, y - V_0 t \sin \varphi_0)] + n(x, y, t), \quad (1)$$

где $\gamma_0 = 0$, если справедлива гипотеза H_0 , и $\gamma_0 = 1$, если верна гипотеза H_1 , а описывающая форму изображения объекта индикаторная функция $I_s(x, y) = 1$ при $(x, y) \in \Omega_s$, иначе $I_s(x, y) = 0$. При этом предполагается, что угол $\varphi_0 \in U = [\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$ причем $0 \leq \varphi_{\min} < \varphi_{\max} < 2\pi$.

Для решения задачи проверки гипотезы H_1 против альтернативы H_0 необходимо формировать логарифм функционала отношения правдоподобия (ФОР) [3, 4]

$$L(\varphi) = \frac{2}{N_0} \int_0^T \iint_{\Omega} \left\{ \Xi(x, y, t) [s(x - V_0 t \cos \varphi, y - V_0 t \sin \varphi) - v(x, y)] - \left[s^2(x - V_0 t \cos \varphi, y - V_0 t \sin \varphi) - v^2(x, y) \right] / 2 \right\} \times \\ \times I_s(x - V_0 t \cos \varphi, y - V_0 t \sin \varphi) dx dy dt. \quad (2)$$

Если направление движения объекта априори известно [3], то решение о наличии или отсутствии изображения объекта в области наблюдения выносится путем сравнения величины $L = L(\varphi_0)$ с порогом h , определяемым выбранным критерием оптимальности [7]. Если

$$L > h, \quad (3)$$

то выносится решение о наличии изображения объекта в наблюдаемой реализации; в противном случае — о его отсутствии.

Для того, чтобы исключить влияние неизвестного направления движения, заменим неизвестное значение угла φ его оценкой МП [8]. При этом решение о наличии изображения объекта формируется в соответствии с правилом (3), где $L = \sup L(\varphi)$, $\varphi \in U$, а порог h определяется выбранным критерием оптимальности.

Подставляя в (2) реализацию наблюдаемых данных (1), представим логарифм ФОП в виде суммы сигнальной и шумовой функций [8, 9]:

$$L(\varphi) = \gamma_0 \hat{S}(\varphi, \varphi_0) + \hat{N}(\varphi) - \hat{S}(\varphi, \varphi) / 2 \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} \hat{S}(\varphi, \varphi_0) = & \frac{2}{N_0} \int_0^T \iint_{\Omega} [s(x - V_0 t \cos \varphi, y - V_0 t \sin \varphi) - v(x, y)] \times \\ & \times [s(x - V_0 t \cos \varphi_0, y - V_0 t \sin \varphi_0) - v(x, y)] I_s(x - V_0 t \cos \varphi, y - V_0 t \sin \varphi) \times \\ & \times I_s(x - V_0 t \cos \varphi_0, y - V_0 t \sin \varphi_0) dx dy dt \end{aligned} \quad (5)$$

— сигнальная функция, а $\hat{N}(\varphi)$ — шумовая функция, представляющая собой реализацию гауссовского случайного процесса с нулевым математическим ожиданием и корреляционной функцией

$$\langle \hat{N}(\varphi_1) \hat{N}(\varphi_2) \rangle = \hat{S}(\varphi_1, \varphi_2). \quad (6)$$

Величина $z_H^2 = \hat{S}(\varphi_0, \varphi_0)$ — отношение сигнал/шум (ОСШ) на выходе приемника МП [4, 8, 9]. В общем случае $\hat{S}(\varphi_0, \varphi_0)$ зависит от направления движения. Далее будем считать, что фон является однородным с интенсивностью $v(x, y) = v_0$. В этом случае ОСШ

$$z_H^2 = \frac{2T}{N_0} \iint_{\Omega} [s(x, y) - v_0]^2 I_s(x, y) dx dy \quad (7)$$

от φ_0 не зависит, так что параметр φ является незнергетическим [9], а сигнальная функция (5) достигает своего максимального значения z_H^2 при $\varphi = \varphi_0$.

Вместо $L(\varphi)$ (2) введем нормированный член логарифма ФОП, зависящий от направления движения:

$$L_z(\varphi) = L(\varphi) / z_H + z_H / 2 = \gamma_0 z_H S(\varphi, \varphi_0) + N(\varphi), \quad (8)$$

где $S(\varphi, \varphi_0) = \hat{S}(\varphi, \varphi_0) / z_H$, $N(\varphi) = \hat{N}(\varphi) / z_H^2$ — нормированные сигнальная и шумовая функции. При этом решение о наличии изображения объекта в наблюдаемой реализации принимается, если $\hat{L}_z = \sup L_z(\varphi) > u_H$, $\varphi \in U$, где

$u_H = h / z_H + z_H / 2$ — нормированный порог. В противном случае выносятся решение об отсутствии объекта.

Пусть объект отсутствует в области наблюдения, то есть $\gamma_0 = 0$. Тогда вероятность ложной тревоги можно записать в виде [4, 5]

$$\alpha_{\phi H} = 1 - F_N(u_H), \quad (9)$$

где $F_N(x) = P[\sup N(\phi) < x, \phi \in U]$.

Согласно (5), (6), в общем случае случайный процесс $N(\phi)$ является неоднородным, что не позволяет воспользоваться результатами [8, 10] для расчета характеристик обнаружения. Аналогично тому, как это сделано в [11], разобьем априорную область U возможных значений угла ϕ на I отрезков $U_i = [\phi_i, \phi_i + \Delta\phi_i]$ длиной $\Delta\phi_i, i = \overline{1, I}$, так, что

$$d = \max_i \Delta\phi_i \ll 1 \quad (10)$$

Тогда при $d \rightarrow 0$ на каждом отрезке U_i случайный процесс $N(\phi)$ можно считать локально однородным. Потребуем кроме того, чтобы значения процесса $N(\phi)$ на различных интервалах U_i были приближенно статистически независимы. Для этого достаточно, чтобы

$$\min_i (V_0 T \Delta\phi_i) \gg l_{\max}, \quad (11)$$

где $l_{\max}$ — максимальный размер объекта. При выполнении (10), (11) вероятность $F_N(x)$ можно записать в виде $F_N(x) \approx \prod_{i=1}^I F_{N_i}(x)$, где $F_{N_i}(x) = P[\sup N(\phi) < x, \phi \in U_i]$ — функция распределения величины абсолютного максимума случайного процесса $N(\phi)$ в подобласти $U_i, i = \overline{1, I}$.

Для определения функций $F_{N_i}(x)$ воспользуемся результатами, полученными в [5]. Относительная скорость изображений, движущихся со скоростью V_0 под углами ϕ и ϕ_0 к оси X , равна $\Delta V = 2V_0 \sin(|\phi - \phi_0|/2)$, причем $\Delta V \rightarrow V_0|\phi - \phi_0|$ при $|\phi - \phi_0| \rightarrow 0$. Положим, что контур изображения объекта является выпуклым. Проведем касательные к границе изображения объекта, перпендикулярные направлению его движения, и обозначим через $\Gamma_-(\phi_0)$ и $\Gamma_+(\phi_0)$ части границы Γ , на которые она разделяется точками касания (рис. 1). Введем прямоугольную систему координат $X'Y'$, направив ось Y' в направлении движения. Воспользовавшись результатами [5], нахо-

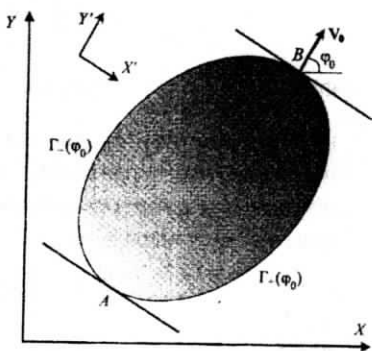


Рис. 1

дим, что сигнальная функция (5) при $|\varphi - \varphi_0| \rightarrow 0$ допускает асимптотическое представление

$$S(\varphi, \varphi_0) = 1 - \delta_H(\varphi_0)|\varphi - \varphi_0| + o(|\varphi - \varphi_0|), \quad (12)$$

где

$$\delta_H(\varphi) = \frac{TV_0 \left\{ \int_{\Gamma_-(\varphi)} [s(x', y) - v_0]^2 dy + \int_{\Gamma_+(\varphi)} [s(x', y) - v_0]^2 dy \right\}}{4 \iint_{\Omega} [s(x, y) - v_0]^2 I_s(x, y) dx dy}. \quad (13)$$

Используя результаты [10], получим:

$$F_{N_i}(x) \approx \exp[-\Delta\varphi_i \delta_H(\varphi_i) x \exp(-x^2/2) / \sqrt{2\pi}], \quad (14)$$

при $x \geq 1$, и $F_{N_i}(x) \approx 0$ при $x < 1$, так что функция распределения абсолютного максимума нормированного логарифма ФОП при $\varphi \in [\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$ и отсутствии объекта в области наблюдения может быть записана в виде

$$F_N(x) \approx \exp\left[-\frac{x}{\sqrt{2\pi}} \exp(-x^2/2) \sum_{i=1}^l \delta_H(\varphi_i) \Delta\varphi_i\right], \quad (15)$$

при $x \geq 1$, и $F_N(x) \approx 0$ при $x < 1$. При выполнении (10), (11) величина $\delta_H(\varphi_i)$ мало изменяется в пределах любого из отрезков U_i , а вероятность $F_N(x)$ не зависит от способа разбиения априорного интервала U на отрезки U_i . Эти обстоятельства позволяют заменить в (15) сумму соответствующим интегралом:

$$F_N(x) \approx \exp\left[-m_H x \exp(-x^2/2) / \sqrt{2\pi}\right], \quad (16)$$

при $x \geq 1$, и $F_N(x) \approx 0$ при $x < 1$. Здесь $m_H = \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} \delta_H(\varphi) d\varphi$ — приведенная длина априорного интервала возможных значений угла φ . Подставляя (16) в (9), получаем, что вероятность ложной тревоги при обнаружении изображения объекта, движущегося с известной скоростью V_0 в неизвестном направлении, определяется выражением

$$\alpha_{\varphi H} \approx 1 - \exp\left[-m_H u_H \exp(-u_H^2/2) / \sqrt{2\pi}\right], \quad (17)$$

при $u_H \geq 1$, и $\alpha_{\varphi H} \approx 1$ при $u_H < 1$.

Положим теперь, что изображение объекта присутствует в наблюдаемой реализации, то есть в (4), (8) $\gamma_0 = 1$. Вероятность пропуска изображения объекта при использовании МП алгоритма обнаружения может быть записана в виде $\beta_{\varphi H} = P(\sup L_z(\varphi) < u_H, \varphi \in U | \gamma_0 = 1)$ [4, 5].

Пусть на отрезке U_S , являющемся одним из множества отрезков $U_i, i = \overline{1, I}$ сигнальная функция $S(\varphi, \varphi_0)$ существенно отлична от нуля [8], а U_N — множество отрезков, дополняющее U_S до U . Обозначим $M_S = \sup_{\varphi \in U_S} L_z(\varphi) = L_z(\hat{\varphi})$

и $M_N = \sup_{\varphi \in U_N} L_z(\varphi)$ величины абсолютных максимумов случайного процесса

(8) при $\gamma_0 = 1$ в подобластях U_S и U_N соответственно. Здесь $\hat{\varphi}$ — положение абсолютного максимума $L_z(\varphi)$. Согласно (6), при выполнении (10), (11) длина отрезка U_S существенно меньше суммарной длины отрезков из множества U_N , причем $S(\varphi, \varphi_0) \approx 0$ при $\varphi \in U_N$, так что $M_N \approx \sup_{\varphi \in U_N} N(\varphi) \approx \sup_{\varphi \in U} N(\varphi)$,

а величины M_S и M_N можно приближенно считать статистически независимыми. Тогда для вероятности пропуска объекта имеем:

$$\beta_{\varphi H} \approx P[M_N < u_H] P[M_S < u_H] \approx F_N(u_H) F_S(u_H) = (1 - \alpha_{\varphi H}) F_S(u_H), \quad (18)$$

где $F_N(u_H)$ определено в (16), а $F_S(u_H) = P[M_S < u_H]$

Будем считать, что ОСШ z_H достаточно велико, так что абсолютный максимум нормированного логарифма ФОП (8) лежит в малой окрестности φ_0 . Поскольку $\hat{\varphi} \rightarrow \varphi_0$ в среднеквадратическом при $z_H \rightarrow \infty$ [8], для определения функции распределения $F_S(u_H)$ достаточно исследовать поведение абсолютного максимума нормированного логарифма ФОП в малой окрестности точки φ_0 . Воспользовавшись методом локально-марковской аппроксимации [10], получим приближенное выражение для функции распределения величины абсолютного максимума $L_z(\varphi)$ при $\varphi \in U_S$:

$$F_S(x) \approx \Phi(x - z_H) - 2 \exp(3z_H^2 / 2 - xz_H) \Phi(x - 2z_H) + \\ + \exp(4z_H^2 - 2xz_H) \Phi(x - 3z_H), \quad (19)$$

где $\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \exp(-g^2 / 2) dg / \sqrt{2\pi}$ — интеграл вероятности. Подставляя (19) в (18), находим вероятность пропуска изображения, движущегося с известной скоростью в неизвестном направлении:

$$\beta_{\varphi H} \approx \exp[-m_H u_H \exp(-u_H^2 / 2) / \sqrt{2\pi}] \{ \Phi(u_H - z_H) - \\ - 2 \exp(3z_H^2 / 2 - u_H z_H) \Phi(u_H - 2z_H) + \\ + \exp(4z_H^2 - 2u_H z_H) \Phi(u_H - 3z_H) \}, \quad (20)$$

при $u_H \geq 1$ и $\beta_{\varphi H} \approx 0$ при $u_H < 1$.

Из (17), (20) следует, что характеристики обнаружения зависят от скорости движения объекта V_0 , причем эффективность обнаружения снижается при увеличении V_0 .

Конкретизируем полученные выражения для случая, когда изображение объекта является однородным с интенсивностью $s(x, y) = s_0$. Из (7) имеем, что ОСШ для однородного объекта определяется выражением

$$z^2 = 2TG_s(s_0 - v_0)^2 / N_0, \quad (21)$$

а из (13) находим значение параметра δ_H для однородного объекта:

$$\delta(\varphi) = TV_0 l(\varphi) / 2G_s, \quad (22)$$

где $l(\varphi)$ — максимальный размер изображения объекта в направлении, составляющем угол φ с осью X , а G_s — площадь изображения объекта. При этом приведенная длина априорного интервала возможных значений угла φ равна $m = TV_0 \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} l(\varphi) d\varphi / 2G_s$. Вероятности ошибок ложной тревоги α_φ и пропуска β_φ однородного изображения движущегося в неизвестном направлении объекта определяются выражениями

$$\alpha_\varphi \approx 1 - \exp[-m \exp(-u^2/2) / \sqrt{2\pi}], \quad (23)$$

при $u \geq 1$ и $\alpha_\varphi \approx 1$ при $u < 1$,

$$\beta_\varphi \approx \exp[-m \exp(-u^2/2) / \sqrt{2\pi}] \{ \Phi(u-z) - 2\exp(3z^2/2 - uz) \times \\ \times \Phi(u-2z) + \exp(4z^2 - 2uz) \Phi(u-3z) \}, \quad (24)$$

при $u \geq 1$ и $\beta_\varphi \approx 0$ при $u < 1$, где $u = h/z + z/2$

Рассмотрим влияние степени неоднородности изображения объекта на характеристики обнаружения. В качестве примера найдем характеристики обнаружения круглого объекта радиуса R , интенсивность изображения которого линейно возрастает в направлении оси X . Таким образом полагаем, что интенсивность изображения объекта описывается функцией

$$s(x, y) = s_{\text{кр}}(x, y) = 2s_0 [(q-1)x/R + q + 1] / \sqrt{5q^2 + 6q + 5}. \quad (25)$$

где наклон $q = s_{\text{max}} / s_{\text{min}}$ — отношение максимального значения интенсивности изображения объекта $s_{\text{max}} = \max_{(x, y) \in \Omega_s} s(x, y)$ к минимальному значению $s_{\text{min}} = \min_{(x, y) \in \Omega_s} s(x, y)$, s_0 характеризует амплитуду интенсивности, а множитель $1/\sqrt{5q^2 + 6q + 5}$ обеспечивает неизменность энергии изображения объек-

та при различных значениях q . При этом предполагается, что начало системы координат расположено в центре изображения объекта при $t = 0$. Нетрудно убедиться, что распределение интенсивности (25) удовлетворяет условию $\iint_{\Omega_0} s^2(x, y) dx dy = s_0^2 G_s$. Заметим, что для однородного объекта $q = 1$, так что $s_{кр}(x, y)|_{q=1} = s_0$, то есть s_0 — интенсивность изображения однородного объекта с теми же площадью и энергией, что у неоднородного объекта.

Подставляя (25) в (7), находим выражение для ОСШ на выходе приемника максимального правдоподобия при наличии в реализации наблюдаемых данных изображения неоднородного круглого объекта (25), однородного фона и гауссовского белого шума

$$z_{Hкр}^2 = z_{скр}^2 \left[z_F^2 + 1 - 4z_F(q+1) / \sqrt{5q^2 + 6q + 5} \right] / z_F^2, \quad (26)$$

где $z_{скр}^2 = 2\pi R^2 T s_0^2 / N_0$ — ОСШ для однородного изображения круглого объекта при отсутствии фона и наличии только гауссовского белого шума [3], $z_F^2 = s_0^2 / \sigma_0^2$ — отношение сигнал/фон.

Согласно (17), (20), для расчета характеристик обнаружения необходимо найти значение m_H приведенной длины априорного интервала возможных значений угла φ , определяющего направление движения. Подставляя (25) в (13), получим выражение для параметра δ_H в случае неоднородного круглого объекта, интенсивность изображения которого описывается функцией (25):

$$\delta_{Hкр}(\varphi) = \delta_{кр} \left[1 + \frac{z_F^2(q-1)^2}{5q^2 + 6q + 5} \left(1 + \frac{2\cos 2\varphi}{3} \right) / \left(z_F^2 - \frac{4z_F(1+q)}{\sqrt{5q^2 + 6q + 5}} + 1 \right) \right], \quad (27)$$

где $\delta_{кр} = TV_0 / \pi R$ — значение параметра (27) для однородного изображения круглого объекта (при $q = 1$). При этом приведенная длина априорного интервала возможных значений угла φ для однородного круглого объекта $m_{кр} = TV_0(\varphi_{\max} - \varphi_{\min}) / \pi R$, а для неоднородного

$$m_{Hкр} = \left[1 + \frac{z_F^2(q-1)^2}{5q^2 + 6q + 5} \left(1 + \frac{\sin 2\varphi_{\max} - \sin 2\varphi_{\min}}{3(\varphi_{\max} - \varphi_{\min})} \right) / \left(z_F^2 - \frac{4z_F(1+q)}{\sqrt{5q^2 + 6q + 5}} + 1 \right) \right] m_{кр} \quad (28)$$

На рис. 2 показаны зависимости отношения $\chi = \beta_{\varphi H} / \beta_{\varphi}$ вероятностей пропуска неоднородного и однородного круглых объектов при порогах, определенных на основании критерия Неймана-Пирсона для одинаковых значений вероятностей ложных тревог $\alpha_{\varphi} = \alpha_{\varphi H} = 10^{-2}$. Значения порогов определя-

лись по заданным вероятностям ложных тревог с использованием формул (17), (23) при $m_{кр} = 10$ и отношении сигнал/фон $z_F = 3$. При этом число элементов разрешения для неоднородного объекта определялось с использованием формулы (28) при $\varphi_{max} - \varphi_{min} = 2\pi$, а ОСШ определяется формулой (26). Кривая 1 соответствует значению ОСШ для однородного изображения круглого объекта в отсутствии фона $z_{скр} = 5$ (при этом $\beta_\varphi \sim 0,5$), кривая 2 — $z_{скр} = 7$ (при этом $\beta_\varphi \sim 10^{-1}$), кривая 3 — $z_{скр} = 10$ (при этом $\beta_\varphi \sim 10^{-3}$). Из сравнения кривых на рис. 2 следует, что при не слишком малых значениях ОСШ $z_{скр}$ для однородного изображения круглого объекта при отсутствии фона, когда вероятность пропуска не превышает 0,1, вероятность пропуска неоднородного объекта всегда меньше, чем однородного, т.е. $\beta_{\varphi H} < \beta_\varphi$. Это объясняется тем, что при одинаковых энергиях изображений однородного и неоднородного объектов, неоднородный объект в большей степени отличается по текстуре от однородного фона.

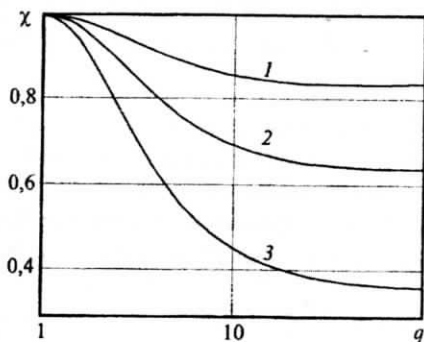


Рис. 2

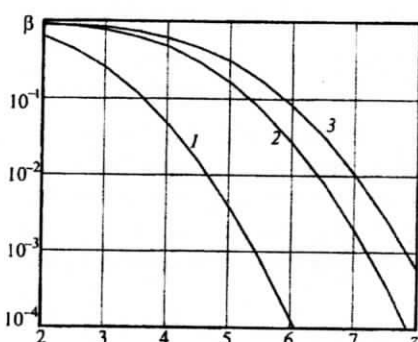


Рис. 3

Исследуем влияние априорного незнания направления движения объекта на характеристики обнаружения. Рассмотрим случай обнаружения однородного изображения прямоугольного объекта размером $l_x \times l_y$ с интенсивностью s_0 , наблюдаемого на однородном фоне с интенсивностью v_0 . Будем считать, что направление движения объекта задается углом φ , принимающим значения из априорного интервала максимально возможной длины 2π . В этом случае параметр m равен $m = m_{пр} = 2TV_0(l_x + l_y)/l_x l_y$, а ОСШ $z^2 = z_{пр}^2 = 2l_x l_y T(s_0 - v_0)^2 / N_0$. В частности, для квадратного объекта со стороной l имеем: $m = m_{кв} = 4TV_0 / l$, $z^2 = z_{кв}^2 = 2l^2 T(s_0 - v_0)^2 / N_0$.

Если параметры движения объекта априори известны, то вероятности ошибок ложной тревоги и пропуска объекта определяются формулами [4]

$$\alpha_0 = 1 - \Phi(u), \quad (29)$$

$$\beta_0 = \Phi(u - z). \quad (30)$$

В работе [6] рассмотрен случай обнаружения изображения прямоугольного объекта со сторонами l_x и l_y , движущегося в априори неизвестном направлении с неизвестной величиной скорости. В предположении, что проекции вектора скорости на координатные оси, параллельные сторонам объекта, принимают значения из априорных интервалов $W_x = [-V_{x \max} / 2, V_{x \max} / 2]$ и $W_y = [-V_{y \max} / 2, V_{y \max} / 2]$ в этой работе получены вероятности ошибок ложной тревоги и пропуска объекта:

$$\begin{aligned} \alpha_{\varphi V} = 1 - \exp & \left[-\sqrt{2/\pi} \left(m_y \exp(-1/2) + m_x (u\sqrt{2} - 1) \exp\left(-\frac{(u\sqrt{2} - 1)^2}{2}\right) \right) \right] - \\ & - \sqrt{\frac{2}{\pi}} m_y \int_1^{u\sqrt{2}-1} (x^2 - 1) \exp\left\{ -\frac{x^2}{2} - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[m_y x \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) + \right. \right. \\ & \left. \left. + m_x (u\sqrt{2} - x) \exp\left(-\frac{(u\sqrt{2} - x)^2}{2}\right) \right] \right\} dx, \end{aligned} \quad (31)$$

при $u > \sqrt{2}$, и $\alpha_{\varphi V} = 1$ при $u \leq \sqrt{2}$,

$$\beta_{\varphi V} \approx (1 - \alpha_{\varphi V}) \int_{-\infty}^{\infty} F(u\sqrt{2} - x) w(x) dx, \quad (32)$$

где $m_x = TV_{x \max} / 2l_x$, $m_y = TV_{y \max} / 2l_y$,

$$\begin{aligned} F(x) = & \Phi(x - z / \sqrt{2}) - 2 \exp(3z^2 / 4 - xz / \sqrt{2}) \Phi(x - \sqrt{2}z) + \\ & + \exp(2z^2 - \sqrt{2}xz) \Phi(x - 3z / \sqrt{2}); \end{aligned}$$

$$w(x) = z\sqrt{2} \left[\exp(3z^2 / 4 - xz / \sqrt{2}) \Phi(x - \sqrt{2}z) - \exp(2z^2 - \sqrt{2}xz) \Phi(x - 3z / \sqrt{2}) \right].$$

Рассмотрим далее случай, когда объект имеет форму квадрата со стороной l , а $V_{x \max} = V_{y \max}$. Положим, что скорость объекта, движущегося с известной скоростью в априори неизвестном направлении, принимает максимально возможное значение $V_0 = V_{x \max} / \sqrt{2}$. Тогда $m_x = m_y = TV_{x \max} / 2l$, $m = m_{\text{кв}} = 4TV_0 / l = 4\sqrt{2}m_x$, а $z^2 = z_{\text{кв}}^2$.

На рис. 3 показаны зависимости вероятности пропуска изображения объекта от ОСШ z при $m_x = m_y = 10$ и $V_{x \max} = V_{y \max}$. Порог выбирался по заданной вероятности ложной тревоги 10^{-2} на основании критерия Неймана-Пирсона с использованием формул (23), (29) и (31). Кривая 1 соответствует случаю, ко-

гда величина скорости и направление движения априори известны, и рассчитывалась по формуле (30). Кривая 2 соответствует случаю, когда величина скорости $V_0 = V_{x \max} / \sqrt{2}$ известна, а направление движения неизвестно, и рассчитывалась по формуле (24) при $m = 4\sqrt{2}m_x = 40\sqrt{2}$. Кривая 3 рассчитывалась по формуле (32) и соответствует случаю, когда неизвестны величина скорости и направление движения изображения объекта.

Согласно рис. 3, априорное незнание направления движения объекта может привести к существенному проигрышу в эффективности обнаружения его изображения. При этом потери в эффективности обнаружения возрастают с увеличением числа элементов разрешения в априорной области возможных значений угла φ , определяющего направление движения и с увеличением ОСЦ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бычков А.А., Понькин В.А. Обнаружение изображений пространственно-протяженных затеняющих фон объектов // *Автометрия*. 1992. — Т.28. — №4. — С. 33–40.
2. 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. 24–29.
3. Трифонов А.П., Куцов Р.В. Обнаружение движущегося пространственно-протяженного объекта на фоне с неизвестной интенсивностью // *Автометрия*. 2005. — Т.41. — №1. — С. 3–18.
4. Куцов Р.В., Трифонов А.П. Алгоритмы обнаружения движущегося объекта на изображении // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2006. — №3. — С. 129–138.
5. Куцов Р.В., Трифонов А.П. Обнаружение и оценка скорости движения неоднородного пространственно протяженного объекта по изображению // *Изв. РАН. Теория и системы управления*. 2008. — №2. — С. 115–125.
6. Трифонов А.П., Куцов Р.В. Эффективность обнаружения изображения объекта, движущегося с неизвестным вектором скорости // *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. 2007. — Т. 50. — № 11. — С. 3–12.
7. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. — М.: Сов. радио, 1966. — 680 с.
8. Трифонов А.П., Шинаков Ю.С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. — М.: Радио и связь, 1986. — 268 с.
9. Куликов Е.И., Трифонов А.П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. — М.: Сов. радио, 1978. — 296 с.
10. Акимов П.С., Бакут П.А., Богданович В.А. и др. Теория обнаружения сигналов / Под ред. П.А.Бакута. — М.: Радио и связь, 1984. — с 440 с.
11. Трифонов А.П., Шаранов С. И. Оценка местоположения точечной цели в зоне Френеля приемной антенны // *Радиотехника и электроника*. 1984. — Т. 29. — № 2. — С. 242–249.

Воронежский гос. ун-т

Поступила в редакцию 19.02.08