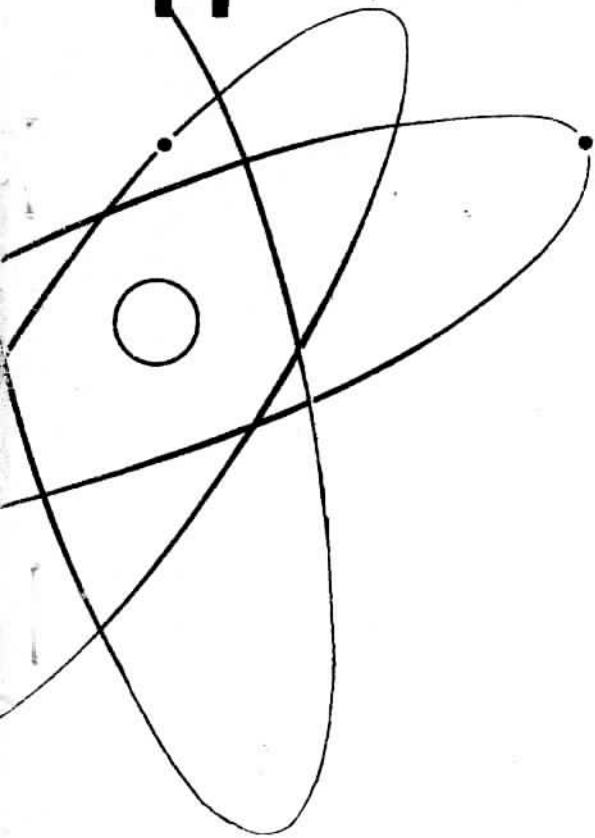




ISSN 0021-3470

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ
ЗАВЕДЕНИЙ

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА



ТОМ 50

11-12
ноябрь-декабрь

ИЗДАНИЕ
НАЦИОНАЛЬНОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
УКРАИНЫ
«КИЕВСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ»

2007

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА,
ДВИЖУЩЕГОСЯ С НЕИЗВЕСТНЫМ ВЕКТОРОМ СКОРОСТИ***

С учетом затенения фона выполнены синтез и анализ максимально правдоподобного алгоритма обнаружения изображения пространственно-протяженного объекта, направление и величина скорости движения которого априори неизвестны.

Существенно возросшая разрешающая способность систем дистанционного наблюдения стимулировала в последнее время 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 [1, 2] показано, что использование аддитивной модели взаимодействия ППО и фона может приводить к недостоверным результатам. В [3] исследованы потенциальные возможности обнаружения ППО, движущегося с известной скоростью, а в [4] рассмотрены алгоритмы обнаружения ППО, движущегося в известном направлении с априори неизвестной величиной скорости. Однако часто возникают ситуации, когда наблюдателю неизвестны как величина скорости, так и направление движения объекта.

Целью работы является синтез и анализ максимально правдоподобного (МП) алгоритма обнаружения ППО, движущегося с неизвестным вектором скорости, по его изображению.

Пусть в двумерной области Ω в течение интервала времени $[0, T]$ доступна наблюдению реализация гауссовского случайного поля $x(\mathbf{r}, t)$, где $\mathbf{r} = (x, y)$ — радиус-вектор точки на плоскости, принадлежащей Ω , а t — время. Положим [3–5], что при гипотезе H_1 поле $x(\mathbf{r}, t)$ содержит изображение движущегося из заданного положения со скоростью $\mathbf{V}_0$ объекта $s(\mathbf{r} - \mathbf{V}_0 t)$, неподвижный фон $v(\mathbf{r})$ и аддитивный гауссовский пространственно-временной белый шум $n(\mathbf{r}, t)$ с нулевым математическим ожиданием и корреляционной функцией $\langle n(\mathbf{r}_1, t_1) n(\mathbf{r}_2, t_2) \rangle = N_0 \delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) \delta(t_1 - t_2) / 2$, где N_0 — односторон-

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

няя спектральная плотность белого шума. При гипотезе H_0 поле $x(\mathbf{r}, t)$ содержит фон $v(\mathbf{r})$ и аддитивный шум $n(\mathbf{r}, t)$.

В соответствии с аппликативной моделью [1–5], учитывающей эффекты затенения объектом участка фона, полагаем, что изображение объекта занимает часть Ω_s области Ω , а фоновое излучение формируется оставшейся частью 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 плоскости наблюдения. Тогда в течение интервала времени $[0, T]$ наблюдению доступна реализация изображения в картинной плоскости:

$$x(\mathbf{r}, t) = \gamma_0 s(\mathbf{r} - \mathbf{V}_0 t) I_s(\mathbf{r} - \mathbf{V}_0 t) + [1 - \gamma_0 I_s(\mathbf{r} - \mathbf{V}_0 t)] v(\mathbf{r}) + n(\mathbf{r}, t), \quad (1)$$

где $\gamma_0 = 1$ когда справедлива гипотеза H_1 , $\gamma_0 = 0$, если справедлива гипотеза H_0 , а $I_s(\mathbf{r}) = 1$ для $\mathbf{r} \in \Omega_s$, и $I_s(\mathbf{r}) = 0$ при $\mathbf{r} \notin \Omega_s$ — индикаторная функция, описывающая форму изображения объекта.

Положим, что объект движется из заданного положения с априори неизвестным вектором скорости $\mathbf{V}_0 = V_{0x} \mathbf{i}_x + V_{0y} \mathbf{i}_y$, где $\mathbf{i}_x$ и $\mathbf{i}_y$ — орты осей X и Y прямоугольной системы координат, а V_{0x} и V_{0y} — компоненты вектора $\mathbf{V}_0$, которые представляют собой проекции этого вектора на оси X и Y . Обозначим через V_x и V_y компоненты вектора $\mathbf{V} = V_x \mathbf{i}_x + V_y \mathbf{i}_y$.

На основе наблюдаемых данных (1) требуется вынести решение о наличии или отсутствии изображения объекта в области наблюдения.

Для решения задачи проверки гипотезы H_1 против альтернативы H_0 необходимо формировать логарифм функционала отношения правдоподобия (ФОРП) [5]

$$L(V_x, V_y) = \frac{2}{N_0} \int_0^T \int_{\Omega} \left\{ x(\mathbf{r}, t) [s(\mathbf{r} - \mathbf{V}t) - v(\mathbf{r})] - \frac{s^2(\mathbf{r} - \mathbf{V}t) - v^2(\mathbf{r})}{2} \right\} I_s(\mathbf{r} - \mathbf{V}t) d\mathbf{r} dt. \quad (2)$$

Если скорость движения объекта априори известна [4], то решение о наличии или отсутствии изображения объекта в области наблюдения выносится путем сравнения величины $L = L(V_{0x}, V_{0y})$ с порогом h , определяемым выбранным критерием оптимальности [6–8]. Если

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

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

Положим далее, что компоненты априори неизвестного вектора скорости $\mathbf{V}_0$ принимают значения из априорных интервалов $W_x = [-V_{x \max} / 2, V_{x \max} / 2]$,

$W_y = [-V_{y \max} / 2, V_{y \max} / 2]$. Обозначим через W двумерную область, в пределах которой $V_{0x} \in W_x, V_{0y} \in W_y$.

Для того, чтобы исключить влияние неизвестных компонент вектора скорости, заменим в (2) их значения на оценки максимального правдоподобия [8, 9]. Алгоритм МП обнаружения изображения движущегося с неизвестным вектором скорости объекта формирует величину $\hat{L} = \sup_{(V_x, V_y) \in W} L(V_x, V_y)$ и при-

нимает решение, сравнивая абсолютный (наибольший) максимум логарифма ФОП $\hat{L}$ с порогом h в соответствии с правилом (3).

Обычно эффективность алгоритма обнаружения характеризуется величинами вероятностей ошибки первого рода (ложной тревоги) α и второго рода (пропуска изображения объекта) β [6, 7]. Определим эти вероятности для МП алгоритма обнаружения.

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

$$L(V_x, V_y) = \gamma_0 \hat{S}(V_x, V_{0x}; V_y, V_{0y}) + \hat{N}(V_x, V_y) - \hat{S}(V_x, V_x; V_y, V_y) / 2, \quad (4)$$

где $\gamma_0 = 1$, если верна гипотеза H_1 , и $\gamma_0 = 0$, если справедлива гипотеза H_0 ,

$$\hat{S}(V_x, V_{0x}; V_y, V_{0y}) = \frac{2}{N_0} \int_0^T \iint [s(x - V_x t, y - V_y t) - v(x, y)] \times$$

$$\times [s(x - V_{0x} t, y - V_{0y} t) - v(x, y)] I_s(x - V_x t, y - V_y t) I_s(x - V_{0x} t, y - V_{0y} t) dx dy dt \quad (5)$$

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

$$\langle \hat{N}(V_{1x}, V_{1y}) \hat{N}(V_{2x}, V_{2y}) \rangle = \hat{S}(V_{1x}, V_{2x}; V_{1y}, V_{2y})$$

Величина $z^2 = \hat{S}(V_x, V_x; V_y, V_y)$ представляет собой отношение сигнал/шум (ОСШ) на выходе приемника МП [8, 9]. В общем случае ОСШ зависит от V_x и V_y , однако если фон постоянный (равномерный), ОСШ от скорости не зависит. Кроме того, ОСШ практически не зависит от скорости, если объект и фон мелкотекстурные [3, 4]. Далее будем считать, что ОСШ z^2 от V_x и V_y не зависит, то есть скорость является незнергетическим параметром [9]. При этом сигнальная функция (5) достигает своего максимального значения z^2 при $V_x = V_{0x}, V_y = V_{0y}$.

Рассмотрим случай обнаружения изображения равномерно окрашенного прямоугольного объекта размером $l_x \times l_y$, стороны которого расположены

вдоль осей X и Y соответственно, наблюдаемого на равномерном фоне, т.е. $s(\mathbf{r}) = s_0$, $v(\mathbf{r}) = v_0$. В этом случае максимальное значение сигнальной функции (5) равно $z^2 = 2l_x l_y T (s_0 - v_0)^2 / N_0$, а нормированная сигнальная функция имеет вид

$$S(V_x, V_{0x}; V_y, V_{0y}) = S(V_x - V_{0x}, V_y - V_{0y}) = \hat{S}(V_x, V_{0x}; V_y, V_{0y}) / z^2 = \\ = \Theta(1 - \Theta \delta_x |V_x - V_{0x}| - \Theta \delta_y |V_y - V_{0y}| + 4\Theta^2 \delta_x \delta_y |V_x - V_{0x}| |V_y - V_{0y}| / 3), \quad (6)$$

где $\delta_x = T / 2l_x$, $\delta_y = T / 2l_y$, а $\Theta = \min\{1, 1 / 2\delta_x |V_x - V_{0x}|, 1 / 2\delta_y |V_y - V_{0y}|\}$.

При $\Delta V = |\mathbf{V} - \mathbf{V}_0| = \sqrt{(V_x - V_{0x})^2 + (V_y - V_{0y})^2} \rightarrow 0$ нормированная сигнальная функция (6) допускает асимптотическое представление

$$S(V_x, V_{0x}; V_y, V_{0y}) = S(V_x - V_{0x}, V_y - V_{0y}) = \\ = 1 - \delta_x |V_x - V_{0x}| - \delta_y |V_y - V_{0y}| + o(\Delta V). \quad (7)$$

Отметим, что $S(V_x, V_{0x}; V_y, V_{0y}) = O(\Delta V^{-1})$ при $\Delta V \rightarrow \infty$.

Учитывая, что ОСШ z^2 не зависит от скорости, вместо $L(V_x, V_y)$ (4) введем нормированный член логарифма ФОП, зависящий от скорости

$$L_z(V_x, V_y) = L(V_x, V_y) / z + z / 2 = \gamma_0 z S(V_x, V_{0x}; V_y, V_{0y}) + N(V_x, V_y), \quad (8)$$

где

$$N(V_x, V_y) = \hat{N}(V_x, V_y) / z \quad (9)$$

— нормированная шумовая функция. При этом решение о наличии изображения объекта в наблюдаемой реализации принимается, если $\hat{L}_z = \sup_{(V_x, V_y) \in W} L_z(V_x, V_y) > u$, где $u = h / z + z / 2$ — нормированный порог. В

противном случае выносятся решение об отсутствии объекта.

Согласно (7), сигнальная функция не имеет второй производной при $\Delta V = 0$. Так как сигнальная функция (6) является функцией корреляции для шумовой функции (9) [9], реализации нормированного логарифма ФОП $L_z(V_x, V_y)$ (8) недифференцируемы, хотя и непрерывны с вероятностью единица [10].

Определим размеры элемента разрешения по компонентам скорости Δ_x и Δ_y как полуширину соответствующего сечения сигнальной функции (6) при замене ее треугольной аппроксимацией (7): $\Delta_x = 1 / \delta_x = 2l_x / T$, $\Delta_y = 1 / \delta_y = 2l_y / T$. Тогда число разрешимых значений проекций скорости в априорной области W равно $m_x = V_{x \max} / \Delta_x = TV_{x \max} / 2l_x$, $m_y = V_{y \max} / \Delta_y = TV_{y \max} / 2l_y$. Параметр

$$m = m_x m_y, \quad (10)$$

определяющий приведенную площадь априорной области возможных значений компонент вектора скорости, равен числу независимых отсчетов поля (8) в области W .

Вероятности ошибок ложной тревоги α и пропуска объекта β в приемнике МП можно записать в виде

$$\alpha = P \left[\sup_{(V_x, V_y) \in W} L_z(V_x, V_y) > u \mid \gamma_0 = 0 \right] = P[M_0 > u], \quad (11)$$

$$\beta = P \left[\sup_{(V_x, V_y) \in W} L_z(V_x, V_y) < u \mid \gamma_0 = 1 \right] = P[M_1 < u]. \quad (12)$$

Здесь M_0 и M_1 — соответственно величины абсолютного (наибольшего) максимума нормированного логарифма ФОП $L_z(V_x, V_y)$ (8) при отсутствии и наличии изображения объекта в наблюдаемой реализации.

Для определения вероятности ложной тревоги согласно (8), (11) надо найти функцию распределения абсолютного максимума реализации однородного центрированного гауссовского случайного поля $N(V_x, V_y)$ (9):

$$F_0(u) = P[N(\hat{V}_x, \hat{V}_y) < u], \quad (13)$$

где $(\hat{V}_x, \hat{V}_y)$ — положение абсолютного максимума (8) при $(V_x, V_y) \in W$ и отсутствии изображения объекта в области наблюдения. Тогда вероятность ложной тревоги

$$\alpha = 1 - F_0(u). \quad (14)$$

Используя разработанный в [11] метод локально аддитивной аппроксимации, получим асимптотически точное (с ростом порога u) выражение для функции распределения (13). Будем считать порог u достаточно большим, так что вероятность $F_0(u)$ непревышения этого порога реализацией однородного гауссовского случайного поля $N(V_x, V_y)$ (9) определяется только локальными свойствами его корреляционной функции [7, 8].

Согласно (7), при $\Delta_N = \max(|V_{1x} - V_{2x}|, |V_{1y} - V_{2y}|) \rightarrow 0$ корреляционная функция $S(V_{1x} - V_{2x}, V_{1y} - V_{2y})$ (6) поля (9) допускает асимптотическое представление

$$S(V_{1x} - V_{2x}, V_{1y} - V_{2y}) = \frac{1}{2} B_x(V_{1x} - V_{2x}) + \frac{1}{2} B_y(V_{1y} - V_{2y}) + o(|\Delta_N|), \quad (15)$$

где

$$B_x(V_{1x} - V_{2x}) = \begin{cases} 1 - 2\delta_x |V_{1x} - V_{2x}|, & |V_{1x} - V_{2x}| < \Delta_x / 2, \\ 0, & |V_{1x} - V_{2x}| \geq \Delta_x / 2, \end{cases} \quad (16)$$

$$B_y(V_{1y} - V_{2y}) = \begin{cases} 1 - 2\delta_y |V_{1y} - V_{2y}|, & |V_{1y} - V_{2y}| < \Delta_y / 2, \\ 0, & |V_{1y} - V_{2y}| \geq \Delta_y / 2. \end{cases} \quad (17)$$

Обозначим $N_x(V_x)$ и $N_y(V_y)$ — статистически независимые центрированные гауссовские стационарные случайные процессы с корреляционными функциями (16) и (17) соответственно. Из (15)–(17) следует, что корреляционные функции гауссовских полей $N(V_x, V_y)$ (9) и $[N_x(V_x) + N_y(V_y)] / \sqrt{2}$ совпадают при $\Delta_N \rightarrow 0$. Поэтому при больших значениях u функцию распределения $F_0(u)$ (13) можно записать в виде

$$F_0(u) \approx P \left[\sup_{V_x \in W_x} N_x(V_x) + \sup_{V_y \in W_y} N_y(V_y) < u\sqrt{2} \right] = \int_{-\infty}^{\infty} F_x(u\sqrt{2} - x) w_y(x) dx, \quad (18)$$

где $F_x(x) = P \left[\sup_{V_x \in W_x} N_x(V_x) < x \right]$, $F_y(x) = P \left[\sup_{V_y \in W_y} N_y(V_y) < x \right]$ — функции распределения абсолютных максимумов случайных процессов $N_x(V_x)$ и $N_y(V_y)$, а $w_y(x) = dF_y(x)/dx$. Точные выражения для $F_x(x)$ и $F_y(x)$ найти не удастся, однако в [7, 8] для этих функций получены аппроксимации

$$F_x(x) = \begin{cases} \exp[-m_x x \sqrt{2/\pi} \exp(-x^2/2)], & x \geq 1 \\ 0, & x < 1, \end{cases} \quad (19)$$

$$F_y(x) = \begin{cases} \exp[-m_y x \sqrt{2/\pi} \exp(-x^2/2)], & x \geq 1 \\ 0, & x < 1 \end{cases} \quad (20)$$

Точность аппроксимаций (19), (20) возрастает с увеличением m_x , m_y и x , поэтому их можно использовать для приближенного вычисления интеграла (18) при больших значениях u . Согласно (20),

$$w_y(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} m_y (x^2 - 1) \exp\left(-\frac{x^2}{2} - \sqrt{\frac{2}{\pi}} m_y x \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)\right) + \delta(x-1) \exp\left(-\sqrt{\frac{2}{\pi}} m_y \exp\left(-\frac{1}{2}\right)\right) \quad (21)$$

при $x \geq 1$, и $w_y(x) = 0$ при $x < 1$. Используя (19), (21) в (18), имеем:

$$F_0(u) = \exp\left[-\sqrt{\frac{2}{\pi}} (m_y \exp(-1/2) + m_x (u\sqrt{2} - 1) \exp(-(u-1/\sqrt{2})^2))\right] +$$

$$+ \sqrt{\frac{2}{\pi}} m_y \int_1^{u\sqrt{2}-1} (x^2 - 1) \exp \left\{ -\frac{x^2}{2} - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[m_y x \exp \left(-\frac{x^2}{2} \right) + m_x (u\sqrt{2} - x) \exp \left(-(u\sqrt{2} - x)^2 / 2 \right) \right] \right\} dx, \quad (22)$$

при $u > \sqrt{2}$, и $F_0(u) = 0$ при $u \leq \sqrt{2}$. Точность формулы (22) возрастает с увеличением m_x , m_y и u .

Подставляя (22) в (14), находим приближенное выражение для вероятности ложной тревоги:

$$\alpha = 1 - \exp \left[-\sqrt{\frac{2}{\pi}} (m_y \exp(-1/2) + m_x (u\sqrt{2} - 1) \exp(-(u\sqrt{2} - 1)^2 / 2)) \right] - \sqrt{\frac{2}{\pi}} m_y \int_1^{u\sqrt{2}-1} (x^2 - 1) \exp \left\{ -\frac{x^2}{2} - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[m_y x \exp \left(-\frac{x^2}{2} \right) + m_x (u\sqrt{2} - x) \exp \left(-(u\sqrt{2} - x)^2 / 2 \right) \right] \right\} dx, \quad (23)$$

при $u > \sqrt{2}$, и $\alpha = 1$ при $u \leq \sqrt{2}$.

При умеренных значениях m_x , m_y и больших x из (19), (20) получим менее точные, но более простые выражения для функций распределения абсолютных максимумов случайных процессов $N_x(V_x)$ и $N_y(V_y)$ [8, 11]:

$$F_x(x) = 1 - m_x x \sqrt{2/\pi} \exp(-x^2/2), \quad F_y(x) = 1 - m_y x \sqrt{2/\pi} \exp(-x^2/2). \quad (24)$$

Подставляя (24) в (18), а результат — в (14), находим упрощенное выражение для вероятности ложной тревоги, справедливое при весьма больших значениях нормированного порога u [11]:

$$\alpha \approx m_x m_y u (u^2 - 3) \exp(-u^2/2) / \sqrt{2\pi}. \quad (25)$$

Точность формул (23), (25) возрастает с увеличением m_x , m_y и u . Отметим, что точность приближенной формулы (25) быстро улучшается с увеличением u (уменьшением α), и оказывается удовлетворительной уже при $\alpha < 10^{-1}$ [11].

Определим теперь вероятность пропуска изображения объекта β (12). Полагая, что в наблюдаемой реализации $x(r, t)$ (1) присутствует изображение объекта, то есть $\gamma_0 = 1$, обозначим:

$$M_S = \sup L_z(V_x, V_y) \text{ при } |V_x - V_{0x}| < \Delta_x, |V_y - V_{0y}| < \Delta_y, \quad (26)$$

$M_N = \sup L_z(V_x, V_y)$ при остальных значениях $(V_x, V_y) \in W$.

Поскольку $M_1 = \max(M_S, M_N)$, выражение (12) можно переписать в виде $\beta = P[M_N < u, M_S < u]$. Если число независимых отсчетов (10) поля (8) велико, т. е.

$$m \gg 1, \quad (27)$$

то случайные величины M_S и M_N можно считать приближенно статистически независимыми [7, 8]. Следовательно, при выполнении условия (27) вероятность пропуска объекта

$$\beta \approx P[M_N < u]P[M_S < u] = F_N(u)F_S(u), \quad (28)$$

причем $F_N(u) \approx F_0(u)$, где $F_0(u)$ определяется из (22) [7, 8]. Функция $F_S(u)$ представляет собой распределение величины абсолютного (наибольшего) максимума (26). Для расчета вероятности $F_S(u)$ достаточно исследовать поведение сигнальной и шумовой функций в малой окрестности точки (V_{0x}, V_{0y}) . При $\Delta = \max(|V_x - V_{0x}|, |V_y - V_{0y}|, |V_{1x} - V_{2x}|, |V_{1y} - V_{2y}|) \rightarrow 0$ математическое ожидание и корреляционная функция поля (8) допускают асимптотические представления

$$\langle L_z(V_x, V_y) \rangle = zS(V_x - V_{0x}, V_y - V_{0y}) = \frac{z}{2} B_x(V_x - V_{0x}) + \frac{z}{2} B_y(V_y - V_{0y}) + o(|\Delta|), \quad (29)$$

$$S(V_{1x} - V_{2x}, V_{1y} - V_{2y}) = \frac{1}{2} B_x(V_{1x} - V_{2x}) + \frac{1}{2} B_y(V_{1y} - V_{2y}) + o(|\Delta|), \quad (30)$$

где $B_x(\cdot)$ и $B_y(\cdot)$ определяются выражениями (16) и (17) соответственно. Обозначим через $L_x(V_x)$, $L_y(V_y)$ статистически независимые гауссовские случайные процессы с математическими ожиданиями $zB_x(V_x - V_{0x})/\sqrt{2}$, $zB_y(V_y - V_{0y})/\sqrt{2}$ и корреляционными функциями $B_x(V_{1x} - V_{2x})$ (16), $B_y(V_{1y} - V_{2y})$ (17) соответственно. Из (29), (30) следует, что статистические характеристики гауссовских случайных полей $L_z(V_x, V_y)$ (8) и $[L_x(V_x) + L_y(V_y)]/\sqrt{2}$ асимптотически совпадают в малой окрестности точки (V_{0x}, V_{0y}) . Используя метод локально аддитивной аппроксимации [11], находим:

$$F_S(u) \approx P \left[\sup_{|V_x - V_{0x}| \leq \Delta_x} L_x(V_x) + \sup_{|V_y - V_{0y}| \leq \Delta_y} L_y(V_y) < u\sqrt{2} \right] = \int_{-\infty}^{\infty} F(u\sqrt{2} - x)w(x)dx, \quad (31)$$

где $F(x) \approx P \left[\sup_{|V_x - V_{0x}| \leq \Delta_x} L_x(V_x) < x \right] = P \left[\sup_{|V_y - V_{0y}| \leq \Delta_y} L_y(V_y) < x \right]$ — совпадающие

функции распределения абсолютных максимумов случайных процессов $L_x(V_x)$ и $L_y(V_y)$, а $w(x) = dF(x)/dx$ — соответствующая плотность вероятности. В [7] на основе метода локально-марковской аппроксимации получено приближенное выражение для функции распределения $F(x)$:

$$F(x) = \Phi(x - z/\sqrt{2}) - 2\exp(3z^2/4 - xz/\sqrt{2})\Phi(x - \sqrt{2}z) + \exp(2z^2 - \sqrt{2}xz)\Phi(x - 3z/\sqrt{2}), \quad (32)$$

точность которого возрастает с увеличением z . Здесь

$\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \exp(-g^2/2) dg / \sqrt{2\pi}$ — интеграл вероятности. При этом

$$w(x) = z\sqrt{2} \left[\exp\left(\frac{3}{4}z^2 - \frac{xz}{\sqrt{2}}\right)\Phi(x - \sqrt{2}z) - \exp(2z^2 - \sqrt{2}xz)\Phi\left(x - \frac{3}{\sqrt{2}}z\right) \right]. \quad (33)$$

В соответствии с (28), вероятность пропуска объекта β при неизвестном векторе скорости движения можно представить в виде

$$\beta \approx F_0(u) \int_{-\infty}^{\infty} F(u\sqrt{2} - x)w(x)dx, \quad (34)$$

где функции $F_0(u)$, $F(x)$ и $w(x)$ определены в (22), (32) и (33) соответственно. Точность выражения (34) возрастает с увеличением z , u , m_x и m_y .

В [4] рассмотрен случай обнаружения изображения объекта, движущегося априори известном направлении с неизвестной величиной скорости, принимающей значения из априорного интервала $W_1 = [0, V_{\max}]$. В этой работе найдены асимптотические выражения для вероятностей ошибок ложной тревоги и пропуска объекта:

$$\alpha_1 \approx \begin{cases} 1 - \exp[-m_1 u \exp(-u^2/2)/\sqrt{2\pi}], & u \geq 1 \\ 1, & u < 1, \end{cases} \quad (35)$$

$$\beta_1 \approx \exp[-m_1 u \exp(-u^2/2)/\sqrt{2\pi}] \times \times \{\Phi(u - z) - 2\exp(3z^2/2 - uz)\Phi(u - 2z) + \exp(4z^2 - 2uz)\Phi(u - 3z)\}, \quad (36)$$

при $u \geq 1$, и $\beta_1 \approx 0$ при $u < 1$, где $m_1 = l_V TV_{\max} / 2G_s$ — приведенная длина априорного интервала W_1 возможных значений скорости, l_V — максимальный размер изображения объекта в направлении, перпендикулярном движению, а G_s — площадь изображения объекта.

Конкретизируем приведенные выражения для случая обнаружения изображения прямоугольного объекта размером $l_x \times l_y$, стороны которого ориентированы вдоль координатных осей X и Y соответственно, движущегося под углом φ к стороне длины l_x . Без ограничения общности можно считать, что $0 \leq \varphi \leq \pi/2$. В этом случае площадь изображения объекта $G_s = l_x l_y$, его размер в перпендикулярном направлении $l_v = l_x \sin \varphi + l_y \cos \varphi$, неизвестная величина скорости движения принимает значения из интервала $[0, V_{\max}]$, где

$$V_{\max} = \begin{cases} V_{x \max} / 2 \cos \varphi, & 0 \leq \varphi < \varphi_0, \\ V_{y \max} / 2 \sin \varphi, & \varphi_0 \leq \varphi \leq \pi/2, \end{cases}$$

а $\varphi_0 = \arctg(V_{y \max} / V_{x \max})$. При этом число разрешимых значений скорости

$$m_1 = \frac{1}{2} \left(m_x + m_y \frac{\tg \varphi}{\tg \varphi_0} \right) \quad \text{при} \quad 0 \leq \varphi \leq \varphi_0, \quad \text{и} \quad m_1 = \frac{1}{2} \left(m_y + m_x \frac{\ctg \varphi}{\ctg \varphi_0} \right) \quad \text{если}$$

$$\varphi_0 < \varphi \leq \pi/2$$

Положим теперь, что скорость движения объекта априори известна. В этом случае вероятности ошибок ложной тревоги и пропуска объекта определяются формулами [4]

$$\alpha_0 = 1 - \Phi(u), \quad (37)$$

$$\beta_0 = \Phi(u - z). \quad (38)$$

На рис. 1 показаны зависимости вероятности ложной тревоги от нормированного порога u при $m_x = m_y = 10$ и $\varphi_0 = 45^\circ$ ($V_{x \max} = V_{y \max}$). Кривая 1 соответствует случаю, когда неизвестны величина скорости и направление движения изображения объекта, и рассчитывалась по формуле (23). Кривая 2 соответствует случаю, когда величина скорости неизвестна, а направление движения известно и составляет угол $\varphi = \varphi_0$ со стороной длины l_x , и рассчитывалась по формуле (35). Кривая 3 соответствует случаю, когда величина скорости и направление движения априори известны, и рассчитывалась по формуле (37).

На рис. 2 показаны зависимости вероятности пропуска изображения объекта от ОСШ z . Порог выбирался по заданной вероятности ложной тревоги на основании критерия Неймана-Пирсона при $\alpha = 10^{-2}$ с использованием формул (23), (35) и (37). Кривая 1 соответствует случаю, когда неизвестны величина скорости и направление движения изображения объекта, и рассчитывалась по формуле (34). Кривая 2 соответствует случаю, когда величина скорости неизвестна, а направление движения известно и составляет угол $\varphi = \varphi_0$ со стороной длины l_x , и рассчитывалась по формуле (36). Кривая 3 соответствует случаю, когда величина скорости и направление движения априори известны, и рассчитывалась по формуле (38).

Согласно рис. 1, 2 априорное незнание направления движения объекта может привести к существенному проигрышу в эффективности обнаружения

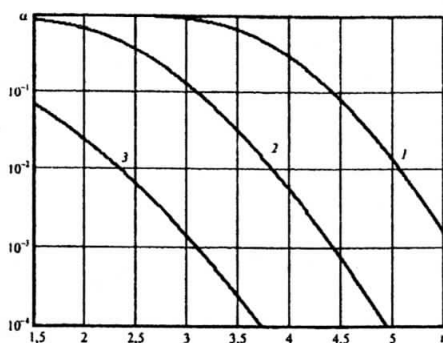


Рис. 1

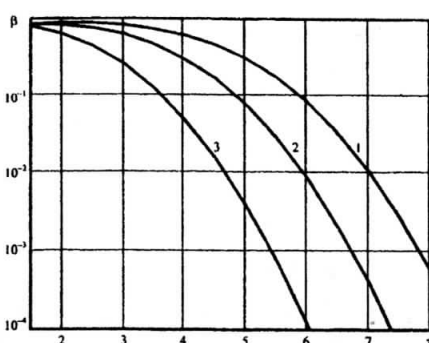


Рис. 2

его изображения. При этом потери в эффективности обнаружения возрастают с увеличением числа элементов разрешения по скорости в априорной области возможных значений вектора скорости и с увеличением отношения сигнал/шум.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трифонов А. П., Прибытков Ю. Н. Обнаружение случайных изображений пространственно-протяженных объектов, затеняющих фон // *Автометрия*. — 2000. — Т.36. — №4. — С. 14—25.
2. Бычков А. А., Понькин В. А. Обнаружение изображений пространственно-протяженных затеняющих фон объектов // *Автометрия*. — 1992. — Т.28. — №4. — С. 33—40.
3. 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. — Т.1. — №4. — С. 24—29.
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. Трифонов А. П., Куцов Р. В. Обнаружение движущегося пространственно протяженного объекта на фоне с неизвестной интенсивностью // *Автометрия*. — 2005. — Т.41. — №1. — С. 3—18.
6. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. — М.: Сов. радио, 1966. — 680 с.
7. Акимов П. С., Бакут П. А., Богданович В. А. и др. Теория обнаружения сигналов / Под ред. П. А. Бакута. — М.: Радио и связь, 1984. — 440 с.
8. Трифонов А. П., Шинаков Ю. С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. — М.: Радио и связь, 1986. — 264 с.
9. Куликов Е. И., Трифонов А. П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. — М.: Сов. радио, 1978. — 296 с.
10. Крамер Г., Лидбеттер М. Стационарные случайные процессы. — М.: Мир, 1969. — 398 с.

УДК 621.395.74

КОХАНОВ А. Б.

ТЕХНОЛОГИЯ СИНХРОННОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ

Рассмотрен новый технологический путь построения синхронных детекторов, которые обеспечивают высококачественное детектирование сигналов с амплитудной модуляцией (АМ), амплитудно-фазовой модуляцией (АФМ) и построение смесителей с отсутствующим зеркальным каналом.

В последнее время развитие технологий передачи информации привели к появлению систем мобильной связи GSM, DECT, WCDMA, DVB и т. д., которые в свою очередь потребовали появления новых методов приема и обработки сигналов. Так [1, стр. 130] приведено описание приемника с субдискретизацией (подвыборками), где радиочастотный сигнал дискретизируется с Найквистовой скоростью, преобразуясь непосредственно в сигнал информационного тракта. Такая технология обработки позволяет обойтись без традиционного детектора. По такому же принципу (синхронного детектирования), но в аналоговом виде работают и приемники с прямым преобразованием сигнала [1, стр. 120]. В [2, стр. 320] приведено аналитическое выражение для синхронного детектирования, которое заключается в перемножении несущего промодулированного синусоидального колебания и сигнала гетеродина с частотой равной частоте несущего синусоидального колебания. Это выражение в аналитической форме выглядит так

$$e(t) = k e_r e(t) [\cos(2\omega_0 t + \theta_0 + \theta_r) + \cos(\theta_0 - \theta_r)], \quad (1)$$

где k — коэффициент усиления перемножителя, e_r — амплитуда сигнала гетеродина, $e(t)$ — модулирующий сигнал (передаваемая информация), ω_0 — частота несущего колебания и частота гетеродина ($\omega_0 = \omega_r$, ω_r — частота гетеродина), θ_0 и θ_r — фазы несущего промодулированного сигнала и гетеродина соответственно, t — время.

После фильтрации и удаления части из (1) со значением $2\omega_0$, выходной сигнал

$$E e(t) \cos(\theta_0 - \theta_r), \quad (2)$$