

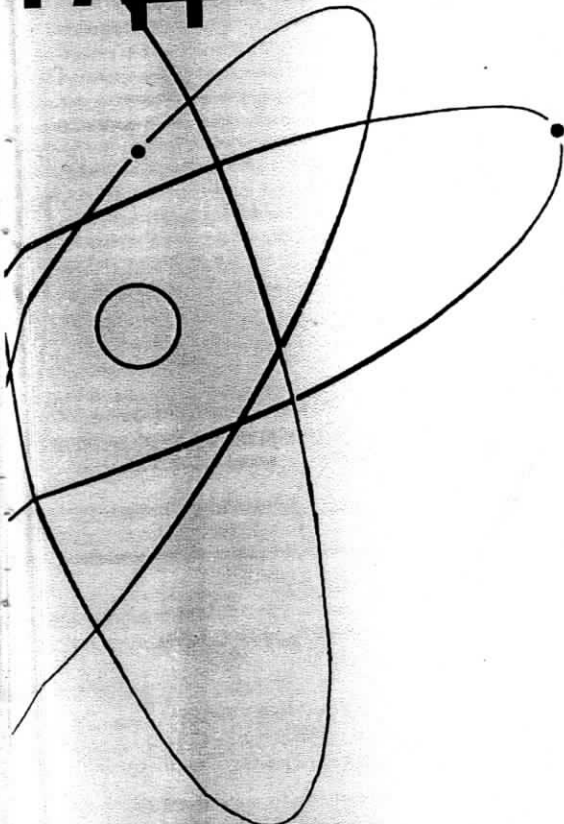
275

ISSN 0021-3470



ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ
ЗАВЕДЕНИЙ

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА



ТОМ 52

~~5-6~~
май-июнь

ИЗДАНИЕ
НАЦИОНАЛЬНОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
УКРАИНЫ
«КИЕВСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ»

2009

3. Коростелев А. А. Пространственно-временная теория радиосистем: Учеб. пособие для вузов. — М.: Радио и связь, 1987. — 320 с.
4. Радзиевский В. Г., Сирота А. А. Информационное обеспечение радиоэлектронных систем в условиях конфликта. — М.: ИПРЖР, 2001. — 456 с.
5. Селекция и распознавание на основе локационной информации /А. Л. Горелик, Ю. Л. Барабаш, О. В. Кривошеев, С. С. Эпштейн; Под ред. А. Л. Горелика. — М.: Радио и связь, 1990. — 240 с.
6. Информационные технологии в радиотехнических системах: Учеб. пособие. — 2-е изд., перераб. и доп. /В. А. Васин, И. Б. Власов, Ю. М. Егоров и др.; Под ред И. Б. Федорова. — М.: Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 2004. — 768 с.
7. Акимов П. С., Сенин А. И., Соленов В. И. Сигналы и их обработка в информационных системах: Учеб. пособие для вузов. — М.: Радио и связь, 1994.
8. Sang Huai-sheng etc. WHT-Based detection and parameter estimation of a single LFM interference signal in spread spectrum systems. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, Vol. 9(1): 52–55.
9. Liu Ai-fang etc. Multi-component LFM signal detection and parameters estimation based on Radon-ambiguity transform. Journal of Nanjing University of Science and Technology, Vol. 28(4): 409–413.
10. S. Barbarossa. Analysis of Multicomponent LFM Signals by a Combined Wigner-Hough Transform. IEEE Trans. On SP, Vol. 43:1511–1515.
11. Chen Guang-Hua, Cao Jia-Lin. Statistical Performance of the Wigner-Ville Distribution and the Cross Wigner-Ville Distribution. Journal of Shanghai University, 2003, 7(4):379–383.
12. Kodera K, Gendrin R, De Villedary C. Analysis of timevarying signals with small BT values. IEEE Trans. Acous., Speech, Signal Processing, Vol. 34:64 – 76.
13. Auger F, Flandrin P. Improving the Readability of Time-Frequency and Time-Scale Representations by the Reassignment Method. IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 43:1068 – 1089.
14. Duda, R. O., and Hart, P. E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures. Communication of the ACM, 15(1):11–15.

ЖВИНАУ, Житомир,
Радиолокационный ин-т, Ухань, Китай

Поступила в редакцию 01.04.08

УДК 621.391

ТРИФОНОВ А. П., КУЦОВ Р. В.

ОБНАРУЖЕНИЕ ДВИЖУЩЕГОСЯ С НЕИЗВЕСТНЫМ ВЕКТОРОМ СКОРОСТИ ОБЪЕКТА ПО ЕГО ИЗОБРАЖЕНИЮ С НЕИЗВЕСТНОЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ*

С учетом затенения фона выполнены синтез и анализ максимально правдоподобного алгоритма обнаружения пространственно протяженного объекта, движущегося с неизвестным вектором скорости, по его изображению с неизвестной интенсивностью.

В процессе обработки результатов дистанционного наблюдения возникает необходимость в обнаружении объектов по их изображениям. Высокая разрешающая способность современных систем дистанционного наблюдения

требует учета эффекта затенения пространственно протяженным объектом (ППО) [1, 2] части подстилающей поверхности. Вопросы обнаружения ППО рассматриваются в [1–6] и других работах. Задачам синтеза и анализа алгоритмов обнаружения движущихся ППО посвящены работы [3–6] и др. В [3] считалось, что параметры движения объекта априори известны. В [4] получены характеристики обнаружения изображения объекта, движущегося в заданном направлении с неизвестной величиной скорости. В [5] предполагалось, что не только величина скорости, но и направление движения априори неизвестны, то есть вектор скорости движения объекта предполагался неизвестным. Найденные в работах [3–5] характеристики обнаружения были получены в предположении, что интенсивность изображения движущегося объекта априори известна. В то же время, во многих случаях обычные условия формирования и передачи изображения приводят к тому, что его интенсивность может быть априори неизвестна. В связи с этим представляется актуальной задачей исследование влияния на характеристики обнаружения априорного незнания интенсивности изображения объекта, движущегося с неизвестным вектором скорости.

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

Пусть в двумерной области Ω в течение интервала времени $[0, T]$ доступна наблюдению реализация гауссовского случайного поля $\Xi(\mathbf{r}, t)$, где $\mathbf{r} = (x, y)$ — радиус-вектор точки на плоскости, принадлежащей Ω , а t — время. Положим [5], что при гипотезе H_1 поле $\Xi(\mathbf{r}, t)$ содержит изображение $\alpha(\mathbf{r} - \mathbf{V}_0 t)$ движущегося из заданного положения в неизвестном направлении со скоростью \mathbf{V}_0 объекта, 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 — односторонняя спектральная плотность белого шума. При гипотезе H_0 поле $\Xi(\mathbf{r}, t)$ содержит фон $v(\mathbf{r})$ и аддитивный пространственно-временной шум $n(\mathbf{r}, t)$.

В соответствии с аппликативной моделью [1–6], учитывающей эффекты затенения объектом участка фона, полагаем, что изображение объекта занимает часть Ω , области Ω , а фон — оставшуюся часть области наблюдения. При отсутствии

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

объекта фон занимает всю область наблюдения. Тогда в течение интервала времени $[0, T]$ наблюдению доступна реализация изображения в картинной плоскости:

$$\Xi(\mathbf{r}, t) = \gamma_0 a_0 s_1(\mathbf{r} - \mathbf{V}_0 t) I_s(\mathbf{r} - \mathbf{V}_0 t) + \nu(\mathbf{r}) [1 - \gamma_0 I_s(\mathbf{r} - \mathbf{V}_0 t)] + n(\mathbf{r}, t), \quad (1)$$

где $\gamma_0 = 1$, когда справедлива гипотеза H_1 , и $\gamma_0 = 0$, если справедлива гипотеза H_0 ; $a_0 = \max s(\mathbf{r} - \mathbf{V}_0 t)$ — истинное значение априори неизвестной интенсивности изображения объекта; $s_1(\mathbf{r} - \mathbf{V}_0 t) = s(\mathbf{r} - \mathbf{V}_0 t) / a_0$, так что $\max s_1(\mathbf{r} - \mathbf{V}_0 t) = 1$; $I_s(\mathbf{r}) = 1$ при $\mathbf{r} \in \Omega_s$ и $I_s(\mathbf{r}) = 0$ при $\mathbf{r} \notin \Omega_s$ — индикатор, описывающий 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 $\mathbf{V} = V_x \mathbf{i}_x + V_y \mathbf{i}_y$ — вектор с компонентами V_x и V_y .

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

Для решения задачи проверки гипотезы H_1 против альтернативы H_0 необходимо формировать логарифм функционала отношения правдоподобия (ФОП) [5, 6]:

$$\begin{aligned} & \mathcal{L}(V_x, V_y, a) = \\ & = \frac{2}{N_0} \int_0^T \int_{\Omega} \left\{ \Xi(\mathbf{r}, t) [a s_1(\mathbf{r} - \mathbf{V}t) - \nu(\mathbf{r})] - \frac{a^2 s_1^2(\mathbf{r} - \mathbf{V}t) - \nu^2(\mathbf{r})}{2} \right\} I_s(\mathbf{r} - \mathbf{V}t) d\mathbf{r} dt. \quad (2) \end{aligned}$$

Если вектор скорости движения объекта и интенсивность его изображения априори известны, то решение о наличии или отсутствии объекта в области наблюдения выносится на основе сравнения величины $L = \mathcal{L}(V_{0x}, V_{0y}, a_0)$ с порогом h , определяемым выбранным критерием оптимальности [7, 8]. При

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

выносится решение о наличии объекта в области наблюдения, в противном случае — о его отсутствии.

С целью повышения эффективности обнаружения при неизвестной интенсивности изображения объекта целесообразно одновременно производить оценку неизвестной интенсивности [6, 8, 9]. Заменяя в (2) значение неизвестной интенсивности на ее оценку МП, получаем выражение для логарифма ФОП в случае, когда интенсивность изображения объекта априори неизвестна [6]:

$$L_m(V_x, V_y) = \sup_a \mathcal{L}(V_x, V_y, a) = \frac{\left[\int_0^T \int_{\Omega} \Xi(\mathbf{r}, t) s_1(\mathbf{r} - \mathbf{V}t) I_s(\mathbf{r} - \mathbf{V}t) d\mathbf{r} dt \right]^2}{N_0 \int_0^T \int_{\Omega} s_1^2(\mathbf{r} - \mathbf{V}t) I_s(\mathbf{r} - \mathbf{V}t) d\mathbf{r} dt}$$

$$-\frac{2}{N_0} \int_0^T \int_{\Omega} \Xi(\mathbf{r}, t) \mathbf{v}(\mathbf{r}) I_s(\mathbf{r} - \mathbf{V}t) d\mathbf{r} dt + \frac{1}{N_0} \int_0^T \int_{\Omega} \mathbf{v}^2(\mathbf{r}) I_s(\mathbf{r} - \mathbf{V}t) d\mathbf{r} dt. \quad (4)$$

При известном векторе скорости движения объекта решение о его наличии в области наблюдения принимается в соответствии с правилом (3), где $L = L_m(V_{0x}, V_{0y})$.

Пусть не только интенсивность изображения объекта, но и вектор скорости его движения априори неизвестны, а компоненты вектора скорости V_{0x} и V_{0y} принимают значения из априорных интервалов $W_x = [-V_{x \max} / 2; V_{x \max} / 2]$ и $W_y = [-V_{y \max} / 2; V_{y \max} / 2]$ соответственно [5]. 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 (4) их неизвестные значения на оценки МП $(\hat{V}_x, \hat{V}_y) = \arg \sup_{(V_x, V_y) \in W} L_m(V_x, V_y)$ [8]. Алгоритм МП обнаружения изображения, движущегося с неизвестным вектором скорости, формирует величину $L = \sup_{(V_x, V_y) \in W} L_m(V_x, V_y) = L_m(\hat{V}_x, \hat{V}_y)$, а решение о наличии или отсутствии объекта принимается в соответствии с правилом (3). Отметим, что алгоритм обнаружения объекта по его изображению с неизвестной интенсивностью является существенно нелинейным в отличие от случая, когда интенсивность изображения априори известна [5].

Положим далее, что изображение объекта и фон являются равномерными, т. е. $s_1(\mathbf{r} - \mathbf{V}t) = 1, v_1(\mathbf{r}) = b_0$. Подставляя в (4) реализацию наблюдаемых данных (1), получаем

$$L_m(V_x, V_y) = [\gamma_0 z S(V_x, V_{0x}; V_y, V_{0y}) + N(V_x, V_y)]^2 / 2, \quad (5)$$

где

$$S(V_x, V_{0x}; V_y, V_{0y}) = \frac{1}{G_s T} \int_0^T \int_{\Omega} \int_{\Omega} I_s(x - V_x t, y - V_y t) I_s(x - V_{0x} t, y - V_{0y} t) dx dy dt, \quad (6)$$

$z = |a_0 - b_0| \sqrt{2G_s T / N_0}$, а $N(V_x, V_y)$ — реализация гауссовского случайного поля с нулевым средним значением и корреляционной функцией $\langle N(V_{1x}, V_{1y}) N(V_{2x}, V_{2y}) \rangle = S(V_{1x}, V_{2x}; V_{1y}, V_{2y})$. Здесь G_s — площадь изображения объекта. Отметим, что

$$\max S(V_x, V_{0x}; V_y, V_{0y}) = S(V_{0x}, V_{0x}; V_{0y}, V_{0y}) = 1$$

Рассмотрим случай обнаружения прямоугольного объекта размером $l_x \times l_y$, стороны которого параллельны соответствующим координатным осям. В этом случае функция (6) имеет вид

$$S(V_x, V_{0x}; V_y, V_{0y}) = S(\tau_x, \tau_y) = \Theta \left(1 - \Theta \tau_x - \Theta \tau_y + 4\Theta^2 \tau_x \tau_y / 3 \right), \quad (7)$$

где $\tau_x = |V_x - V_{0x}| T / 2l_x$, $\tau_y = |V_y - V_{0y}| T / 2l_y$, $\Theta = \min \{ 1, 1 / 2\tau_x, 1 / 2\tau_y \}$, а $z^2 = 2l_x l_y T (a_0 - b_0)^2 / N_0$.

При $\Delta V = |V - V_0| = \sqrt{(V_x - V_{0x})^2 + (V_y - V_{0y})^2} \rightarrow 0$ функция (7) допускает асимптотическое представление

$$\begin{aligned} S(V_x, V_{0x}; V_y, V_{0y}) &= S(V_x - V_{0x}, V_y - V_{0y}) = \\ &= 1 - \delta_x |V_x - V_{0x}| - \delta_y |V_y - V_{0y}| + \alpha(\Delta V), \end{aligned} \quad (8)$$

где $\delta_x = T / 2l_x$, $\delta_y = T / 2l_y$. Отметим [4], что $S(V_x, V_{0x}; V_y, V_{0y}) = O(\Delta V^{-1})$ при $\Delta V \rightarrow \infty$.

Согласно (8), функция (7) не имеет второй производной при $\Delta V = 0$. Так как функция (7) является корреляционной функцией для $N(V_x, V_y)$, реализации поля $N(V_x, V_y)$ недифференцируемы, хотя и непрерывны с вероятностью единица [9].

Обычно эффективность алгоритма обнаружения характеризуется величинами вероятностей ложной тревоги α и пропуска объекта β [7, 8]. Поскольку обнаружение производится по методу МП, эти вероятности могут быть записаны в виде

$$\alpha_1 = P \left[\sup_{(V_x, V_y) \notin W} L_m(V_x, V_y) > h \mid \gamma_0 = 0 \right] = P[M_0 > h] \quad (9)$$

$$\beta_1 = P \left[\sup_{(V_x, V_y) \in W} L_m(V_x, V_y) < h \mid \gamma_0 = 1 \right] = P[M_1 < h] \quad (10)$$

Здесь M_0 и M_1 — соответственно величины абсолютного (наибольшего) максимума логарифма ФОП (4) при отсутствии и наличии изображения объекта в наблюдаемой реализации (1).

Для определения вероятности ложной тревоги согласно (5), (9) надо найти функцию распределения абсолютного максимума реализации случайного поля $N^2(V_x; V_y) / 2 \cdot F_0(h) = P[N^2(\hat{V}_x, \hat{V}_y) < 2h]$, где (\hat{V}_x, \hat{V}_y) — положение абсолютного максимума (4) при $(V_x, V_y) \in W$ и отсутствии объекта в области наблюдения ($\gamma_0 = 0$). Тогда вероятность ложной тревоги

$$\alpha_1 = 1 - F_0(h). \quad (11)$$

Заметим, что

$$\begin{aligned} F_0(h) &= P \left[\sup_{(V_x, V_y) \in W} |N(V_x, V_y)| < \sqrt{2h} \right] = \\ &= P^2 \left[\sup_{(V_x, V_y) \in W} N(V_x, V_y) < \sqrt{2h} \right] = F_N^2(\sqrt{2h}), \end{aligned} \quad (12)$$

где $F_N(u) = P[N(V_x, V_y) < u]$ — функция распределения абсолютного максимума гауссовского случайного поля $N(V_x, V_y)$.

Согласно (11), (12), для расчета вероятности ложной тревоги надо найти функцию $F_N(u)$. Будем считать порог u достаточно большим, так что вероятность $F_N(u)$ превышения этого порога реализацией однородного центрированного гауссовского случайного поля $N(V_x, V_y)$ определяется только локальными свойствами его корреляционной функции $S(V_{1x}, V_{2x}; V_{1y}, V_{2y})$ [8, 9]. При $\Delta V \rightarrow 0$ корреляционная функция поля $N(V_x, V_y)$ допускает асимптотическое представление

$$S(V_{1x}, V_{2x}; V_{1y}, V_{2y}) = [B_x(V_{1x} - V_{2x}) + B_y(V_{1y} - V_{2y})] \cdot 2 + o(\Delta V), \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} B_x(V_{1x} - V_{2x}) &= \max[1 - 2\delta_x |V_{1x} - V_{2x}|; 0], \\ B_y(V_{1y} - V_{2y}) &= \max[1 - 2\delta_y |V_{1y} - V_{2y}|; 0]. \end{aligned} \quad (14)$$

В [5] с использованием метода локально аддитивной аппроксимации [10] получено асимптотически точное (с ростом порога u) выражение для функции распределения величины абсолютного максимума центрированного гауссовского случайного поля $N(V_x, V_y)$, корреляционная функция которого допускает асимптотическое представление (13):

$$\begin{aligned} F_N(u) &= \exp \left[-\sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(m_y \exp\left(-\frac{1}{2}\right) + m_x (u\sqrt{2} - 1) \exp\left(-\frac{(u-1/\sqrt{2})^2}{2}\right) \right) \right] + \\ &+ \sqrt{\frac{2}{\pi}} m_y \int_1^{u\sqrt{2}-1} (x^2 - 1) \exp \left\{ -\frac{x^2}{2} - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[m_y x \exp(-x^2/2) + \right. \right. \\ &\left. \left. + m_x (u\sqrt{2} - x) \exp\left(-\frac{(u\sqrt{2} - x)^2}{2}\right) \right] \right\} dx \end{aligned} \quad (15)$$

при $u > \sqrt{2}$, и $F_N(u) = 0$ при $u \leq \sqrt{2}$. Точность формулы (15) возрастает с увеличением m_x, m_y и u . Здесь $m_x = TV_{x, \max} / 2l_x$ и $m_y = TV_{y, \max} / 2l_y$ — приведенные длины априорных интервалов возможных значений компонент вектора скорости, определяющие число их разрешимых значений [8, 9]. При этом число независимых отсчетов поля (5) в области W равно $m = m_x m_y$.

Подставляя (15) в (12), из (11) находим приближенное выражение для вероятности ложной тревоги при обнаружении движущегося с неизвестным вектором скорости объекта по его изображению с неизвестной интенсивностью:

$$\alpha_1 = 1 - \left\{ \exp \left[-\sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(m_y \exp \left(-\frac{1}{2} \right) + m_x (2\sqrt{h} - 1) \exp \left(-\frac{(2\sqrt{h} - 1)^2}{2} \right) \right) \right] + \sqrt{\frac{2}{\pi}} m_y \int_1^{2\sqrt{h}-1} (x^2 - 1) \exp \left\{ -\frac{x^2}{2} - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[m_y x \exp \left(-x^2 / 2 \right) + m_x (2\sqrt{h} - x) \exp \left(-\frac{(2\sqrt{h} - x)^2}{2} \right) \right] \right\} dx \right\}^2 \quad (16)$$

при $h > 1$ и $\alpha_1 = 1$ при $h \leq 1$. Точность формулы (16) растет с увеличением m_x, m_y и h .

Определим теперь вероятность пропуска объекта (10). При $m \gg 1$ приближенное выражение для вероятности пропуска объекта можно записать в виде [8, 9]

$$\beta_1 \approx F_0(h) F_S(h) \approx F_N^2(\sqrt{2h}) F_S(h), \quad (17)$$

где $F_S(h)$ — функция распределения величины абсолютного максимума поля (5) в малой окрестности точки (V_{0x}, V_{0y}) при $\gamma_0 = 1$

Представим (5) в виде суммы сигнальной и шумовой функций [9]:

$$L_m(V_x, V_y) = \hat{S}(V_x, V_{0x}; V_y, V_{0y}) + \hat{N}(V_x, V_y) + 1/2 \quad (18)$$

Здесь

$$\hat{S}(V_x, V_{0x}; V_y, V_{0y}) = \langle L_m(V_x, V_y) \rangle - 1/2 = z^2 S^2(V_x, V_{0x}; V_y, V_{0y}) / 2 \quad (19)$$

— сигнальная функция, функция $S(V_x, V_{0x}; V_y, V_{0y})$ определена в (6), а негауссовская шумовая функция $\hat{N}(V_x, V_y) = L_m(V_x, V_y) - \langle L_m(V_x, V_y) \rangle$ центрирована и обладает корреляционной функцией

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

$$= z^2 S(V_{1x}, V_{2x}; V_{1y}, V_{2y}) S(V_{1x}, V_{0x}; V_{1y}, V_{0y}) S(V_{2x}, V_{0x}; V_{2y}, V_{0y}) + \\ + S^2(V_{1x}, V_{2x}; V_{1y}, V_{2y}) / 2 \quad (20)$$

Отметим, что при $V = V_0$ логарифм ФОП (18) обладает плотностью вероятности $w_0(L) = \exp(-L - z^2/2) \operatorname{ch}(z\sqrt{2L}) / \sqrt{\pi L}$ при $L > 0$, и $w_0(L) = 0$ при $L \leq 0$.

Сигнальная функция (19) достигает максимума при $V = V_0$, следовательно, выходное отношение сигнал/шум (ОСШ) [9] равно

$$\tilde{z}^2 = \hat{S}^2(V_{0x}, V_{0x}; V_{0y}, V_{0y}) / \hat{B}(V_{0x}, V_{0x}; V_{0y}, V_{0y}) = z^4 / 2(1 + 2z^2).$$

Положим, что выходное ОСШ \tilde{z}^2 достаточно велико. Обозначим $\Delta = \max(|V_{1x} - V_{0x}|, |V_{2x} - V_{0x}|, |V_{1y} - V_{0y}|, |V_{2y} - V_{0y}|, |V_{1x} - V_{2x}|, |V_{1y} - V_{2y}|)$. Устремляя $\Delta \rightarrow 0$ и учитывая (8), получаем, что в малой окрестности точки (V_{0x}, V_{0y}) для функций (19), (20) справедливы асимптотические разложения

$$\hat{S}(V_x, V_{0x}; V_y, V_{0y}) = z^2 [B_x(V_x - V_{0x}) + B_y(V_y - V_{0y})] / 4 + o(|V - V_0|),$$

$$\hat{B}(V_{1x}, V_{2x}; V_{1y}, V_{2y}) = \hat{B}_x(V_{1x}, V_{2x}) + \hat{B}_y(V_{1y}, V_{2y}) + o(\Delta),$$

где функции $B_x(\cdot)$ и $B_y(\cdot)$ определены в (14), а

$$\hat{B}_x(V_{1x}, V_{2x}) = (z^2 / 2 + 1/4) \times$$

$$\times \begin{cases} 1 - 4\delta_x |V_{1x} - V_{2x}| - \frac{4z^2\delta_x}{z^2 + 1/2} \min(|V_{1x} - V_{0x}|, |V_{2x} - V_{0x}|), & (V_{1x} - V_{0x})(V_{2x} - V_{0x}) \geq 0, \\ 1 - 4\delta_x |V_{1x} - V_{2x}|, & (V_{1x} - V_{0x})(V_{2x} - V_{0x}) < 0, \end{cases}$$

$$\hat{B}_y(V_{1y}, V_{2y}) = (z^2 / 2 + 1/4) \times$$

$$\times \begin{cases} 1 - 4\delta_y |V_{1y} - V_{2y}| - \frac{4z^2\delta_y}{z^2 + 1/2} \min(|V_{1y} - V_{0y}|, |V_{2y} - V_{0y}|), & (V_{1y} - V_{0y})(V_{2y} - V_{0y}) \geq 0, \\ 1 - 4\delta_y |V_{1y} - V_{2y}|, & (V_{1y} - V_{0y})(V_{2y} - V_{0y}) < 0. \end{cases}$$

Обозначим через $\Lambda_{1x}(V_x)$, $\Lambda_{1y}(V_y)$ статистически независимые случайные процессы со средними значениями $z^2 B_x(V_x - V_{0x}) / 4$, $z^2 B_y(V_y - V_{0y}) / 4$ и корреляционными функциями $\hat{B}_x(V_{1x}, V_{2x})$, $\hat{B}_y(V_{1y}, V_{2y})$ соответственно, имеющие в точках V_{0x} , V_{0y} одномерные плотности вероятности $w_0(\Lambda) = (z^2 / 4\Lambda)^{3/8} \exp(-\Lambda - z^2/4) I_{-3/4}(z\sqrt{\Lambda})$ при $\Lambda > 0$, $w_0(\Lambda) = 0$ при $\Lambda \leq 0$. Здесь $I_\mu(\cdot)$ — функция Бесселя мнимого аргумента порядка μ [11].

Учитывая, что статистические характеристики случайных полей $L_m(V_x, V_y)$ и $\Lambda_{1x}(V_x) + \Lambda_{1y}(V_y)$ асимптотически совпадают в малой окрестности точки (V_{0x}, V_{0y}) , находим [5, 10]:

$$F_S(h) \approx \int_{-\infty}^{\infty} F(h-x)w(x)dx, \quad (21)$$

где $F(x)$ — совпадающие функции распределения абсолютных максимумов случайных процессов $\Lambda_{1x}(V_x)$ и $\Lambda_{1y}(V_y)$, а $w(x) = dF(x)/dx$ — соответствующая плотность вероятности. Используя результаты [8], при больших значениях ОСШ z имеем:

$$F(x) = \left(\frac{z}{2}\right)^{3/4} \exp\left(-\frac{z^2}{4}\right) \int_0^x \left[1 - \exp\left(\frac{z^2(y-x)}{z^2+1}\right)\right]^2 \frac{\exp(-y)}{y^{3/8}} I_{-3/4}(z\sqrt{y}) dy, \quad (22)$$

$$w(x) = \frac{2^{1/4} z^{11/4}}{z^2+1} \exp\left(-\frac{z^2}{4}\right) \times \\ \times \int_0^x \left[1 - \exp\left(\frac{z^2(y-x)}{z^2+1}\right)\right] \exp\left(\frac{z^2(y-x)}{z^2+1}\right) \frac{\exp(-y)}{y^{3/8}} I_{-3/4}(z\sqrt{y}) dy. \quad (23)$$

Подставляя (22), (23) в (21) и используя результат в (17), получим выражение для вероятности пропуска движущегося с неизвестным вектором скорости объекта при неизвестной интенсивности его изображения:

$$\beta_1 = F_N^2(\sqrt{2h}) \frac{z^{7/2}}{2^{1/2}(z^2+1)} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \times \\ \times \int_0^h \int_0^{h-x} \left[1 - \exp\left(\frac{y+x-h}{1+1/z^2}\right)\right]^2 \frac{\exp(-y)}{y^{3/8}} I_{-3/4}(z\sqrt{y}) dy \times \\ \times \int_0^x \left[1 - \exp\left(\frac{\chi-x}{1+1/z^2}\right)\right] \exp\left(\frac{\chi-x}{1+1/z^2}\right) \frac{\exp(-\chi)}{\chi^{3/8}} I_{-3/4}(z\sqrt{\chi}) d\chi dx \quad (24)$$

при $h \geq 1$ и $\beta_1 = 0$ при $h < 1$; функция $F_N(\cdot)$ определена в (15). Точность формулы (24) растет с увеличением ОСШ z , параметров m_x , m_y и порога h .

На рис. 1 показаны зависимости вероятности ложной тревоги α_1 от порога h при априори неизвестных векторе скорости движения объекта и интенсивности его изображения. Кривая 1 соответствует $m_x = m_y = 5$, кривая 2 — $m_x = m_y = 10$, кривая 3 — $m_x = m_y = 20$.

На рис. 2 показаны зависимости от ОСШ z вероятности пропуска β_1 движущегося с неизвестным вектором скорости объекта при неизвестной интенсивности его изображения. Порог выбирался на основании критерия Неймана-Пирсона [7] с использованием формулы (16). Сплошные кривые соответствуют вероятности ложной тревоги $\alpha_1 = 10^{-1}$, штриховые — $\alpha_1 = 10^{-3}$. Кривые 1 соответствуют $m_x = m_y = 5$, кривые 2 — $m_x = m_y = 10$, кривые 3 — $m_x = m_y = 20$.

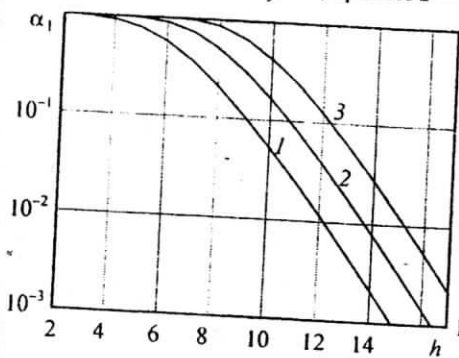


Рис. 1

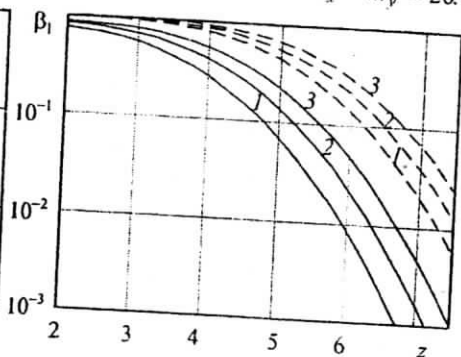


Рис. 2

Сопоставление кривых 1–3 на рис. 1, 2 позволяет сделать вывод о том, что эффективность обнаружения снижается с увеличением числа элементов разрешения в априорной области возможных значений компонент вектора скорости.

Для сравнения приведем характеристики обнаружения при априори известной интенсивности изображения объекта. Вероятности ошибок ложной тревоги α_2 и пропуска β_2 объекта, движущегося с неизвестным вектором скорости, при известной интенсивности его изображения, равны [5]

$$\alpha_2 = 1 - F_N(u), \quad (25)$$

$$\beta_2 \approx F_N(u) \int_{-\infty}^{\infty} F(u\sqrt{2} - x) w(x) dx,$$

где $u = h/z + z/2$ — нормированный порог, функция $F_N(u)$ определена в (15),

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

$$F(x) = \Phi(x - z/\sqrt{2}) -$$

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

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

На рис. 3 показаны зависимости от ОСШ z проигрыша $\chi = \beta_1 / \beta_2$ в величине вероятности пропуска движущегося с неизвестным вектором скорости объекта, обусловленного априорным незнанием интенсивности его изображения. Порог выбирался на основании критерия Неймана-Пирсона [7] с использованием формул (16) и (25). Сплошные кривые соответствуют вероятностям ложной тревоги $\alpha_1 = \alpha_2 = 10^{-1}$, штриховые — $\alpha_1 = \alpha_2 = 10^{-3}$. Кривые 1 соответствуют $m_x = m_y = 5$, кривые 2 — $m_x = m_y = 10$, кривые 3 — $m_x = m_y = 20$.

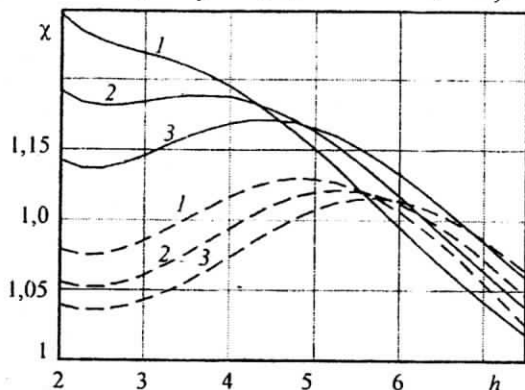


Рис. 3

Из анализа кривых на рис. 3 следует, что при использовании максимально правдоподобного алгоритма обнаружения априорное незнание интенсивности изображения объекта приводит к относительно небольшому проигрышу в эффективности обнаружения объекта.

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 протяженных затеняющих фон объектов // Автометрия. — 1992. — Т. 28. — № 4. — С. 33–40.
3. Ефремов В. В., Ковалева 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.
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. Эффективность обнаружения изображения объекта, движущегося с неизвестным вектором скорости // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. — 2007. — № 11. — С. 3–12.
6. Трифонов А. П., Куцов Р. В. Обнаружение движущегося пространственно протяженного объекта на фоне с неизвестной интенсивностью // Автометрия. — 2005. — Т. 41. — № 1. — С. 3–18.

7. Тихонов Л. И. Статистическая радиотехника. — М.: Сов. радио, 1966. — 680 с.
8. Акимов П. С., Бакут П. Л., Богданович В. А. и др. Теория обнаружения сигналов // Под ред. П. А. Бакута. — М.: Радио и связь, 1984. — 440 с.
9. Трифонов А. П., Шинаков Ю. С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. — М.: Радио и связь, 1986. — 268 с.
10. Трифонов А. П., Захаров А. В. Эффективность обнаружения разрывного случайного радиоимпульса с неизвестными временем прихода и центральной частотой // Радиотехника и электроника. — 2000. — Т. 45. — № 11. — С. 1329–1337.
11. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. — М.: Наука, 1962. — 1108 с.

ВГУ, Воронеж

Поступила в редакцию 21.03.08

УДК 621.372.54

ЛАННЭ А. А., МЕРКУЧЕВА Т. В., СОЛОНИНА А. И.

РАСЧЕТ УЗКОПОЛОСНЫХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ФИЛЬТРОВ С КОНЕЧНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

В данной статье описываются цифровые фильтры, называемые интерполированными фильтрами с конечной импульсной характеристикой (ИКИХ фильтрами), использование которых позволяет создавать узкополосные фильтры низких частот (ФНЧ) с существенно уменьшенной вычислительной нагрузкой, и, соответственно, более простые по сравнению с традиционными фильтрами с конечной импульсной характеристикой (КИХ фильтрами).

Фильтры с конечной импульсной характеристикой являются важным классом цифровых фильтров. Традиционные КИХ фильтры порядка N появились в цифровой обработке сигналов (ЦОС) в начале 1970-ых и с тех пор применяются во многих приложениях [1]. Способность КИХ фильтров предоставлять гарантированную устойчивость и строго линейную фазо-частотную характеристику (ФЧХ), наряду с доступным аппаратным обеспечением, сделали данный тип фильтров темой большего количества статей.

В данной статье рассмотрены ИКИХ фильтры; показано, как может быть уменьшена вычислительная нагрузка узкополосного фильтра с линейной ФЧХ, приведен пример расчета ИКИХ фильтра, выбор параметров.

В основу метода положена статья [2] и позже опубликованные материалы из книги [1], в которых использовано преобразование требуемого узкополосного ФНЧ к фильтру-прототипу с последующей заменой каждого элемента задержки (обозначение « Z^{-1} ») на M элементов задержки (обозначение « Z^{-M} »). В результате, был получен многополосный фильтр, называемый здесь также формирующим фильтром, в котором нижняя полоса пропускания (ПП) соответствовала требуемой полосе пропускания узкополосного ФНЧ фильтра,