

Р9866

Г. 53, № 2,

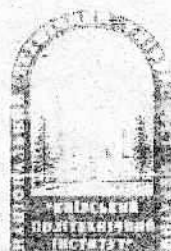
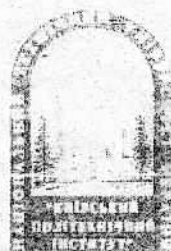
2010

Том 53, № 2
февраль 2010

ISSN 0021-3470

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ
ЗАВЕДЕНИЙ



УДК 621.391

ТРИФОНОВ А.П., КУЦОВ Р.В.

**ОЦЕНКА НАПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА
ПРИ НАЛИЧИИ ФОНА***

*Воронежский государственный университет,
Россия, Воронеж, 394006, Университетская пл., 1*

Аннотация. Выполнены синтез и анализ максимально правдоподобного алгоритма оценки направления движения неоднородного изображения пространственно протяженного объекта для аппликативной модели взаимодействия полезного изображения и фона.

Abstract. The maximum likelihood algorithm for estimating the motion direction of nonuniform image of space-extended object for the applicative model of interaction between the useful image and background has been synthesized and analyzed.

Ключевые слова: объект, направление движения, изображение, фон, алгоритм максимального правдоподобия, оценка, точность, object, movement direction, image, background, maximum likelihood algorithm, estimation, accuracy

В процессе обработки результатов дистанционного наблюдения часто возникает необходимость в оценке направления движения объекта по его изображению. Обычно объекты наблюдаются на некоторой подстилающей поверхности, и сигнал, рассеянный этой поверхностью, представляет собой фоновое излучение (фон). Функционирование измерительных систем в реальных условиях сопровождается шумами, имеющими различную физическую природу, поэтому в задачи системы наблюдения входит одновременно как компенсация пространственно-временного шума, так и выделение изображения пространственно протяженного объекта (ППО) на аппликативном фоне [1–6]. Высокая разрешающая способность современных систем дистанционного наблюдения позволяет не только выделить объект по перепаду интенсивности на границе

объект-фон, но и различать неоднородности распределения интенсивности изображения объекта.

В [5, 6] рассмотрен максимально правдоподобный алгоритм оценки вектора скорости движения изображения ППО. Однако найти характеристики оценки направления движения при известной величине скорости на основе результатов [5, 6] не представляется возможным.

Целью работы являются синтез и анализ максимально правдоподобного алгоритма оценки направления движения изображения ППО при наличии фона.

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 прямо-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 07-01-00042).

угольной системе координат XU . Положим, что поле $\Xi(x, y, t)$ содержит изображение $s(x - V_0 t \cos \varphi_0, y - V_0 t \sin \varphi_0)$ объекта, движущегося с известной скоростью V_0 из заданного положения в априори неизвестном направлении, составляющем угол φ_0 с осью X , неподвижный фон $\chi(x, y)$ и аддитивный гауссовский пространственно-временной белый шум $n(x, y, t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0 .

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

$$\begin{aligned} \Xi(x, y, t) = & s(x - V_0 t \cos \varphi_0, y - V_0 t \sin \varphi_0) \times \\ & \times I_s(x - V_0 t \cos \varphi_0, y - V_0 t \sin \varphi_0) + \chi(x, y) \times \\ & \times [1 - I_s(x - V_0 t \cos \varphi_0, y - V_0 t \sin \varphi_0)] + \\ & + n(x, y, t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $I_s(x, y) = 1$ при $(x, y) \in \Omega_s$ и $I_s(x, y) = 0$ при $(x, y) \notin \Omega_s$ — индикатор, описывающий форму изображения объекта. Полагаем, что угол φ_0 принимает значения из априорного интервала $U = [\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$ причем $0 \leq \varphi_{\min} < \varphi_{\max} < 2\pi$.

Оценка максимального правдоподобия (ОМП) направления движения изображения объекта определяется как положение абсолютного (наибольшего) максимума логарифма функционала отношения правдоподобия (ФОР) [7–9]:

$$\hat{\varphi} = \operatorname{argsup}_{\varphi \in U} L(\varphi), \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} L(\varphi) = & \frac{2}{N_0} \int_0^T \iint_{\Omega} \{ \Xi(x, y, t) \times \\ & \times [s(x - V_0 t \cos \varphi, y - V_0 t \sin \varphi) - \chi(x, y)] - \\ & - [s^2(x - V_0 t \cos \varphi, y - V_0 t \sin \varphi) - v^2(x, y)] / 2 \} \times \\ & \times I_s(x - V_0 t \cos \varphi, y - V_0 t \sin \varphi) dx dy dt \end{aligned} \quad (3)$$

— логарифм ФОР [3].

Подставляя в (3) реализацию наблюдаемых данных (1), представим логарифм ФОР в виде суммы сигнальной и шумовой функций [8, 9]:

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

где

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

— сигнальная функция, а $\hat{N}(\varphi)$ — шумовая функция, представляющая собой реализацию гауссовского случайного процесса с нулевым средним значением 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 максимального правдоподобия [8, 9]. В общем случае $\hat{S}(\varphi_0, \varphi_0)$ зависит от направления движения. Далее будем считать, что фон является однородным с интенсивностью $\chi(x, y) = v_0$. 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 $L(\varphi)$ (3) введем нормированный член логарифма ФОП, зависящий от направления движения:

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

где

$$S(\varphi, \varphi_0) = \hat{S}(\varphi, \varphi_0) / z_H^2 \quad (9)$$

и

$$N(\varphi) = \hat{N}(\varphi) / z_H$$

— нормированные сигнальная и шумовая функции. При этом алгоритм оценки направления движения изображения объекта (2) можно переписать в виде $\hat{\varphi} = \operatorname{argsup} L_z(\varphi)$, $\varphi \in U$.

Пусть Δ_s — протяженность сигнальной функции, так что $S(\varphi_0 \pm \Delta_s, \varphi_0) \approx 0$. Разобьем априорную область U возможных значений угла φ на сигнальную U_S и шумовую U_N подобласти. К первой отнесем те значения φ , для которых сигнальная функция существенно отлична от нуля, т.е. $|\varphi - \varphi_0| < \Delta_s$. Все остальные значения φ отнесем к шумовой подобласти. В сигнальной подобласти оценка является надежной, а в шумовой подобласти имеют место аномальные ошибки [8, 9], которые возможны при $\varphi_{\max} - \varphi_{\min} \gg \Delta_s$ и конечных значениях ОСШ z_H .

Точность оценки направления движения будем характеризовать ее рассеянием (средним квадратом ошибки) [8]. Согласно [8, 9], выражения для условных смещения и рассеяния ОМП направления движения с учетом аномальных ошибок можно записать в виде

$$b_H(\hat{\varphi}|\varphi_0) = \langle \hat{\varphi} - \varphi_0 \rangle = P_{0H} b_{0H}(\hat{\varphi}|\varphi_0) + (1 - P_{0H}) b_a(\hat{\varphi}|\varphi_0), \quad (10)$$

$$B_H(\hat{\varphi}|\varphi_0) = \langle (\hat{\varphi} - \varphi_0)^2 \rangle =$$

$$= P_{0H} B_{0H}(\hat{\varphi}|\varphi_0) + (1 - P_{0H}) B_a(\hat{\varphi}|\varphi_0). \quad (11)$$

Здесь $b_{0H}(\hat{\varphi}|\varphi_0)$ и $B_{0H}(\hat{\varphi}|\varphi_0)$ — условные смещение и рассеяние оценки при наличии только нормальных ошибок (когда $\hat{\varphi} \in U_S$), $b_a(\hat{\varphi}|\varphi_0)$ и $B_a(\hat{\varphi}|\varphi_0)$ — те же характеристики при наличии только аномальных ошибок (когда $\hat{\varphi} \in U_N$), а $P_{0H} = P[\hat{\varphi} \in U_S]$ — вероятность надежной оценки.

Логарифм ФОП является гауссовским случайным процессом, поэтому его свойства полностью определяются математическим ожиданием и корреляционной функцией. Согласно (4), (6), сигнальная функция (5) определяет математическое ожидание и корреляционную функцию логарифма ФОП, а значит все его свойства. Поскольку при $z_H \rightarrow \infty$ ОМП $\hat{\varphi} \rightarrow \varphi_0$ в среднеквадратическом [8], для определения характеристик надежной оценки при больших ОСШ достаточно исследовать поведение нормированной сигнальной функции (9) в малой окрестности точки φ_0 .

Положим, что контур изображения объекта является выпуклым. Проведем касательные к границе изображения объекта, перпендикулярные направлению его движения, и обозначим через $\Gamma_-(\varphi_0)$ и $\Gamma_+(\varphi_0)$ части границы Γ , на которые она разделяется точками касания A и B (рис. 1). Введем прямоугольную систему координат $X'Y'$, направив ось Y' в направлении движения. Согласно [4], при $|\varphi - \varphi_0| \rightarrow 0$ сигнальная функция (9) допускает асимптотическое представление

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

где

$$\delta_H(\varphi) = \quad (13)$$

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

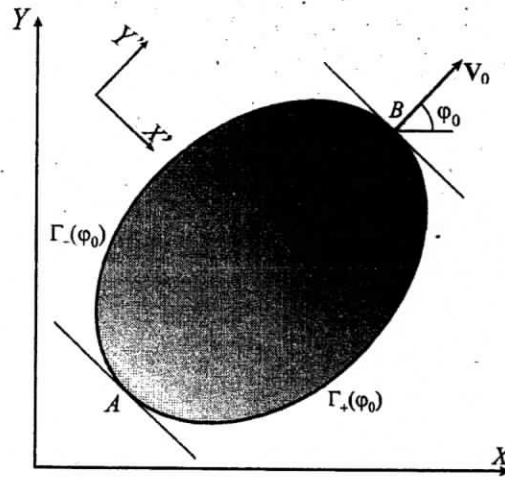


Рис. 1

Учитывая установленные свойства сигнальной функции и используя результаты [8], находим, что надежная оценка направления движения объекта является несмещенной, т. е.

$$b_{0H}(\hat{\phi}|\phi_0) = \langle \hat{\phi} - \phi_0 \rangle = 0, \quad (14)$$

а ее рассеяние $B_{0H}(\hat{\phi}|\phi_0)$ совпадает с дисперсией и определяется выражением [8]:

$$B_{0H}(\hat{\phi}|\phi_0) = \langle (\hat{\phi} - \phi_0)^2 \rangle = 13/2 z_H^4 \delta_H^2(\phi_0) =$$

$$= \frac{26N_0^2}{T^4 V_0^2} \left[\int_{\Gamma_-(\phi_0)} [s(x, y) - v_0]^2 dy + \right.$$

$$\left. + \int_{\Gamma_+(\phi_0)} [s(x, y) - v_0]^2 dy \right]^{-2}. \quad (15)$$

Как следует из (15), точность надежной оценки направления движения объекта в общем случае зависит от истинного направления движения, повышается с ростом скорости движения объекта и с увеличением времени наблюдения T . Согласно (15), предельная (при неограниченном увеличении ОСШ) точность ОМП направления движения определяется суммой криволинейных интегралов второго рода (интегралов по проекциям) от величин квадрата скачка интенсивности $s(x, y) - v_0$ на

границах изображения объекта, разделяемых точками A и B (рис. 1) и не зависит от значений интенсивности во внутренних точках изображения объекта.

Конкретизируем полученное выражение для случая оценки направления движения изображения однородного объекта, имеющего постоянную интенсивность s_0 . Полагая в (7) $s(x, y) = s_0$, получим, что ОСШ для однородного объекта определяется выражением

$$z^2 = 2TG_s(s_0 - v_0)^2 / N_0, \quad (16)$$

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

$$\delta(\phi) = TV_0 l(\phi) / 2G_s.$$

Здесь $l(\phi)$ — максимальный размер изображения объекта в направлении, составляющем угол ϕ с осью X , а G_s — площадь изображения объекта. При этом из (15) получаем выражение для рассеяния надежной оценки направления движения однородного изображения:

$$B_0(\hat{\phi}|\phi_0) = 13/2 z^4 \delta^2(\phi_0) =$$

$$= 13N_0^2 / 2V_0^2 T^4 l^2(\phi_0) (s_0 - v_0)^4, \quad (17)$$

где $l(\phi_0)$ — максимальный размер объекта в направлении движения.

Найдем теперь характеристики оценки направления движения изображения объекта с учетом аномальных ошибок. В соответствии с определением [8, 9], при $\varphi_{\max} - \varphi_{\min} \gg \Delta_s$ вероятность надежной ОМП направления движения может быть записана в виде

$$P_{0H} = \int F_N(x) dF_S(x), \quad (18)$$

где $F_S(x)$ и $F_N(x)$ — функции распределения величин абсолютных максимумов случайного процесса (8) в подобластях U_S и U_N соответственно. Приближенные выражения для этих функций получены в [4]:

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

$$F_N(x) \approx \begin{cases} \exp[-m_H x \exp(-x^2/2)/\sqrt{2\pi}], & x \geq 1, \\ 0, & x < 1. \end{cases} \quad (20)$$

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

$$m_H = \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} \delta_H(\varphi) d\varphi \quad (21)$$

— приведенная длина априорного интервала возможных значений угла φ . Подставляя (19), (20) в (18), получаем вероятность надежной оценки направления движения:

$$P_{0H} = 2z_H \exp(3z_H^2/2) \times \int_1^{\infty} \exp[-m_H x \exp(-x^2/2)/\sqrt{2\pi}] \times \times [\exp(-z_H x) \Phi(x - 2z_H) - \exp(5z_H^2/2 - 2z_H x) \Phi(x - 3z_H)] dx. \quad (22)$$

Найдем далее условные смещение и рассеяние оценки направления движения объекта

при наличии только аномальных ошибок. Аналогично тому, как это сделано в [4, 10], разобьем априорную область U возможных значений угла φ на I отрезков $U_i = [\varphi_i, \varphi_i + \Delta\varphi_i]$ длиной $\Delta\varphi_i$, $i = \overline{1, I}$, так, что

$$d = \max_i \Delta\varphi_i \ll 1. \quad (23)$$

Потребуем кроме того, чтобы значения процесса $N(\varphi)$ на различных интервалах U_i были приближенно статистически независимы. Для этого достаточно, чтобы длина каждого отрезка U_i была значительно больше протяженности сигнальной функции Δ_s . Определив протяженность сигнальной функции как ширину ее треугольной аппроксимации (12) на половинном уровне, получим: $\Delta_s = 1/\delta_H(\varphi_0)$. Тогда значения процесса $N(\varphi)$ на различных интервалах U_i можно считать статистически независимыми, если $\delta_H(\varphi_i) \Delta\varphi_i \gg 1$.

При $d \rightarrow 0$ в пределах каждого из отрезков U_i логарифм ФОП является однородным случайным процессом. Следовательно, положение абсолютного максимума логарифма ФОП на каждом отрезке U_i распределено равномерно, т.е. описывается плотностью вероятности

$$w_{ai}(\hat{\varphi}) = \begin{cases} 1/\Delta\varphi_i, & \hat{\varphi} \in U_i, \\ 0, & \hat{\varphi} \notin U_i. \end{cases} \quad (24)$$

Учитывая независимость значений логарифма ФОП на различных отрезках U_i , распределение оценки в области аномальных ошибок можно записать в виде

$$w_a(\hat{\varphi}) = \sum_{i=1}^I p_i w_{ai}(\hat{\varphi}), \quad (25)$$

где

$$p_i = P[\hat{\varphi} \in U_i] = P[M_i > M_k, k = \overline{1, I}, k \neq i]$$

— вероятность попадания ОМП $\hat{\varphi}$ в отрезок U_i , а M_i и M_k — величины абсолютного максимума нормированного логарифма ФОП на отрезках U_i и U_k соответственно. Очевидно,

$$p_i = \int \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^I F_{N_k}(x) dF_{N_i}(x), \quad (26)$$

где $F_{N_i}(x) = P[\sup N(\varphi) < x, \varphi \in U_i]$ — функция распределения величины абсолютного максимума случайного процесса $N(\varphi)$ в подобласти $U_i, i = \overline{1, I}$. Согласно [4],

$$F_{N_i}(x) \approx \exp[-\Delta\varphi_i \delta_H(\varphi_i) x \exp(-x^2/2) / \sqrt{2\pi}] \quad (27)$$

при $x \geq 1$ и $F_{N_i}(x) \approx 0$ при $x < 1$. Подставляя (27) в (26) и выполняя интегрирование, получим:

$$p_i = \frac{\delta_H(\varphi_i) \Delta\varphi_i}{\sum_{k=1}^I \delta_H(\varphi_k) \Delta\varphi_k}. \quad (28)$$

Используя (24), (28) в (25), при выполнении условия (23) получаем распределение оценки направления движения объекта при наличии только аномальных ошибок:

$$w_a(\hat{\varphi}) = \delta_H(\hat{\varphi}) / m_H. \quad (29)$$

С помощью (29) нетрудно получить смещение и рассеяние оценки в области аномалий:

$$\begin{aligned} b_a(\hat{\varphi}|\varphi_0) &= \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} (\hat{\varphi} - \varphi_0) w_a(\hat{\varphi}) d\hat{\varphi} = \\ &= \frac{1}{m_H} \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} \hat{\varphi} \delta_H(\hat{\varphi}) d\hat{\varphi} - \varphi_0, \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} B_a(\hat{\varphi}|\varphi_0) &= \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} (\hat{\varphi} - \varphi_0)^2 w_a(\hat{\varphi}) d\hat{\varphi} = \\ &= \frac{1}{m_H} \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} (\hat{\varphi} - \varphi_0)^2 \delta_H(\hat{\varphi}) d\hat{\varphi}. \end{aligned} \quad (31)$$

Подставляя (30), (31), а так же (14), (15) и (22) в (10), (11), находим характеристики оценки направления движения объекта с учетом аномальных ошибок. Из (15), (22) следует, что характеристики оценки направления движения

зависят от априори известной скорости движения объекта V_0 .

Рассеяние $B(\hat{\varphi}|\varphi_0)$ оценки направления движения однородного изображения объекта с интенсивностью s_0 определяется при замене z_H на ОСИ для однородного объекта z (16), а m_H — на $m = TV_0 \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} I(\varphi) d\varphi / 2G_s$.

Рассмотрим влияние неоднородности изображения объекта на характеристики оценки направления его движения с учетом аномальных ошибок. В качестве примера рассмотрим изображение неоднородного круглого объекта радиуса R , интенсивность изображения которого линейно возрастает в направлении оси X . Таким образом полагаем, что интенсивность изображения объекта описывается функцией

$$\begin{aligned} s(x, y) &= s_{\text{кр}}(x, y) = \\ &= 2s_0 \frac{(q-1)x/R + q + 1}{\sqrt{5q^2 + 6q + 5}}, \end{aligned} \quad (32)$$

где наклон $q = s_{\max} / s_{\min}$ — отношение максимального значения интенсивности изображения объекта $s_{\max} = \max_{(x, y) \in \Omega_s} s(x, y)$ к мини-

мальному значению $s_{\min} = \min_{(x, y) \in \Omega_s} s(x, y)$, s_0

характеризует амплитуду интенсивности, а множитель $1/\sqrt{5q^2 + 6q + 5}$ обеспечивает неизменность энергии изображения объекта при различных значениях q . При этом предполагается, что начало системы координат расположено в центре изображения объекта при $t=0$. Нетрудно убедиться, что распределение интенсивности (32) удовлетворяет условию

$$\iint_{\Omega_s} s^2(x, y) dx dy = s_0^2 G_s.$$

Заметим, что для однородного объекта $q=1$, так что $s_{\text{кр}}(x, y)|_{q=1} = s_0$, то есть s_0 — интенсивность изображения однородного объекта с теми же площадью и энергией, что у неоднородного объекта.

Подставляя (32) в (7), находим выражение для ОСШ на выходе приемника максимально правдоподобия при наличии в реализации наблюдаемых данных изображения неоднородного круглого объекта (32), однородного фона и гауссовского белого шума

$$z_{\text{Нкр}}^2 = \frac{z_{\text{скр}}^2}{z_F^2} \left[z_F^2 + 1 - \frac{4z_F(q+1)}{\sqrt{5q^2 + 6q + 5}} \right],$$

где $z_{\text{скр}}^2 = 2\pi R^2 T s_0^2 / N_0$ — ОСШ для однородного изображения круглого объекта при отсутствии фона и наличии только гауссовского белого шума [3, 4], $z_F^2 = s_0^2 / v_0^2$ — отношение сигнал/фон (ОСФ).

Согласно (22), (29), для расчета характеристик оценки направления движения необходимо найти значения параметров δ_H (13) и m_H (21). Подставляя (32) в (13), получим выражение для параметра δ_H в случае неоднородного круглого объекта, интенсивность изображения которого описывается функцией (32):

$$\delta_{\text{Нкр}}(\varphi) = \delta_{\text{кр}} \left[1 + \frac{z_F^2(q-1)^2}{5q^2 + 6q + 5} \times \frac{\left(1 + \frac{2\cos 2\varphi}{3}\right)}{\left(z_F^2 - \frac{4z_F(1+q)}{\sqrt{5q^2 + 6q + 5}} + 1\right)} \right], \quad (33)$$

где $\delta_{\text{кр}} = TV_0 / \pi R$ — значение параметра (33) для однородного изображения круглого объекта (при $q=1$). При этом приведенная длина априорного интервала возможных значений угла φ для однородного круглого объекта $m_{\text{кр}} = \delta_{\text{кр}}(\varphi_{\text{max}} - \varphi_{\text{min}})$, а для неоднородного

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

На рис. 2 показаны зависимости отношения рассеяний оценок направления движения неоднородного и однородного круглых объектов $\chi = B_H(\hat{\varphi}|\varphi_0) / B(\hat{\varphi}|\varphi_0)$ от величины наклона q . Расчет производился с использованием формулы (11) при $\varphi_{\text{min}} = 0$, $\varphi_{\text{max}} = 2\pi$, $\delta_{\text{кр}} = 5$, ОСФ $z_F = 2$ и $\varphi_0 = \pi$. Кривая 1 соответствует ОСШ в отсутствии фона $z_{\text{скр}} = 5$, кривая 2 — $z_{\text{скр}} = 7$, кривая 3 — $z_{\text{скр}} = 10$. Кривой 4 показана зависимость отношения рассеяний надежных оценок направления движения неоднородного и однородного объектов при тех же параметрах. Как следует из сравнения кривых на рис. 2, точность оценки направления движения неоднородного объекта при не слишком малых значениях ОСШ оказывается выше, чем точность оценки направления движения однородного объекта. Это объясняется тем, что при одинаковых энергиях изображений однородного и неоднородного объектов, неоднородный объект в большей степени отличается по текстуре от однородного фона. При этом повышение точности оценки направления движения, обусловленное неоднородностью изображения объекта, оказывается более значительным по мере увеличения ОСШ.

Часто не только направление, но и величина скорости движения изображения объекта априори неизвестны [6]. Исследуем влияние априорного незнания величины скорости на характеристики оценки направления движения изображения объекта. Рассмотрим случай оценки направления движения однородного

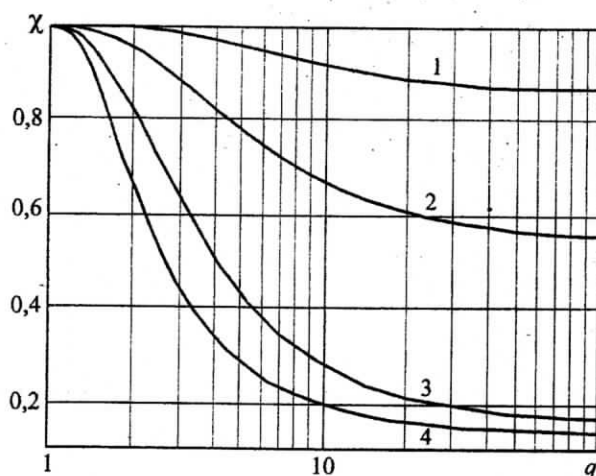


Рис. 2

изображения прямоугольного объекта размером $l_x \times l_y$ с интенсивностью s_0 . Будем считать, что направление движения объекта задается углом φ , принимающим значения из априорного интервала максимально возможной длины 2π . В этом случае параметр

$$m = m_{\text{пр}} = 2TV_0(l_x + l_y) / l_x l_y,$$

а ОСШ

$$z^2 = z_{\text{пр}}^2 = 2l_x l_y T(s_0 - v_0)^2 / N_0.$$

В работе [6] найдены характеристики оценки вектора скорости однородного изображения объекта прямоугольной формы со сторонами со сторонами l_x и l_y 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

$$W_y = [-V_{y \max} / 2, V_{y \max} / 2].$$

Совместная плотность вероятности ОМП компонент вектора скорости с учетом аномальных ошибок может быть записана в виде [8]

$$w(\hat{V}_x, \hat{V}_y) = \tilde{P}_0 w_0(\hat{V}_x, \hat{V}_y) + (1 - \tilde{P}_0) w_a(\hat{V}_x, \hat{V}_y),$$

где $\tilde{P}_0$ — вероятность надежной оценки вектора скорости, $w_0(\hat{V}_x, \hat{V}_y)$ — совместная плотность вероятности надежных оценок компонент вектора скорости (при наличии только нормальных ошибок), а $w_a(\hat{V}_x, \hat{V}_y)$ — совместная плотность вероятности оценок компонент вектора скорости при наличии аномальных ошибок.

Положим, что возможные значения проекций вектора скорости V_x и V_y распределены равномерно в априорных интервалах W_x и W_y соответственно. В этом случае оценки проекций вектора скорости $\hat{V}_x$ и $\hat{V}_y$ являются статистически независимыми случайными величинами [6], для которых [8]

$$w_0(\hat{V}_x, \hat{V}_y) = \left\{ 3 \exp(2|\mu_x|) \left[1 - \Phi(3\sqrt{|\mu_x|/2}) \right] + \Phi(\sqrt{|\mu_x|/2}) - 1 \right\} \left\{ 3 \exp(2|\mu_y|) \times \right. \\ \left. \times \left[1 - \Phi(3\sqrt{|\mu_y|/2}) \right] + \Phi(\sqrt{|\mu_y|/2}) - 1 \right\}$$

где

$$\mu_x = z_{\text{пр}}^2 T(\hat{V}_x - V_{0x}) / 2l_x,$$

$$\mu_y = z_{\text{пр}}^2 T(\hat{V}_y - V_{0y}) / 2l_y,$$

а также

$$w_a(\hat{V}_x, \hat{V}_y) = \begin{cases} (V_{x \max} V_{y \max})^{-1}, & \text{при } |\hat{V}_x| \leq \frac{V_{x \max}}{2}, \\ & |\hat{V}_y| \leq \frac{V_{y \max}}{2}, \\ 0, & \text{при остальных значениях } \hat{V}_x, \hat{V}_y. \end{cases}$$

Согласно [6], вероятность надежной оценки вектора скорости определяется выражением

$$\tilde{P}_0 = \sqrt{2} \int_{\sqrt{2}}^{\infty} F_0(u) \int_{-\infty}^{\infty} w(u\sqrt{2} - x) w(x) dx du,$$

где

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

и

$$F_0(u) = \exp \left[-\sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(m_y \exp \left(-\frac{1}{2} \right) + m_x(u\sqrt{2} - 1) \exp \left(-\left(u - \frac{1}{\sqrt{2}} \right)^2 \right) \right) \right] + \\ + \sqrt{2/\pi} m_y \int_1^{u\sqrt{2}-1} (x^2 - 1) \times \\ \times \exp \left[-x^2/2 - \sqrt{2/\pi} (m_y x \exp(-x^2/2) + m_x(u\sqrt{2} - x) \exp(-(u - x/\sqrt{2})^2)) \right] dx,$$

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

Учитывая, что оценка направления движения $\hat{\varphi} = \arctg(\hat{V}_y/\hat{V}_x)$, с использованием метода функционального преобразования плотностей вероятностей найдем плотность вероятности ОМП направления движения изображения объекта при априори неизвестной величине скорости:

$$w(\hat{\varphi}) = \frac{\tilde{P}_0}{2} \int_{-V_{x \max}/2}^{V_{x \max}/2} w_0(\hat{V}_x, \hat{V}_x \tg \hat{\varphi}) \frac{|V_x|}{\cos^2 \hat{\varphi}} d\hat{V}_x + \\ + \frac{1 - \tilde{P}_0}{8} \min \left(\frac{1}{\lambda \cos^2 \hat{\varphi}}, \frac{\lambda}{\sin^2 \hat{\varphi}} \right), \quad (34)$$

где $\lambda = V_{y \max}/V_{x \max}$. Используя (34), находим рассеяние оценки направления движения при неизвестной величине скорости:

$$\tilde{B}(\hat{\varphi}) = \int_0^{2\pi} (\hat{\varphi} - \varphi_0)^2 w(\hat{\varphi}) d\hat{\varphi} = \\ = \tilde{P}_0 \tilde{B}_0(\hat{\varphi}) + (1 - \tilde{P}_0) \tilde{B}_a(\hat{\varphi}),$$

где

$$\tilde{B}_0(\hat{\varphi}) = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} (\hat{\varphi} - \varphi_0)^2 \times \\ \times \int_{-V_{x \max}/2}^{V_{x \max}/2} w_0(\hat{V}_x, \hat{V}_x \tg \hat{\varphi}) \frac{|V_x|}{\cos^2 \hat{\varphi}} d\hat{V}_x d\hat{\varphi}, \quad (35)$$

$$\tilde{B}_a(\hat{\varphi}) = \\ = \frac{1}{8} \int_0^{2\pi} (\hat{\varphi} - \varphi_0)^2 \min \left(\frac{1}{\lambda \cos^2 \hat{\varphi}}, \frac{\lambda}{\sin^2 \hat{\varphi}} \right) d\hat{\varphi}.$$

Вычисление интеграла в (35) затруднительно, однако при больших значениях ОСШ (7) рассеяние надежной оценки направления движения прямоугольного объекта при неизвестной величине скорости его перемещения определяется приближенной формулой, полученной в [5]:

$$\tilde{B}_0(\hat{\varphi}) = 26(l_x^2 \sin^2 \varphi_0 + l_y^2 \cos^2 \varphi_0) / z_{\text{пр}}^4 T^2 V_0^2.$$

Рассмотрим далее случай, когда объект имеет форму квадрата со стороной l , а $V_{x \max} = V_{y \max}$. Положим, что истинное значение скорости движения изображения объекта равно $V_0 = V_{x \max}/2$. Тогда $m_x = m_y = TV_{x \max}/2l$, $m = m_{\text{кв}} = 4m_x$, а $z^2 = z_{\text{кв}}^2 = 2l^2 T(s_0 - v_0)^2 / N_0$. На рис. 3 показаны зависимости рассеяний оценок направления движения от ОСШ z при

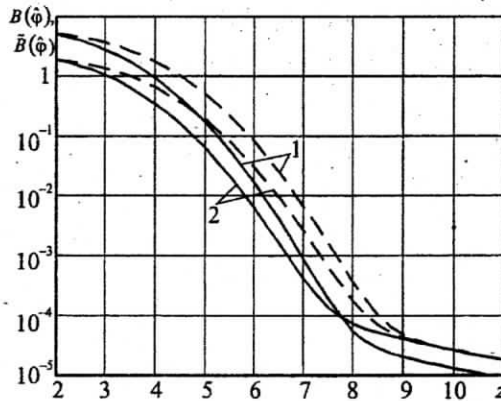


Рис. 3

$m_x = m_y = 10$ и $V_{x \max} = V_{y \max}$. Сплошные кривые соответствуют случаю, когда величина скорости априори известна, штриховые — случаю априори неизвестной скорости. Кривые 1 соответствуют $\varphi_0 = \pi/4$, кривые 2 — $\varphi_0 = \pi$.

Из сравнения сплошных и штриховых кривых на рис. 3 следует, что априорное незнание величины скорости движения изображения объекта может привести к проигрышу в точности оценки направления движения, который наиболее значителен при умеренных значениях ОСШ, когда начинают проявляться аномальные ошибки. Сопоставление сплошных кривых 1 и 2 на рис. 3 показывает, что истинное значение направления движения изображения объекта может оказывать влияние на точность его оценки. При больших значениях ОСШ рассеяние оценки направления движения минимально, если объект перемещается вдоль одной из диагоналей, а при умеренных значениях ОСШ — если объект перемещается вдоль одной из сторон.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бычков А. А. Обнаружение изображений пространственно-протяженных затеняющих фон объектов / А. А. Бычков, В. А. Понькин // *Автометрия*. — 1992. — Т. 28, № 4. — С. 33–40.
2. Ковалев Г. С. Потенциальные возможности обнаружения и маскирования движущихся объектов на неравномерных фонах / Г. С. Ковалев, В. А. Понькин, И. В. Лаптев, В. В. Ефремов // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. — 2003. — № 4. — С. 24–29.
3. Трифонов А. П. Обнаружение движущегося пространственно-протяженного объекта на фоне с неизвестной интенсивностью / А. П. Трифонов, Р. В. Куцов // *Автометрия*. — 2005. — Т. 41, № 1. — С. 3–18.
4. Трифонов А. П. Эффективность обнаружения изображения объекта, движущегося в неизвестном направлении / А. П. Трифонов, Р. В. Куцов // *Радиоэлектроника*. — 2008. — Т. 51, № 9. — С. 70–80. — (Известия вузов).
5. Трифонов А. П. Характеристики оценки вектора скорости движения пространственно протяженного объекта на неравномерном фоне / А. П. Трифонов, Р. В. Куцов // *Радиотехника*. — 2008. — № 5. — С. 111–115.
6. Куцов Р. В. Обнаружение и оценка вектора скорости движения неоднородного пространственно протяженного объекта по изображению. II / Р. В. Куцов, А. П. Трифонов // *Автоматика и телемеханика*. — 2009. — № 8. — С. 96–109.
7. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника / В. И. Тихонов. — М.: Сов. радио, 1966. — 680 с.
8. Трифонов А. П. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех / А. П. Трифонов, Ю. С. Шинаков. — М.: Радио и связь, 1986. — 268 с.
9. Куликов Е. И. Оценка параметров сигналов на фоне помех / Е. И. Куликов, А. П. Трифонов. — М.: Сов. радио, 1978. — 296 с.
10. Трифонов А. П. Оценка местоположения точечной цели в зоне Френеля приемной антенны / А. П. Трифонов, С. И. Шарипов // *Радиотехника и электроника*. — 1984. — Т. 29, № 2. — С. 242–249.

Поступила в редакцию 17.07.2009