

2

258

ISSN 0033-8486

РАДИОТЕХНИКА

XXI век

5 2007

www.radiotec.ru

В НОМЕРЕ:

Журнал в журнале

РАДИОСИСТЕМЫ

Выпуск 109 Информационный конфликт
в спектре электромагнитных волн, №18

Выпуск 110 Обработка сигналов и полей, №10



Тел./факс: (495) 625-9241
E-mail: info@radiotec.ru
[Http://www.radiotec.ru](http://www.radiotec.ru)

ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС 70775 В КАТАЛОГЕ АГЕНТСТВА "РОСПЕЧАТЬ": ГАЗЕТЫ И ЖУРНАЛЫ

75069 ж

Характеристики оценки скорости движения пространственно протяженного объекта на неравномерном фоне

А.П. Трифонов, Р.В. Куцов

Выполнены синтез и анализ максимально правдоподобного алгоритма оценки скорости движения пространственно протяженного объекта по изображению при наличии неравномерного фона.

Synthesis and analysis of maximum likelihood algorithm for estimation of the spatially extensive object velocity by the image against a heterogeneous background have been carried out.

В процессе обработки результатов дистанционного наблюдения возникает необходимость в измерении скорости движения объектов по их изображениям. В свою очередь, высокая разрешающая способность современных систем дистанционного наблюдения приводит при оценке скорости к необходимости учета эффекта затенения пространственно протяженным объектом (ППО) части подстилающей поверхности [1 – 4].

В [5] рассмотрен эвристический метод измерения координат и скорости движения объекта по изменениям положения и размеров его оптического изображения. Предложенные в [6] алгоритмы оценки скорости движения объектов по их изображениям работоспособны лишь при слабых случайных искажениях. Для алгоритмов, предложенных в [5, 6], остается открытым вопрос об их оптимальности и не удастся выполнить теоретический анализ эффективности их функционирования. В связи с этим необходимо найти структуру и характеристики оптимального алгоритма оценки скорости движения ППО при наличии неравномерного фона и шумовых помех. Наиболее распространенной моделью шумовой помехи является аддитивный гауссовский белый шум.

Цель работы – синтез и анализ максимально правдоподобного алгоритма измерения скорости движения ППО по его изображению при наличии неравномерного фона.

Пусть в двумерной области Ω в течение интервала времени $[0, T]$ доступна наблюдению реализация гауссовского случайного поля $x(r, t)$, где $r = (x, y)$ – радиус-вектор точки на плоскости, принадлежащей Ω , а t – время. Положим [2], что поле $x(r, t)$ содержит изображение движущегося из заданного положения в заданном направлении со скоростью V_0 объекта $s(r - V_0 t)$, неподвижный фон $v(r)$ и аддитивный гауссовский пространственно-временной белый шум $n(r, t)$ с нулевым математическим ожиданием и корреляционной функцией $\langle n(r_1, t_1) n(r_2, t_2) \rangle = N_0 \delta(r_1 - r_2) \delta(t_1 - t_2) / 2$, где N_0 – односторонняя спектральная плотность белого шума. Направим ось X прямоугольной системы координат вдоль вектора скорости V_0 ; при этом $V_0 = V_0 i_x$, где i_x – орт оси X . Будем считать, что скорость движения объекта V_0 принимает значения из априорного интервала $W = [0, V_{\max}]$.

В соответствии с аппликативной моделью [1 – 4], учитывающей эффекты затенения объектом участка фона, полагаем, что изображение объекта занимает часть Ω_s области Ω , а фоновое излучение формируется оставшейся частью 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 в картинной плоскости

$$x(r, t) = s(r - V_0 t) I_s(r - V_0 t) + v(r) [1 - I_s(r - V_0 t)] + n(r, t), \quad (1)$$

где $I_s(r) = 1$ при $r \in \Omega_s$ и $I_s(r) = 0$ при $r \notin \Omega_s$ – индикаторная функция, описывающая форму изображения объекта.

Оценка максимального правдоподобия скорости движения изображения объекта определяется как положение абсолютного (наибольшего) максимума логарифма функционала отношения правдоподобия (ФОП) [7, 8]

$$\hat{V} = \arg \sup_{V \in W} L(V), \quad (2)$$

где

$$L(V) = \frac{2}{N_0} \int_0^T \int_{\Omega} \{ x(r, t) [s(r - Vt) - v(r)] I_s(r - Vt) - [s^2(r - Vt) - v^2(r)] / 2 \} dr dt \quad (3)$$

– логарифм ФОП [3], а $V = V_1$.

Подставляя в (3) реализацию наблюдаемых данных (1), запишем логарифм ФОП в виде суммы сигнальной составляющей и шумовой функции [7]:

$$L(V) = S(V) + N(V), \quad (4)$$

где

$$S(V) = \langle L(V) \rangle = S(V, V_0) - S(V, V)/2 \quad (5)$$

– сигнальная составляющая логарифма ФОП,

$$S(V, V_0) = \frac{2}{N_0} \int_0^T \iint_{\Omega} [s(x - Vt, y) - v(x, y)][s(x - V_0t, y) - v(x, y)] I_s(x - Vt, y) I_s(x - V_0t, y) dx dy dt \quad (6)$$

– сигнальная функция, а $N(V)$ – шумовая функция, являющаяся реализацией центрированного гауссовского СП с корреляционной функцией

$$\langle N(V_1) N(V_2) \rangle = S(V_1, V_2). \quad (7)$$

Будем далее считать, что Ω_s – односвязная конечная область с кусочно-гладкой границей Γ , и любая прямая, параллельная направлению движения, пересекает границу Γ не более, чем в двух точках, за исключением прямолинейных участков границы, параллельных направлению движения. Области такого вида названы в [4] областями типа K_V .

Пусть отрезок $[y_{\min}, y_{\max}]$ оси Y представляет собой проекцию области Ω_s (вместе с границей Γ) на эту ось (рис. 1). Проведем через точки $y_{\min}$ и $y_{\max}$ прямые, параллельные оси X так, как показано на рис. 1. Каждая из этих двух прямых пересекает границу Γ лишь в одной точке. Эти две точки A и B пересечения указанных прямых с границей Γ разделяют Γ на две кривые Γ_- и Γ_+ , которые могут быть однозначно спроецированы на ось Y и описываются уравнениями $x(y) = \Gamma_-(y)$ и $x(y) = \Gamma_+(y)$ соответственно.

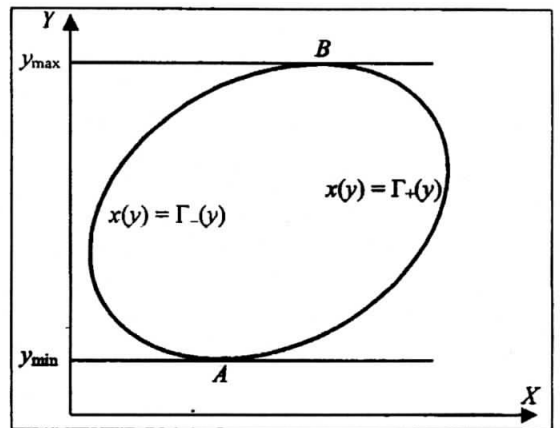


Рис. 1

Перепишем сигнальную функцию $S(V_1, V_2)$ (6) в виде

$$S(V_1, V_2) = \frac{2}{N_0} \int_0^T \iint_{\Omega} [s(x - \Delta V_1 t, y) - v(x + V_0 t, y)][s(x - \Delta V_2 t, y) - v(x + V_0 t, y)] I_s(x - \Delta V_1 t, y) I_s(x - \Delta V_2 t, y) dx dy dt, \quad (8)$$

где $\Delta V_1 = V_1 - V_0$, $\Delta V_2 = V_2 - V_0$. Найдем разложение функции $S(V_1, V_2)$ (8) в ряд Маклорена по ΔV_1 , ΔV_2 , ограничиваясь только линейными членами. Согласно (8), сигнальная функция непрерывно дифференцируема в окрестности истинного значения скорости V_0 , где $\Delta V_1 = \Delta V_2 = 0$, за исключением точки V_0 , где первая производная терпит разрыв непрерывности первого рода. Поэтому при $\Delta = \max(|\Delta V_1|, |\Delta V_2|) \rightarrow 0$ разложение для функции (8) будет иметь вид

$$S(V_1, V_2) = S(V_0, V_0) + \Delta V_1 \left. \frac{\partial S(V_1, V_2)}{\partial V_1} \right|_{(V_0, V_0)} + \Delta V_2 \left. \frac{\partial S(V_1, V_2)}{\partial V_2} \right|_{(V_0, V_0)} + o(\Delta), \Delta V_1 \leq \Delta V_2,$$

$$S(V_1, V_2) = S(V_0, V_0) + \Delta V_1 \left. \frac{\partial S(V_1, V_2)}{\partial V_1} \right|_{(V_0, V_0)} + \Delta V_2 \left. \frac{\partial S(V_1, V_2)}{\partial V_2} \right|_{(V_0, V_0)} + o(\Delta), \Delta V_1 \geq \Delta V_2.$$

Вычисляя частные производные функции (8), получим, что при $\Delta \rightarrow 0$ для функции $S(V_1, V_2)$ (7) справедливо асимптотическое разложение

$$S(V_1, V_2) = z^2 [1 - \delta |V_1 - V_2| - \varepsilon (V_1 + V_2 - 2V_0)] + o(\Delta), \quad (9)$$

где

$$z^2 = z^2(V_0) = 4\rho^2 = S(V_0, V_0) = \frac{2}{N_0} \int_0^T \iint_{\Omega} [s(x, y) - v(x + V_0 t, y)]^2 I_s(x, y) dx dy dt$$

– учетверенное ОСШ на выходе приемника максимального правдоподобия, равное величине сигнальной функции (6) в точке истинного значения скорости,

$$\varepsilon = \varepsilon(V_0) = \frac{\int_0^T \iint_{\Omega} [s(x, y) - v(x + V_0 t, y)] \frac{\partial v(x + V_0 t, y)}{\partial x} I_s(x, y) dx dy dt}{\int_0^T \iint_{\Omega} [s(x, y) - v(x + V_0 t, y)]^2 I_s(x, y) dx dy dt},$$

$$\delta = \delta(V_0) = \frac{\int_0^T \int_{\Gamma_-} [s(x, y) - v(x + V_0 t, y)]^2 dy dt + \int_0^T \int_{\Gamma_+} [s(x, y) - v(x + V_0 t, y)]^2 dy dt}{2 \int_0^T \iint_{\Omega} [s(x, y) - v(x + V_0 t, y)]^2 I_s(x, y) dx dy dt}.$$

В числитель выражения (10) входит сумма криволинейных интегралов второго рода (интегралов по проекциям) [9] по левой Γ_- и правой Γ_+ по отношению к прямой AB частям границы изображений объекта (рис. 1), причем

$$\int_{\Gamma_-} [s(x, y) - v(x + V_0 t, y)]^2 dy = \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} [s(\Gamma_-(y), y) - v(\Gamma_-(y) + V_0 t, y)]^2 dy,$$

$$\int_{\Gamma_+} [s(x, y) - v(x + V_0 t, y)]^2 dy = \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} [s(\Gamma_+(y), y) - v(\Gamma_+(y) + V_0 t, y)]^2 dy.$$

Эти интегралы вычисляются от квадрата разности интенсивностей изображения объекта и фона (скачка интенсивности) $s(x, y) - v(x + V_0 t, y)$ на границах Γ_- и Γ_+ в момент времени t . Отметим, что при одинаковой величине скачка интенсивности более существенный вклад в значения этих интегралов вносят те равновеликие участки границы Γ , которые составляют больший угол с направлением движения. При этом прямолинейные участки границы, параллельные направлению движения, не влияют на величину этих интегралов, поскольку длины проекций таких участков на ось Y равны нулю.

С помощью (5), (9) находим, что при $|V - V_0| \rightarrow 0$ сигнальная составляющая логарифма ФОР допускает асимптотическое разложение

$$S(V) = S(V, V_0) - S(V, V)/2 = z^2(1 - 2\delta|V - V_0|)/2 + o(|V - V_0|).$$

Согласно (13), сигнальная составляющая логарифма ФОР (5) достигает своего максимального значения в точке истинного значения скорости V_0 [7].

Положим, что ОСШ $\rho^2 = z^2/4$ достаточно велико при всех значениях V_0 , так что оценка скорости $\hat{V}$ является надежной [8], т.е. лежит в малой Δ_ε -окрестности истинного значения скорости V_0 . Найдем характеристики оценки скорости, используя метод локально марковской аппроксимации [8]. При этом точность оценки будем характеризовать ее дисперсией при фиксированном значении V_0 [8]. Выберем фиксированное значение Δ_ε настолько малым, чтобы при $V \in W_\varepsilon = [V_0 - \Delta_\varepsilon, V_0 + \Delta_\varepsilon]$ сигнальную функцию можно было аппроксимировать главным членом асимптотики (9). Случайный процесс $L(V)$ (3) является гауссовским и имеет первые два момента, допускающие разложения (13) и (9) в окрестности точки V_0 . При этом случайный процесс $\eta(V) = [L(V) - L(\chi)]/z$, где χ – произвольное значение скорости из интервала W_ε , также является гауссовским, а его математическое ожидание $M_\eta(V)$ и корреляционная функция $K_\eta(V_1, V_2)$ допускают в окрестности точки V_0 асимптотические разложения

$$M_\eta(V) = -z\delta(|V - V_0| - |\chi - V_0|) + o(|V - V_0|),$$

$$K_\eta(V_1, V_2) = \begin{cases} 2\delta \min(|V_1 - \chi|, |V_2 - \chi|), & (V_1 - \chi)(V_2 - \chi) > 0, \\ 0, & (V_1 - \chi)(V_2 - \chi) \leq 0. \end{cases}$$

При больших ОСШ оценка скорости $\hat{V} = \arg \sup_{V \in W_s} \eta(V)$. С помощью (14) находим, что процесс $\eta(V)$ является гауссовским марковским процессом [8], коэффициенты сноса и диффузии которого соответственно равны

$$k_1 = z\delta \begin{cases} -1, & V < V_0, \\ 1, & V > V_0; \end{cases} \quad k_2 = 2\delta. \quad (15)$$

В [8] с использованием марковских свойств процесса $\eta(V)$ с коэффициентами сноса и диффузии (15) найдено выражение для функции распределения ошибки надежной оценки. Воспользовавшись этим выражением при больших ОСШ, получаем, что надежная оценка скорости является несмещенной, ее дисперсия определяется выражением [8]

$$D(\hat{V} | V_0) = \langle (\hat{V} - V_0)^2 \rangle = 13/2z^4\delta^2 = 26/Q^2, \quad (16)$$

где

$$Q = \frac{2}{N_0} \left\{ \int_0^T \int_{\Gamma_-} [s(x, y) - v(x + V_0 t, y)]^2 dy dt + \int_0^T \int_{\Gamma_+} [s(x, y) - v(x + V_0 t, y)]^2 dy dt \right\}, \quad (17)$$

а криволинейные интегралы второго рода [9] вычисляются в соответствии с (11), (12). Согласно (17), дисперсия надежной оценки скорости (16) не зависит от значений интенсивности во внутренних точках изображения объекта. Однако в общем случае характеристики оценки скорости (16) зависят от истинного значения скорости.

Влияние истинного значения скорости движения объекта на точность ее оценки рассмотрим на примере оценки скорости движения прямоугольного объекта размером $l_x \times l_y$, стороны которого ориентированы вдоль осей X и Y соответственно. Пусть на фоне с линейчатой текстурой $v(x, y) = A[1 + m \cos(2\pi x/\Theta)]$ наблюдается изображение прямоугольного объекта $s(x - V_0 t, y) = v(x - V_0 t, y)$, совпадающее с фоном в начальный момент движения. Здесь $\Theta = l_x/N$, N – натуральное число. На рис. 2 показана зависимость от $\Psi = TV_0/\Theta$ нормированной дисперсии $D_0 = 2A^4 l_y^2 T^4 D(\hat{V} | V_0) / 13N_0^2$ оценки скорости V_0 . Сплошная кривая соответствует $m=0,2$, штриховая – $m=0,4$, пунктирная – $m=0,6$, штрихпунктирная – $m=0,8$.

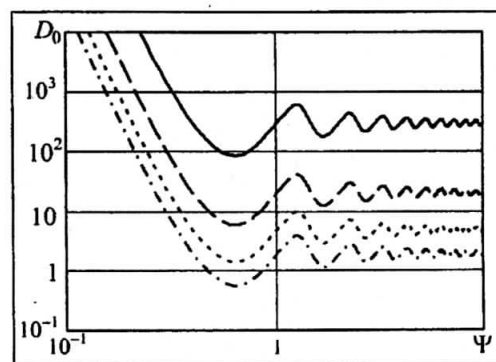


Рис. 2

● Показано, что при наличии неоднородного фона величина истинного значения скорости движения объекта может существенно влиять на точность оценки скорости.

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

Литература

1. Бычков А. А., Понькин В. А. Обнаружение протяженных затеняющих фон объектов. – Автометрия, 1992, №4.
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.
3. Трифонов А. П., Куцов Р. В. Обнаружение движущегося пространственно протяженного объекта на фоне с неизвестной интенсивностью. – Автометрия, 2005, №1.
4. Трифонов А. П., Куцов Р. В. Обнаружение движущегося с неизвестной скоростью пространственно протяженного объекта по его изображению с неизвестной интенсивностью. – Радиотехника, 2005, №7.
5. Туринов В. И. К вопросу об измерении скорости удаленных объектов по изменениям положения и размеров оптического изображения. – Радиотехника и электроника, 1996, №5.
6. Гнеушев А. Н. Система для оценки скорости транспортных средств по контурным признакам в режиме реального времени. – Изв. РАН. Сер. Теория и системы управления, 2005, №1.
7. Куликов Е. И., Трифонов А. П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. – М.: Сов. радио, 1978.
8. Трифонов А. П., Шинаков Ю. С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1986.
9. Ильин В. А., Позняк Э. Г. Основы математического анализа. Ч. II. – М.: Наука, 1980.

Поступила 1 марта 2007 г.