249

ISSN 0021-3470

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ "КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ
ЗАВЕДЕНИЙ

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

ВОЕННЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ТОМ 48

9-10
сентябрь-октябрь

ИЗДАНИЕ
НАЦИОНАЛЬНОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
УКРАИНЫ
«КИЕВСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ»

2005

В практике проектирования блоков *4*, *5*, *6* канала распознавания (рис. 2) целесообразно использовать комплексные информативные признаки (доплеровские + сигнатурные + поляризационные) с целью расширения границ устойчивости в изменяющейся помехоцелевой обстановке [7].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бакут П. А., Большаков И. А., Герасимов Б. М. и др. Под ред. Тартаковского Г. П.* Вопросы статистической теории радиолокации. — М.: Сов. радио, 1963. -т.1, 1964, т.2.
2. *Савенков В. А.* Проблемы развития и совершенствования радиотехнических систем миллиметрового диапазона / Вооружение. Политика, Конверсия. — 1993. — №3. — С. 19—22.
3. *Бакулев П. А., Степин В. М.* Методы и устройства селекции движущихся целей. — М.: Сов. радио, 1986. — 286с.
4. *Зубков А. Н., Акиншин Н. С., Савенков В. А., Чесноков Ю. С.* Критериальные основы информационно-энергетической оптимизации радиолокационных поисково-прицельных каналов миллиметрового диапазона // Оборонная техника. — 1996, — №6–7. — С. 51 — 53.
5. Защита от радиопомех / *Под ред. Максимова М. В.* — М.: Сов. радио, 1976.—496 с.
6. *Бартон Д., Вард Г.* Справочник по радиолокационным измерениям. — М.: Сов. радио, 1976. – 392 с.
7. *Зубков А. Н., Обуханич Р. В., Карушкин Н. Ф., Прудиус И. Н., Смеркло Л. М.* Перспективы создания радиолокационных систем селекции и распознавания сложных целей в миллиметровом диапазоне // Прикладная радиоэлектроника. — 2002. — т.1, №1. — С. 77 — 81.
8. *Небабин В. Г., Сергеев В. В.* Методы и техника радиолокационного распознавания. — М.: Радио и связь, 1984.—152 с.
9. *Мельник Ю. А., Зубкович С. Г., Степаненко В. Д. и др. Под ред. Мельника Ю. А.* Радиолокационные методы исследования Земли. — М.: Сов. радио, 1980.–262с.
10. *Пасмуров А. Я.* Получение радиолокационных изображений летательных аппаратов // Зарубежная радиоэлектроника. — 1987. — №12. — С. 3 — 30.
11. *Muravyev V., Rubanik A., Vorobiev V., Choban Y., Fedosuk P.* 3 mm Pulse Radar for Short–Range Navigation and Collision Avoidance // IEEE. AEROSPACE and Electronic SYSTEMS MAGAZINE. – July 1999. – 23 p.
12. *Giuli D.* Polarization Diversity in Radars. Proceedings of the IEEE. – February 1986. – Vol. 74, №2, P.6–34.

Львовский научно-исслед. радиотезн. ин-т

Поступила в редакцию 29.04.05

УДК 621.396

ТРИФОНОВ А. П., БЕСПАЛОВА М. Б.

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ ОЦЕНКА СКОРОСТИ ФЛУКТУИРУЮЩЕЙ ЦЕЛИ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ РАЗРЫВНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ*

С учетом аномальных ошибок найдены асимптотические выражения для характеристик оценок максимального правдоподобия скорости медленно или быстро флуктуирующих целей Рассмотрены потери в точности оценки вследствие быстрых флуктуаций цели.

В последние годы новым направлением в теории и технике радиоэлектронных систем является использование в качестве зондирующего сигнала импульсов нано- и пикосекундной длительности [1—3]. Короткоимпульсные сигналы и их последовательности представляют собой частный случай сверхширокополосных сигналов (СШПС) [1, 2]. Реальные СШПС достаточно часто имеют весьма короткие фронты, что позволяет успешно аппроксимировать их разрывными функциями времени [1—5]. В [4] исследована сверхширокополосная оценка дальности флуктуирующей цели при зондировании разрывными импульсами. Рассмотрим здесь сверхширокополосную оценку скорости флуктуирующей цели при зондировании последовательностью разрывных СШПС.*

Положим, что цель движется с радиальной скоростью

$$V_0 \in \left[-V_{\max}/2; V_{\max}/2\right], V_{\max} << c, \tag{1}$$

где c — скорость распространения сигнала. Вначале цель будем считать медленно флуктуирующей [6], так, что рассеянный целью сигнал [5]

$$s_N\left(t, V_0, a_0\right) = \sum_{k=0}^{N-1} s\left[t - k\theta\left(1 + 2V_0/c\right)\right] = a_0 \sum_{k=0}^{N-1} f\left\{\left[t - k\theta\left(1 + 2V_0/c\right)\right]/\tau\right\}. \tag{2}$$

Здесь θ — период следования, $a_0 = \max s(t)$ — априори неизвестная амплитуда, $\tau = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t)\mathrm{d}t \left[\max s(t)\right]^{-2}$ — эквивалентная длительность одного импульса, которая как и в [1—5] не превышает долей наносекунды. Функция $f(\cdot)$ описывает форму одного импульса, удовлетворяет условию излучения [1] и нормирована так, что

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)\mathrm{d}x = 0, \quad \max f(x) = 1, \quad \int_{-\infty}^{\infty} f^2(x)\mathrm{d}x = 1. \tag{3}$$

Обозначим

$$\Psi\left(y\right) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) f\left(x - y\right)\mathrm{d}x \tag{4}$$

— нормированную сигнальную функцию [7] при оценке положения функции $f(\cdot)$ (3). Так как СШПС последовательности (2) аппроксимируются разрывны-

---

* Приведенные результаты получены при поддержке CRDF и Минобразования РФ (проект VZ-010-0).

ми функциями времени, то при $|y| \to 0$ для (4) справедливо асимптотическое разложение [8]

$$\Psi(y) = 1 - \delta|y| + o(|y|), \quad \delta = \lim_{y \to 0_+} \{[1 - \Psi(y)]/y\} > 0. \tag{5}$$

Пусть рассеянный целью сигнал (2) наблюдается на фоне гауссовского белого шума $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0 и интервал наблюдения $[0, T]$ больше длительности всей последовательности (2), т. е. $T > N\theta$. Скважность последовательности (2) полагаем не слишком малой, так что отдельные СШПС не перекрываются. Тогда логарифм функционала отношения правдоподобия (ФОП) для (2) определяется выражением [5, 7]

$$L(V, a) = a \sum_{k=0}^{N-1} L_k(V) - a^2 N \tilde{z}^2 / 2, \tag{6}$$

где $L_k(V) = 2\int_0^T x(t) f\{[t - k\theta(1 + 2V/c)]/\tau\} dt / N_0$, $x(t) = s_N(t, V_0, a_0) + n(t)$ — реализация наблюдаемых данных, а $\tilde{z}^2 = 2\tau / N_0$ — отношение сигнал/шум (ОСШ) для одного СШПС с единичной амплитудой. Для исключения влияния неизвестной амплитуды, заменим ее значение на оценку максимального правдоподобия (ОМП) [7]. Максимизируя с этой целью (6) по a имеем

$$L(V) = \sup_a L(V, a) = \left[\sum_{k=0}^{N-1} L_k(V)\right]^2 / 2\tilde{z}^2 N. \tag{7}$$

Согласно определению, ОМП скорости медленно флуктуирующей цели запишется как

$$\hat{V} = \arg\sup L(V), V \in [-V_{\max}/2; V_{\max}/2]. \tag{8}$$

Для расчета характеристик ОМП (8), аналогично [7] представим (7) в виде суммы сигнальной и шумовой функций [5]

$$L(V) = S_a(V_0, V) + N_a(V) + 1/2, \tag{9}$$

где сигнальная функция

$$S_a(V_0, V) = z^2 S^2(V_0, V)/2, \tag{10}$$

а шумовая функция $N_a(V) = L(V) - \langle L(V) \rangle$ — центрирована и обладает корреляционной функцией

$$B_a(V_1, V_2) = \langle N_a(V_1) N_a(V_2) \rangle =$$

$$=S(V_1,V_2)\left[z^2 S(V_0,V_1)S(V_0,V_2)+S(V_1,V_2)/2\right]. \qquad (11)$$

В (10), (11) обозначено

$$S(V_1,V_2)=\sum_{k=0}^{N-1} S_k(V_1,V_2)/N, \qquad (12)$$

$$S_k(V_1,V_2)=\Psi\left[2kQ(V_1-V_2)/c\right], \qquad (13)$$

$Q=\theta/\tau$ — скважность последовательности (2)

$$z^2=Na_0\tilde{z}^2=Nz_1^2 \qquad (14)$$

— ОСШ для всей последовательности (2), а $z_1^2=a_0^2\tilde{z}^2=2a_0^2\tau/N_0$ — ОСШ для одного СШПС последовательности (2). Обозначим ΔV — длительность сигнальной функции (12), так что $S(V_0,V_0\pm\Delta V)\cong 0$. Тогда в (9) сигнальная функция отлична от нуля лишь когда

$$V\in V_S=\left[V_0-\Delta V;V_0+\Delta V\right]. \qquad (15)$$

Если $\hat{V}\in V$, то ОМП (8) будем называть надежной [7]. Сигнальные функции (10), (12), согласно (4), (13) достигают максимума при $V=V_0$. Следовательно, выходное ОСШ для всей последовательности (2) будет равно [7]

$$z_N^2=S_a^2(V_0,V_0)/B_a(V_0,V_0)=z^4/2(1+2z^2). \qquad (16)$$

Если суммарное ОСШ z^2 (14) для всей последовательности (2) достаточно велико, то (16) можно приближенно переписать в виде

$$z_N^2\cong z^2/4. \qquad (17)$$

Полагаем далее, что выходное ОСШ (16), (17) для последовательности (2) настолько велико, что надежная ОМП скорости обладает высокой апостериорной точностью [7, 8]. Тогда характеристики надежной ОМП скорости определяются поведением логарифма ФОП (7), (9) в малой окрестности истинного значения скорости V_0 [7]. Обозначим

$$\Delta=\max\left(|V_1-V_0|,|V_2-V_0|,|V_2-V_1|\right). \qquad (18)$$

Устремляя $\Delta\to 0$ и учитывая (5), (13), аналогично [5], получаем, что в малой окрестности истинного значения скорости V_0 для функций (10), (11) справедливы асимптотические разложения

$$S_a(V_0,V)=A_S-B_S\left|V-V_0\right|+o(\Delta), \qquad (19)$$

$$B_a(V_1,V_2)=A_N-B_N\left|V_1-V_2\right|-$$

$$-C_N\left[\max(V_0,V_1,V_2)-\min(V_0,V_1,V_2)\right]+o(\Delta), \qquad (20)$$

где

$$A_S=z^2/2,\quad B_S=z^2\delta(N-1)Q/c,\quad A_N=z^2+1/2,$$

$$B_N=\delta(N-1)Q/c,\quad C_N=2z^2\delta Q(N-1)/c. \qquad (21)$$

Согласно (19), (20) у первых двух моментов логарифма ФОП (7), (9) не существует второй производной по оцениваемому параметру в точке V_0. Поэтому использовать формулу Крамера—Рао [7] для расчета дисперсии надежной оценки нельзя. Эту дисперсию можно найти, воспользовавшись методом локально-марковской аппроксимации [8]. Применение метода локально-марковской аппроксимации позволяет получить для дисперсии надежной оценки выражение [9]

$$D=13\left(2B_N+C_N\right)^2/8B_S^4. \qquad (22)$$

Подставляя значения коэффициентов разложения (21) в (22), можем записать дисперсию надежной ОМП скорости медленно флуктуирующей цели в виде

$$D(V)=\frac{13\left(1+z^{-2}\right)^2c^2}{2z^4\delta^2Q^2(N-1)^2}\cong\frac{13c^2}{2z_1^4\delta^2Q^2N^2(N-1)^2}. \qquad (23)$$

Отсюда следует, что дисперсия надежной ОМП скорости при зондировании разрывными импульсами с ростом ОСШ убывает как z^{-4}, в то время как при зондировании регулярными импульсами дисперсия надежной ОМП скорости убывает лишь как z^{-2} [10]. Когда растет число импульсов N последовательности (2) при фиксированном ОСШ z_1^2 для одного импульса, тогда, согласно (23), дисперсия убывает как N^{-4}. Если же для зондирования используются регулярные импульсы, то дисперсия надежной ОМП скорости с ростом числа импульсов N убывает лишь как N^{-3} [10].

Положим, теперь, что ОМП (8) является аномальной [7], т. е.

$$\hat{V}\in V_N=\left\{[-V_{\max}/2;V_0-\Delta V];[V_0+\Delta V;V_{\max}/2]\right\}. \qquad (24)$$

При $V\in V_N$, $S(V_0,V)\cong 0$ и логарифм ФОП (7), (9) является реализацией стационарного негауссовского случайного процесса [5]. Будем полагать, что априорный интервал возможных значений скорости (1) достаточно велик, так что

$$V_{\max}\gg\Delta V, \qquad (25)$$

а истинное значение скорости V_0 распределено равновероятно в априорном интервале (1). Тогда, используя [7, 8], получаем асимптотическое выражение для безусловного рассеяния (среднего квадрата ошибки) ОМП скорости (8) с учетом аномальных ошибок

$$B(V)=P_0 D(V)+(1-P_0)V_{\max}^2/6. \qquad (26)$$

Здесь

$$P_0=P(\hat{V}\in V_s) \qquad (27)$$

— вероятность надежной оценки [7]. В силу определения ОМП (8) можно переписать (27) как

$$P_0=P(H_S>H_N), \qquad (28)$$

где

$$H_S=\sup L(V),\quad V\in V_S;\quad H_N=\sup L(V),\ \ V\in V_N. \qquad (29)$$

При выполнении (25) случайные величины H_S и H_N приближенно статистически независимы и (28) принимает вид

$$P_0=\int P_N(H)\mathrm{d}P_S(H), \qquad (30)$$

где $P_N(H)$ — функция распределения случайной величины H_N, а $P_S(H)$ — функция распределения случайной величины H_S. Функции распределения случайных величин (29) для медленно флуктуирующей цели найдены в [5]

$$P_S(H)=\int_0^H\left[1-\exp(-H+x)\right]^2\exp\left(-x-z^2/2\right)\mathrm{ch}\left(z\sqrt{2x}\right)(\pi x)^{-1/2}\mathrm{d}x, \qquad (31)$$

$$P_N(H)=\begin{cases}\exp\left[-2\delta\gamma(N-1)\exp(-H)\sqrt{H/\pi}\right], & H\geq 1/2\\ 0, & H<1/2.\end{cases} \qquad (32)$$

Здесь $\gamma=\theta V_{\max}/c\tau$ — отношение максимально возможного перемещения цели за период следования импульсов последовательности (2) к пространственной длине одного импульса.

Подставляя (31) и (32) в (30), находим приближенное выражение для вероятности надежной ОМП скорости медленно флуктуирующей цели

$$P_0=2\exp\left(-\frac{z^2}{2}\right)\int_{1/2}^{\infty}\mathrm{d}y\int_0^y\left[1-\exp(-y+x)\right]\times$$

$$\times\exp\left[-y-2\delta\gamma(N-1)\sqrt{\frac{y}{\pi}}\exp(-y)\right]\mathrm{ch}\left(z\sqrt{2x}\right)(\pi x)^{-1/2}\mathrm{d}x. \qquad (33)$$

Формулы для характеристик ОМП скорости медленно флуктуирующей цели (23), (26), (33) являются приближенными, однако их точность возрастает с увеличением ОСШ z (14) и параметра $m=\gamma\,\delta(N-1)=V_{\max}/\Delta V_a$. Здесь ΔV_a — ширина треугольной аппроксимации сигнальной функции (9) двумя первыми членами асимптотического разложения (19). Следовательно, параметр m характеризует число элементов разрешения по скорости в априорном интервале (1) возможных значений скорости.

Найдем далее характеристики ОМП скорости быстро флуктуирующей цели. Рассеянный быстро флуктуирующей целью сигнал имеет вид [5, 6]

$$s_N(t,V_0,a_{0k})=\sum_{k=0}^{N-1}a_{0k}\,f\{[t-k\theta(1+2V_0/c)]/\tau\}, \tag{34}$$

где a_{0k} — априори неизвестная амплитуда k-го импульса. Аналогично (6), логарифм ФОП для последовательности (34) определяется выражением [5, 7]

$$L(V,a_k)=\sum_{k=0}^{N-1}a_k\left[L_k(V)-a_k\tilde{z}^2/2\right]. \tag{35}$$

Здесь $L_k(V)$ определяется аналогично (6), а $x(t)=s_N(t,V_0,a_{0k})+n(t)$ — реализация наблюдаемых данных. Для того, чтобы исключить влияние неизвестных амплитуд последовательности (34), заменим их значения на ОМП [5, 7]. Максимизируя с этой целью (35) по всем a_k, $k=\overline{0,N-1}$, имеем

$$L_f(V)=\sup_{a_k}L(V,a_k)=\sum_{k=0}^{N-1}L_k^2(V)/2\tilde{z}^2. \tag{36}$$

Согласно определению ОМП быстро флуктуирующей цели запишется как

$$\hat{V}=\arg\sup L_f(V),\quad V\in[-V_{\max}/2;V_{\max}/2]. \tag{37}$$

Для расчета характеристик ОМП (37) представим (36) в виде суммы сигнальной и шумовой функций [5]

$$L_f(V)=S_f(V_o,V)+N_f(V)+N/2, \tag{38}$$

где сигнальная функция

$$S_f(V_0,V)=\sum_{k=0}^{N-1}z_k^2S_k(V_0,V)/2, \tag{39}$$

а шумовая функция $N_f(V)=L_f(V)-\langle L_f(V)\rangle$ центрирована и обладает корреляционной функцией

$$B_f(V_1,V_2)=\sum_{k=0}^{N-1}S_k(V_1,V_2)\left[z_k^2S_k(V_0,V_1)S_k(V_0,V_2)+S_k(V_1,V_2)/2\right]. \tag{40}$$

В (39), (40) $S_k(V_1, V_2)$ определяется из (13), а $z_k^2 = a_{0k}^2 \tilde{z}^2 = 2a_{0k}^2 \tau / N_0$ — ОСШ для k-го СШПС последовательности (34). Если $\hat{V} \in V_s$ (15), то ОМП (37) скорости быстро флуктуирующей цели будем называть надежной [7]. Сигнальная функция (39), согласно (4), (13) достигает максимума при $V = V_0$. Следовательно, выходное ОСШ для всей последовательности (35) будет равно [5, 7]

$$z_{fN}^2 = S_f^2(V_0, V_0) / B_f(V_0, V_0) = z_f^4 / 2\left(N + 2z_f^2\right) = z_f^2 z_m^2 / 2\left(1 + 2z_m^2\right). \quad (41)$$

Здесь $z_f^2 = \sum_{k=0}^{N-1} z_k^2 = \tilde{z}^2 \sum_{k=0}^{N-1} a_{0k}^2$ — суммарное ОСШ для всей последовательности (34), а

$$z_m^2 = z_f^2 / N = \sum_{k=0}^{N-1} z_k^2 / N \quad (42)$$

— среднее ОСШ для одного СШПС последовательности (34).

Согласно (41) выходное ОСШ для всей последовательности (34) существенно зависит от среднего ОСШ для одного СШПС (42). Так, при $z_m^2 >> 1$ имеем $z_{fN}^2 \cong z_f^2 / 4$, что совпадает с выходным ОСШ (17) при медленных флуктуациях цели. Соответственно, если $z_m^2 << 1$, то $z_{fN}^2 \cong z_f^2 z_m^2 / 2$ и, следовательно, выходное ОСШ для быстро флуктуирующей цели будет существенно меньше, чем для медленно флуктуирующей. Полагаем далее, что выходное ОСШ (41) достаточно велико при любых z_m^2 (42), так что надежная ОМП скорости (15) обладает высокой апостериорной точностью. Тогда характеристики надежной ОМП скорости быстро флуктуирующей цели определяются поведением логарифма ФОП (36), (38) в малой окрестности истинного значения скорости V_0 [7]. Устремляя величину (18) $\Delta \to 0$ и учитывая (5), (13), аналогично [5] получаем, что в малой окрестности V_0 для функций (39), (40) справедливы асимптотические разложения (19), (20). В случае быстрых флуктуаций цели коэффициенты этих разложений имеют вид

$$A_S = z_f^2 / 2, \quad B_S = 2z_f^2 \delta QA / c, \quad A_N = z_f^2 + N/2,$$
$$B_N = \delta QN(N-1)/c, \quad C_N = 4\delta QAz_f^2 / c, \quad (43)$$

где

$$A = \sum_{k=0}^{N-1} kz_k^2 / z_f^2 = \sum_{k=0}^{N-1} ka_{0k}^2 / \sum_{k=0}^{N-1} a_{0k}^2. \quad (44)$$

Опять используя метод локально-марковской аппроксимации, подставим коэффициенты (43) в (22). В результате получаем дисперсию надежной ОМП скорости быстро флуктуирующей цели в виде

$$D_f(V) = \frac{13\left[N(N-1)+2Az_f^2\right]^2}{32z_f^8\delta^2Q^2(N-1)^4A^4}. \tag{45}$$

Обозначая $\alpha = 2A/(N-1)$, можно переписать (45) как

$$D_f(V) = \frac{13c^2}{2z_f^4\delta^2Q^2(N-1)^2}\left(\frac{1+\alpha z_m^2}{\alpha^2 z_m^2}\right)^2. \tag{46}$$

Из сопоставления (23) и (46) следует, что наличие быстрых флуктуаций цели в общем случае приводит (при равных суммарных ОСШ для рассеянных последовательностей) к увеличению дисперсии надежной ОМП скорости в $\left(1+\alpha z_m^2\right)^2/\alpha^4 z_m^4$ раз. Когда $z_m^2 \ll 1$этот проигрыш в точности надежных ОМП может быть значительным. Если же $z_m^2 \gg 1$, то дисперсии (23) и (46) отличаются множителем α^{-2}, который зависит от распределения амплитуд отдельных импульсов в последовательности (34). Возможна ситуация, когда при оценке скорости сделана ошибка в выборе модели, т. е. цель медленно флуктуирующая, а рассеянный сигнал обрабатывается, как для быстро флуктуирующей цели. Тогда (44) $A = (N-1)/2, \alpha = 1$ и проигрыш в точности оценки скорости вследствие ошибки в выборе модели равен $\left(1+z_m^2\right)^2/z_m^4$. Следовательно, при $z_m \ll 1$ ошибка в выборе модели приведет к существенному увеличению дисперсии надежной оценки скорости. Однако, если $z_m \gg 1$, то ошибка в выборе модели практически не увеличивает дисперсии надежной оценки скорости медленно флуктуирующей цели.

Положим теперь, что ОМП (37) является аномальной [7], т.е. $\hat{V} \in V_N$ (24). Пусть выполняется (25), а истинное значение скорости V_0 распределено равновероятно в априорном интервале (1). Тогда, используя [7, 8], получаем асимптотическое выражение для безусловного рассеяния ОМП скорости (37) с учетом аномальных ошибок

$$B_f(V) = P_{0f}D(V) + \left(1-P_{0f}\right)V_{\max}^2/6. \tag{47}$$

Здесь вероятность надежной оценки $P_{0f} = P\left(\hat{V} \in V_s\right)$ может быть записана в виде (30), куда теперь входят распределения случайных величин (29) при быстрых флуктуациях цели. Функции распределения случайных величин (29) для быстро флуктуирующей цели найдены в [5]

$$P_{fS}(H)=\int_0^H\left\{1-\exp\left[-\frac{2z_f^2A(H-x)}{2z_f^2A+N(N-1)}\right]\right\}^2\left(\frac{2x}{z_f^2}\right)^{(N-2)/4}\times$$

$$\times\exp\left(-x-\frac{z_f^2}{2}\right)\mathrm{I}_{N/2-1}\left(z_f\sqrt{2x}\right)dx, \tag{48}$$

$$P_N(H)=\begin{cases}\exp\left[-\dfrac{2\delta\gamma\,(N-1)H^{N/2}}{\Gamma(N/2)}\exp(-H)\right], & H\ge N/2\\ 0, & H<N/2.\end{cases} \tag{49}$$

Здесь $\mathrm{I}_\nu(\cdot)$ — функция Бесселя мнимого аргумента порядка ν, а $\Gamma(\cdot)$ — гамма-функция. Подставляя (48), (49) в (30), находим приближенное выражение для вероятности надежной ОМП скорости быстро флуктуирующей цели

$$P_{0f}=\frac{4z_f^2A\exp\left(-z_f^2/2\right)}{2z_f^2A+N(N-1)}\int_{N/2}^{\infty}dy\int_0^y\left\{1-\exp\left[-\frac{2z_f^2A(y-x)}{2z_f^2A+N(N-1)}\right]\right\}\left(\frac{2x}{z_f^2}\right)^{(N-2)/4}\times$$

$$\times\exp\left[-\frac{2z_f^2Ay+N(N-1)x}{2z_f^2A+N(N-1)}-\frac{2\delta\gamma(N-1)y^{N/2}}{\Gamma(N/2)}\exp(-y)\right]\mathrm{I}_{N/2-1}\left(z_f\sqrt{2x}\right)dx. \tag{50}$$

Формулы для характеристик ОМП скорости быстро флуктуирующей цели (45), (47), (50) являются приближенными, однако их точность возрастает с увеличением ОСШ z_f и параметра $m=\gamma\delta(N-1)$. Найденные асимптотически точные (с ростом ОСШ и числа элементов разрешения по скорости) выражения для характеристик ОМП скорости с учетом аномальных ошибок, позволяют определить потери в точности сверхширокополосной оценки скорости вследствие флуктуаций цели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Астанин Л. Ю., Костылев А. А.* Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений.— М. : Радио и связь, 1989.— 192 с.

2. *删Хармут Х. Ф.* Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи.— М. : Радио и связь, 1985.— 376 с.

3. *Бункин Б. В., Кашин В. А.* Особенности, проблемы и перспективы субнаносекундных видеоимпульсных РЛС // Радиотехника.— 1995.— № 4, 5.— С. 128—133.

4. *Трифонов А. П., Беспалова М. Б.* Сверхширокополосная оценка дальности при зондировании разрывными импульсами // Радиоэлектроника.— 1999.— №7.— С. 31—42. (Изв. вузов).

5. *Трифонов А. П., Беспалова М. Б., Корчагин Ю. Э.* Сверхширокополосное обнаружение флуктуирующей цели с неизвестной скоростью при зондировании разрывными импульсами // Радиоэлектроника.— 2004.— Т. 47.— №10.— С. 3—13. (Изв. вузов).

6. *Сосулин Ю. Г.* Теоретические основы радиолокации и радионавигации.— М. : Радио и связь, 1992.— 304 с.
7. *Куликов Е. И., Трифонов А. П.* Оценка параметров сигналов на фоне помех.— М. : Сов. радио, 1978.— 296 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. *Трифонов А. П., Беспалова М. Б.* Эффективность оценок периода следования случайных радиоимпульсов с неизвестной интенсивностью // Радиотехника.— 2002.— №11.— С. 65—69.
10. *Трифонов А. П., Беспалова М. Б.* Эффективность сверхширокополосного обнаружения и измерения дальности и скорости цели // Радиотехника и электроника.— 1997.— Т. 42.— №4.— С. 451—456.

Воронежский государственный ун-т.

Поступила в редакцию 27.10.04.

УДК 621.396

СТРОЦЕВ А. А., ИВАЩЕНКО И. Л.

УСЛОВИЯ, БЛАГОПРИЯТСТВУЮЩИЕ ПОИСКУ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ

На основе построения условий, благоприятствующих успешному поиску, проведен анализ ситуации поиска динамического объекта многопозиционной информационной системой. Получены условия, характеризующие как возможность концентрации поисковых усилий в областях наибольшей вероятности положения искомого объекта, так и возможность определения измеряемых параметров.

В различных областях теории управления при построении научно-методического аппарата и его практическом применении часто рассматриваются некоторые общие положения, которые помогают не только построить удобные в практическом применении алгоритмы, но и пояснить логику их получения и функционирования. При этом построения могут носить характер иллюстраций, а не строгих доказательств. Так, например, в теории фильтрации при выборе датчиков измерительных систем и алгоритмов оценивания большое значение имеет специальный вид наблюдаемости, который получил название условия, благоприятствующего точному оцениванию [1, 2].

Перспективным направлением применения теории условных марковских процессов является поиск динамических объектов (ДО) многопозиционными информационными системами (МИС). В частности, в [3] предложена новая модель распределения поисковых усилий в виде траекторий поиска, позволяющая в отличие от стратегий поиска, рассматриваемых как плотности поиска [4], формировать управление отдельными поисковыми пунктами (ПП) вхо-