187

187

ISSN 0021-3470

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ
ЗАВЕДЕНИЙ

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

ТОМ 42

7-8

ИЗДАНИЕ
НАЦИОНАЛЬНОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
УКРАИНЫ
«КИЕВСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ»

1999

УДК 621.391

ТРИФОНОВ А. П., БЕСПАЛОВА М. Б.

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ ОЦЕНКА ДАЛЬНОСТИ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ РАЗРЫВНЫХ ИМПУЛЬСОВ*

С учетом аномальных ошибок найдены асимптотические выражения для характеристик оценок максимального правдоподобия дальности стабильной, а также медленно и быстро флуктуирующих целей.

В последние годы новым направлением в теории и технике локационных систем является использование в качестве зондирующих сигналов радио- и видеоимпульсов нано- и пикосекундной длительности [1, 2]. Поскольку потенциальная точность оценки дальности пропорциональна длительности зондирующего сигнала [3], то применение подобных сигналов позволяет определить дальность с точностью до нескольких сантиметров. Коротоимпульсные сигналы и их последовательности представляют собой частный случай сверхширокополосных сигналов (СШПС) [1, 2]. В [4] получены характеристики оценки дальности при использовании последовательности СШПС. При этом предполагалось, что для отдельных импульсов последовательности выполняются обычные условия регулярности [5]. Однако реальные СШПС [1] достаточно часто имеют весьма короткие фронты, что позволяет успешно аппроксимировать их разрывными функциями времени [1, 2, 5, 6]. В связи с этим рассмотрим оценку дальности цели при зондировании последовательностью разрывных СШПС.

Положим, что излучается последовательность СШПС вида

$$\widetilde{s}_N(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \widetilde{s}\,[t-(k-\mu)\,\theta-\lambda\,], \qquad (1)$$

где $\widetilde{s}\,(t)$ — функция, описывающая форму одного СШПС последовательности, λ — временное положение последовательности, θ — период следования СШПС. Параметр μ определяет точку последовательности с которой связано ее временное положение λ. Так, при $\mu = 0$ величина λ представляет собой положение первого импульса, а при $\mu = (N-1)/2$ — временное положение середины последовательности.

Пусть облучаемая последовательностью (1) цель находится на расстоянии

---

* Приведенные результаты получены при выполнении гранта 97-0-8.1-25 в области фундаментального естествознания.

$$R_0 \in [R_{\min}, R_{\max}].\qquad(2)$$

Кроме того, вначале будем считать цель стабильной, так что все параметры рассеянного целью сигнала, кроме дальности, априори известны. Тогда рассеянный целью сигнал можно записать как

$$s_N(t, R_0, a_{0k}) = \sum_{k=0}^{N-1} a_{0k} s_1 [t - (k - \mu)\theta - 2R_o / c],\qquad(3)$$

где a_{0k} ($k = \overline{0, N-1}$) — амплитуда k-го СШПС последовательности, c — скорость распространения сигнала. Функция $s_1(t)$ описывает форму одного рассеянного СШПС с единичной амплитудой и в общем случае отличается от $\widetilde{s}(t)$ в (1). Обозначим: $\Psi(\tau) = \int_0^T s_1(t) s_1(t-\tau)\, dt / \int_0^T s_1^2(t)\, dt$ — нормированная сигнальная функция [3, 5] одного рассеянного СШПС, T — время наблюдения. Так как функцию $s_1(t)$ полагаем разрывной функцией времени, то [5, 6] при $|\tau| \to 0$

$$\Psi(\tau) = 1 - \delta|\tau| + o(|\tau|),\qquad(4)$$

$$\delta = \lim_{\tau \to 0+} \{[1 - \Psi(\tau)]/\tau\}.$$

Положим, что последовательность (3) наблюдается на фоне гаусссовского белого шума $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0 и интервал наблюдения $[0, T]$ больше длительности всей последовательности, т. е. $T > N\theta$. Скважность последовательности (3) считаем не слишком малой, так что отдельные СШПС не перекрываются. Тогда логарифм функционала отношения правдоподобия (ФОП) для последовательности (3) определяется выражением [3]

$$L(R) = \sum_{k=0}^{N-1} a_{0k} [L_k(R) - a_{0k} \widetilde{z}^2 / 2],\qquad(5)$$

где

$$L_k(R) = 2\int_0^T x(t) s_1 [t - (k-\mu)\theta - 2R/c]\, dt / N_0,$$

$x(t) = s_N(t, R_0, a_{0k}) + n(t)$ — реализация наблюдаемых данных, а $\tilde{z}^2 = 2\int_0^T s_1^2(t)\,dt / N_0$ — отношение сигнал/шум (ОСШ) для одного СШПС последовательности с единичной амплитудой.

Согласно определению [3], оценка максимального правдоподобия (ОМП) дальности стабильной цели запишется как

$$\hat{R} = \arg\sup L(R),\ R \in [R_{\min}, R_{\max}]. \qquad (6)$$

Для расчета характеристик ОМП (6), подставим в (5) реализацию наблюдаемых данных и преобразуем к виду [3]

$$L(R) = z^2 S(R, R_0) + z\,N(R) - z^2/2. \qquad (7)$$

Здесь

$$S(R, R_0) = \frac{2}{N_0 \tilde{z}^2} \int_0^T s_1[t - 2R/c]\, s_1[t - 2R_0/c]\,dt = \Psi[2(R - R_0)/c], \qquad (8)$$

$$z^2 = \sum_{k=0}^{N-1} z_k^2 \qquad (9)$$

— суммарное ОСШ для всей последовательности (3), $z_k^2 = a_{0k}^2 \tilde{z}^2$ — ОСШ для k-го СШПС,

$$N(R) = \sum_{k=0}^{N-1} z_k N_k(R)/z, \qquad (10)$$

$$N_k(R) = 2\int_0^T n(t)\, s_1[t - (k - \mu)\theta - 2R/c]\,dt / N_0 \tilde{z} \qquad (11)$$

— реализации стационарных гауссовских процессов, два первых момента которых

$$\langle N_k(R)\rangle = 0,\ \langle N_k(R_1) N_i(R_2)\rangle = 0,\ k \neq i,$$

$$\langle N_k(R_1) N_k(R_2)\rangle = S(R_1, R_2). \qquad (12)$$

Используя (12), для гауссовского стационарного процесса (10) находим

$$\langle N(R)\rangle = 0,\ \langle N(R_1) N(R_2)\rangle = S(R_1, R_2). \qquad (13)$$

Формулы (7), (8), (12), (13) получены в предположении, что априорный интервал возможных значений дальности (2) не превосходит интервала однозначного измерения дальности [4], и, следовательно, $R_{max} - R_{min} < c\,\theta / 2$.

Обозначим ΔR — длительность сигнальной функции (8), так что $S(R_0 \pm \Delta R, R_0) \simeq 0$. Тогда в (7) сигнальная функция отлична от нуля лишь при

$$R \in R_s = [\,R_0 - \Delta R\,,\, R_0 + \Delta R\,]. \qquad (14)$$

При выполнении (14) ОМП дальности будем называть надежной [3]. Полагаем далее, что суммарное ОСШ (9) для всей последовательности (3) достаточно велико, и надежная ОМП обладает высокой апостериорной точностью [5]. Тогда необходимо исследовать поведение логарифма ФОП в малой окрестности истинного значения дальности R_0 [3]. Учитывая (4) для (8) при $|R - R_0| \to 0$ имеем: $S(R, R_0) = 1 - 2\delta\,|R - R_0|/c + o(|R - R_0|)$. Аналогичным образом можем записать для (13) при $|R_1 - R_2| \to 0$, что $< N(R_1)\,N(R_2) > = 1 - 2\delta\,|R_1 - R_2|/c + o(|R_1 - R_2|)$.

Положим теперь, что ОМП дальности является аномальной [3], т. е.

$$R \in R_N = \left\{ [R_{min}\,, R_0 - \Delta R\,]\,,\, [R_0 + \Delta R\,, R_{max}\,] \right\}. \qquad (15)$$

При $R \in R_N$ сигнальная функция $S(R, R_0) \simeq 0$ и (7) принимает вид: $L(R) = z\,N(R) - z^2/2$. Согласно (8), (13) шумовая функция $N(R)$ представляет собой реализацию стационарного гауссовского случайного процесса. Положим далее, что априорный интервал возможных значений дальности (2) достаточно велик, так что

$$R_{max} - R_{min} >> \Delta R, \qquad (16)$$

а значение неизвестной дальности R_0 распределено равномерно в априорном интервале (2). Установленные свойства логарифма ФОП (7) позволяют записать асимптотическое выражение для безусловного рассеяния (среднего квадрата ошибки) ОМП дальности стабильной цели. Действительно, применяя метод локально-марковской аппроксимации [5], получаем

$$V(\hat{R}) = < (\hat{R} - R_0)^2 > \simeq (1 - P_a)\,D(\hat{R}) + P_a\,(R_{max} - R_{min})^2 / 6. \qquad (17)$$

Здесь вероятность аномальной ошибки

$$P_a = P\,[\,\hat{R} \in R_N\,] = 2\exp\left(\frac{3z^2}{2}\right) \int\limits_1^{\infty} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{mx}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2} \right) \right] \right\} \times$$

ISSN 0021—3470. Радиоэлектроника. 1999. № 7.

$$\times \left[\exp(-z\,x)\,\Phi(x-2z) - \exp\left(\frac{5z^2}{2} - 2z\,x\right)\Phi(x-3z) \right] dx\,,$$

$$\Phi(x) = \int\limits_{-\infty}^{x} \exp(-t^2/2)\,dt/\sqrt{2}\pi$$

— интеграл вероятности, $m = 2\delta\,(R_{\max} - R_{\min})/c$, а дисперсия надежной оценки

$$D(\hat{R}) = 13c^2/8\,\delta^2 z^4. \tag{18}$$

Точность формулы (17) возрастает с увеличением m и z [5]. Отметим, что в отличие от регулярного случая [4], когда дисперсия надежной ОМП дальности убывает как z^{-2}, при зондировании разрывными СШПС дисперсия надежной ОМП (18) убывает как z^{-4}.

Положим далее, что цель является медленно флуктуирующей, так что ее характеристики практически не изменяются за время облучения последовательностью (1). Тогда рассеянный целью сигнал имеет вид

$$s_N(t, R_0, a_0) = a_0 \sum_{k=0}^{N-1} s_1\,[t - (k-\mu)\,\theta - 2R_0/c\,], \tag{19}$$

где a_0 — неизвестная амплитуда принимаемого сигнала. Логарифм ФОП для последовательности (19), аналогично (5), определяется выражением

$$L(R, a) = a \sum_{k=0}^{N-1} L_k(R) - a^2 N\,\tilde{z}^{2}/2. \tag{20}$$

Для того, чтобы исключить влияние неизвестной амплитуды, заменим ее значение на ОМП [3]. Максимизируя с этой целью (20) по a, имеем

$$L_a(R) = \sup_{a} L(R, a) = \left[\sum_{k=0}^{N-1} L_k(R) \right]^2 / 2N\,\tilde{z}^{2}. \tag{21}$$

В результате, аналогично (6), ОМП $\hat{R}_a$ дальности медленно флуктуирующей цели определяется по положению наибольшего максимума функционала (21).

Для расчета характеристик ОМП дальности медленно флуктуирующей цели подставим в (21) реализацию наблюдаемых данных $x(t) = s_N(t, R_0, a_0) + n(t)$ и преобразуем к виду

$$L_a(R) = [z\,S(R, R_0) + N(R)]^2 / 2. \tag{22}$$

Здесь $N(R) = \sum_{k=0}^{N-1} N_k(R) / N$ — гауссовский стационарный случайный процесс, два первых момента которого определяются из (13), $z^2 = a_0^2 N \tilde{z}^2$ — суммарное ОСШ (9) для принимаемой последовательности (19), а $S(R, R_0)$ определено в (8).

Для расчета характеристик надежной ОМП (14), аналогично (7) представим (22) как

$$L_a(R) = S_a(R, R_0) + N_a(R) + 1/2.$$

Здесь

$$S_a(R, R_0) = z^2 S^2(R, R_0) / 2 \tag{23}$$

— сигнальная функция, а негауссовская шумовая функция $N_a(R) = L_a(R) - \langle L_a(R) \rangle$ центрирована и обладает корреляционной функцией

$$B_a(R_1, R_2) = \langle N_a(R_1)\, N_a(R_2) \rangle = z^2 S(R_1, R_2)\, S(R_1, R_0) \times$$
$$\times S(R_2, R_0) + S^2(R_1, R_2) / 2. \tag{24}$$

Сигнальные функции (8) и 23) достигают максимума при $R = R_0$. Следовательно, выходное ОСШ для всей последовательности (19) будет равна [3]

$$z_{Na}^2 = S_a^2(R_0 . R_0) / B_a(R_0, R_0) = z^4 / 2\,(1 + 2z^2). \tag{25}$$

Если суммарное ОСШ z^2 для последовательности (19) достаточно велико, то (25) можно приближенно переписать как

$$z_{Na}^2 \simeq z^2 / 4. \tag{26}$$

Полагаем далее, что выходное ОСШ (25), (26) для последовательности (19) достаточно велико, так что надежная ОМП (14) обладает высокой апостериорной точностью. Обозначим

$$\Delta = \max\{|R_1 - R_0|, |R_2 - R_0|, |R - R_0|, |R_1 - R_2|\}. \tag{27}$$

Устремляя $\Delta \to 0$, получаем, что в малой окрестности R_0 справедливы асимптотические разложения: $S_a(R, R_0) = z^2 (1/2 - 2\delta\,|R - R_0| / c) + o(\Delta)$; $B_a(R_1, R_2) = z^2\ \{1 - 4\delta\,[\,|R_1 - R_2| + \min(|R_1 - R_0|, |R_2 - R_0|)] / c\} + o(\Delta)$, если $(R_1 - R_0)(R_2 - R_0) \geq 0$ и $B_a(R_1, R_2) = z^2 (1 - 4\delta\,|R_1 - R_2| / c) + o(\Delta)$, если $(R_1 - R_0)(R_2 - R_0) < 0$. Отметим, что при $R = R_0$ логарифм ФОП (22) обладает плотностью вероятности [5]

$$W_{0\,a}(L) = \exp(-L - z^2/2)\,\mathrm{ch}(z\sqrt{2L})(\pi L)^{-1/2}.$$

Пусть теперь ОМП $\hat{R}_a$ является аномальной [3]. При $R \in R_N$ (15), $S(R, R_0) \simeq 0$ и (22) принимает вид

$$L_a(R) = N^2(R)/2. \tag{28}$$

Согласно (8), (13) шумовая функция $N(R)$ представляет собой реализацию стационарного гауссовского случайного процесса. Следовательно, при $R \in R_N$ логарифм ФОП (28) представляет собой реализацию стационарного случайного процесса с плотностью вероятности [5]: $W_{N\,a}(L) = \exp(-L)/\sqrt{\pi L}$ и корреляционной функцией, которую получаем, положив в (24) $S(R_i, R_0) \simeq 0$, $i = 1, 2$

$$B_{N\,a}(R_1, R_2) = S^2(R_1, R_2)/2. \tag{29}$$

Из (4), (8) находим асимптотическое представление для (29) при

$$|R_1 - R_2| \to 0 : B_{N\,a}(R_1, R_2) = 1/2 - 2\delta\,|R_1 - R_2|\,/c + o(|R_1 - R_2|).$$

Установленные свойства логарифма ФОП (21) позволяют при выполнении (16) и достаточно большом ОСШ (25) записать безусловное рассеяние ОМП дальности медленно флуктуирующей цели в виде (17). Необходимо лишь в эту формулу подставить вероятность P_{a1} аномальной ошибки для медленно флуктуирующей цели. Применяя метод локально-марковской аппроксимации [5], имеем

$$P_{a1} = \frac{2m}{\pi}\int\limits_1^\infty dy \int\limits_0^y (y^2 - 1)\left[1 - \exp\left(-\frac{y^2 - x^2}{2}\right)\right]^2 \times$$
$$\times \left[-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{2} - m\,y\sqrt{\frac{2}{\pi}}\exp\left(-\frac{y^2}{2}\right)\right]\mathrm{ch}(x z)\,dx. \tag{30}$$

Дисперсия надежной ОМП дальности медленно флуктуирующей цели $D(\hat{R}_a) = D(\hat{R})$, т. е. совпадает с дисперсией ОМП дальности стабильной цели (18). Таким образом, наличие у цели медленных флуктуаций не изменяет дисперсии надежной ОМП дальности, но приводит к увеличению вероятности аномальной ошибки (30).

Найдем теперь характеристики ОМП дальности при зондировании последовательностью (1) быстро флуктуирующей цели. Тогда характеристики цели практически не изменяются за время, равное длительности одного СШПС последовательности (1), но могут существенно изменяться от одного к другому СШПС последовательности, т. е. за период следования зондирующей последовательности. В результате неизвестные амплитуды имеют различные значения для разных СШПС последовательности, рассеянной быстро флуктуирующей целью. Соответственно, рассеянный быстро флуктуирующей целью сигнал имеет вид (3), где теперь a_{0k} — истинное значение априори неизвестной амплитуды a_k, $k=\overline{0, N-1}$. Аналогично (5), логарифм ФОП определяется выражением

$$L(R, a_k) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k [L_k(R) - a_k \tilde{z}^2 / 2]. \tag{31}$$

Для того, чтобы исключить влияние неизвестных амплитуд последовательности (3), заменим их значения на ОМП [3]. Максимизируя с этой целью (31) по всем a_k, $k=\overline{0, N-1}$, имеем

$$L_f(R) = \sup_{a_k} L(R, a_k) = \sum_{k=0}^{N-1} L_k^2(R) / 2\tilde{z}^2. \tag{32}$$

В результате, аналогично (6), ОМП $\hat{R}_f$ дальности быстро флуктуирующей цели определяется по положению наибольшего максимума функционала (32).

Для расчета характеристик ОМП подставим в (32) реализацию наблюдаемых данных и преобразуем к виду

$$L_f(R) = \sum_{k=0}^{N-1} [z_k S(R, R_0) + N_k(R)]^2 / 2, \tag{33}$$

где обозначения соответствуют (8), (9), (11).

Полагая, что выполняется (14), представим (33) в виде

$$L_f(R) = S_f(R, R_0) + N_f(R) + N/2,$$

где сигнальная функция

$$S_f(R, R_0) = z^2 S^2(R, R_0) / 2, \tag{34}$$

а шумовая функция $N_f(R)$ центрирована и обладает корреляционной функцией

$$B_f(R_1, R_2) = z^2 S(R_1, R_2) S(R_1, R_2) S(R_2, R_0) + N S^2(R_1, R_2)/2. \quad (35)$$

Сигнальная функция (34) достигает максимума при $R = R_0$. Следовательно, выходное ОСШ для всей последовательности, рассеянной быстро флуктуирующей целью будет равно [3]

$$z_{Nf}^2 = S_f^2(R_0, R_0) / B_f(R_0, R_0) = z^4 / 2(N + 2z^2) = z^2 z_m^2 / 2(1 + 2z_m^2), \quad (36)$$

$$z_m^2 = z^2 / N = \sum_{k=0}^{N-1} z_k^2 / N \quad (37)$$

— среднее ОСШ для одного СШПС последовательности (3). Согласно (36) выходное ОСШ для всей последовательности существенно зависит от среднего ОСШ для одного СШПС (37). Так, при $z_m^2 >> 1$ имеем $z_{Nf}^2 \simeq z^2/4$, что совпадает с выходным ОСШ (26) при медленных флуктуациях цели. Соответственно, если $z_m^2 << 1$, то $z_{Nf}^2 \simeq z^2 z_m^2 / 2$ и, следовательно, выходное ОСШ для быстро флуктуирующей цели будет существенно меньше, чем для медленно флуктуирующей.

Полагаем далее, что выходное ОСШ (36) достаточно велико при любых z_m^2 (37) и надежная ОМП дальности (14) быстро флуктуирующей цели обладает высокой апостериорной точностью. Тогда необходимо исследовать поведение логарифма ФОП (32) в малой окрестности максимума сигнальной функции (34). Полагая что величина (27) $\Delta \to 0$, получаем, учитывая (4), (8), асимптотические разложения для (34) и (35) в малой окрестности R_0:

$$S_f(R, R_0) = z^2 (1/2 - 2\delta |R - R_0| / c) + o(\Delta),$$

$$B_f(R_1, R_2) = \frac{N + 2z^2}{2} \times$$

$$\times \left[1 - \frac{4\delta}{c} |R_1 - R_2| - \frac{8z^2\delta}{c(N + 2z^2)} \min(|R_1 - R_0|, |R_2 - R_0|) \right] + o(\Delta),$$

если $(R_1 - R_0)(R_2 - R_0) \geq 0$ и

$$B_f(R_1, R_2) = \frac{N + 2z^2}{2} \left(1 - \frac{4\delta}{c} |R_1 - R_2|\right) + o(\Delta),$$

если $(R_1 - R_0)(R_2 - R_0) < 0$. Отметим, что при $R = R_0$ логарифм ФОП (32) обладает плотностью вероятности [5]

$$W_{0f}(L) = \left(\frac{2L}{z^2}\right)^{(N-2)/4} \exp\left(-L - \frac{z^2}{2}\right) I_{N/2-1}\left(z\sqrt{2L}\right),$$

где $I_\nu(\cdot)$ — функция Бесселя мнимого аргумента, порядка ν.

Положим теперь, что ОМП $\hat{R}_f \in R_N$ (15), т. е. является аномальной [3]. При $R \in R_N$, $S(R, R_0) \simeq 0$ и (33) принимает вид

$$L_f(R) = \sum_{k=0}^{N-1} N_k^2(R)/2. \tag{38}$$

Согласно (11), (12) шумовые функции $N_k(R)$ представляют собой реализации статистически независимых стационарных гауссовских случайных процессов. Следовательно, при $R \in R_N$ логарифм ФОП (38) представляет собой реализацию стационарного случайного процесса с плотностью вероятности [5]:

$$W_{Nf}(L) = L^{N/2-1} \exp(-L) / \Gamma(N/2),$$

где $\Gamma(\cdot)$ — гамма-функция. Корреляционную функцию для логарифма ФОП (38) легко получить из (35), положив $S(R, R_0) \simeq 0$, $i = 1, 2$,

$$B_{Nf}(R_1, R_2) = N S^2(R_1, R_2)/2. \tag{39}$$

Из (4), (8) находим асимптотическое представление для (39) при $|R_1 - R_2| \to 0$: $B_{Nf}(R_1, R_2) = N(1/2 - 2\delta |R_1 - R_2|/c) + o(|R_1 - R_2|)$.

Установленные свойства логарифма ФОП (32) позволяют при выполнении (20) и достаточно большом ОСШ (36) записать безусловное рассеяние ОМП дальности быстро флуктуирующей цели в виде (17). Необходимо лишь в эту формулу подставить вероятность аномальной ошибки P_{a2} и дисперсию $D(\hat{R}_f)$ надежной оценки дальности для быстро флуктуирующей цели. Используя метод локально-марковской аппроксимации [5], имеем

$$P_{a2} = \frac{m}{\Gamma(N/2)(2z)^{N/2-1}} \int_{\sqrt{N}}^{\infty} dy \int_0^y x^{N/2} y^{N-1} (y^2 - N) \times$$

$$\times \left\{1 - \exp\left[-\frac{z^2(y^2 - x^2)}{2(N + z^2)}\right]\right\}^2 \exp\left[-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{2} - \frac{m\, y^N}{\Gamma(N/2)\, 2^{N/2-1}} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right)\right] \times$$

$$\times I_{N/2-1}(xz)\, dx, \tag{40}$$

$$D(\hat{R}_f) = \frac{13c^2 (N + z^2)^2}{8 z^8 \delta^2} = \frac{13c^2 (1 + 1/z_m^2)^2}{8 z^4 \delta^2 \, z_m^4}. \qquad (41)$$

Из сравнения (18) и (41) следует, что наличие быстрых флуктуаций цели в общем случае приводит (при равных суммарных ОСШ для рассеянных последовательностей) к увеличению дисперсии надежной ОМП дальности в $(1 + z_m^2)^2 / z_m^4$ раз. Когда $z_m^2 << 1$ этот проигрыш в точности ОМП может быть значительным. Очевидно, формулы (17), (40), (41) при $z_m^2 << 1$ можно использовать только, если $z^2 = N z_m^2 >> 1$, т. е. когда число СШПС в последовательности (1) велико. При небольшом числе СШПС (в частности, если $N = 1$) в силу условия $z^2 >> 1$ имеем, что $z_m^2 >> 1$. В этом случае (41) совпадает с (18) и потери в точности надежной оценки дальности вследствие быстрых флуктуаций цели отсутствует. Сопоставляя вероятности аномальной ошибки (30) и (40) в тех же условиях, получаем, что наличие быстрых флуктуаций цели приводит в общем случае к увеличению уровня аномальных ошибок. При большом числе N СШПС в зондирующей последовательности (1) и малых значениях z_m^2 (37) проигрыш в эффективности оценки дальности может быть значительным. Тем не менее этот проигрыш может быть снижен посредством уменьшения числа N СШПС зондирующей последовательности. Естественно, это возможно лишь при соответствующем ослаблении ограничений на пиковую мощность зондирующего сигнала. В частности, если возможно использование вырожденной зондирующей последовательности, состоящей из одного СШПС ($N = 1$), то проигрыш в эффективности ОМП дальности вследствие быстрых флуктуаций цели отсутствует.

Найденные асимптотически точные (с ростом ОСШ и числа элементов разрешения по дальности) выражения для рассеяния ОМП дальности с учетом аномальных ошибок, позволяют определить потери в точности оценки вследствие флуктуаций цели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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

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

3. *Куликов Е. И., Трифонов А. П.* Оценка параметров сигналов на фоне помех.— М. : Сов. радио, 1978.— 296 с.

4. *Трифонов А. П., Беспалова М. Б.* Эффективность сверхширокополосного обнаружения и измерения дальности м скорости цели // Радиотехника и электроника.— 1997.— Т. 42.— № 4.— С. 451—456.

5. *Трифонов А. П., Шинаков Ю. С.* Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех.— М. : Радио и связь, 1986.— 264 с.

6. *Трифонов А. П., Беспалова М. Б.* Характеристики оценок временного положения и периода следования разрывных импульсов при наличии неинформативных параметров // Радиотехника и электроника, 1996.— Т. 41.— № 10.— С. 1215—1221.

Воронежский государственный университет. Поступила в редакцию 30.06.98.

УДК 537.86:519.2

КОСТЫЛЕВ В. И.

ТОЧНОСТЬ ОЦЕНКИ ДАЛЬНОСТИ И РАЗМЕРА ОБЪЕКТА В МНОГОКАНАЛЬНОЙ СОГЛАСОВАННОЙ СИСТЕМЕ

Рассмотрены потенциальные возможности измерения дальности и размера по дальности протяженного объекта в многоканальной радиотехнической системе, согласованной с сигналом, отраженным от точечного объекта. Получены выражения для дисперсий оценок при оптимальной обработке выходных эффектов каналов.

Многоканальная система пространственно-временной обработки [1], согласованная с сигналом, создаваемым малоразмерным (точечным) объектом, является квазиоптимальной при получении радиолокационного изображения протяженного объекта по результатам измерения электромагнитного поля объекта на ограниченной апертуре [2, 3]. В [4—6] показана высокая эффективность такой системы при обнаружении протяженных по дальности объектов, в [6, 7] многоканальная согласованная система рекомендуется для классификации протяженных по дальности целей. Представляет интерес проанализировать возможности оценки дальности до центра и размера наблюдаемого протяженного по дальности объекта в такой системе обработки.

Целью работы является определение потенциальной точности измерения дальности и размера объекта при многоканальном согласованном приеме с последующей оптимальной (в смысле критерия максимального правдоподобия) обработкой выходных эффектов всех каналов.

Пусть объект облучается узкополосным зондирующим сигналом

$$S_0(t) = \sqrt{E_0}\ \mathrm{Re}\,\{\dot U(t)\exp(j\,2\pi f_0\, t)\}\,p\,(t/\tau_S),$$

где E_0 — энергия сигнала $S_0(t)$, f_0 — центральная частота, τ_S — длительность импульса, $\dot U(t)$ — нормированная (условие нормировки $\int_{-\infty}^{\infty} |\,\dot U(t)\,|^2\,dt = 1$) комплексная огибающая, $p(u) = \begin{cases} 1, & |\,u\,| \le 0{,}5; \\ 0, & |\,u\,| > 0{,}5. \end{cases}$