

298

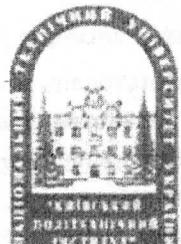
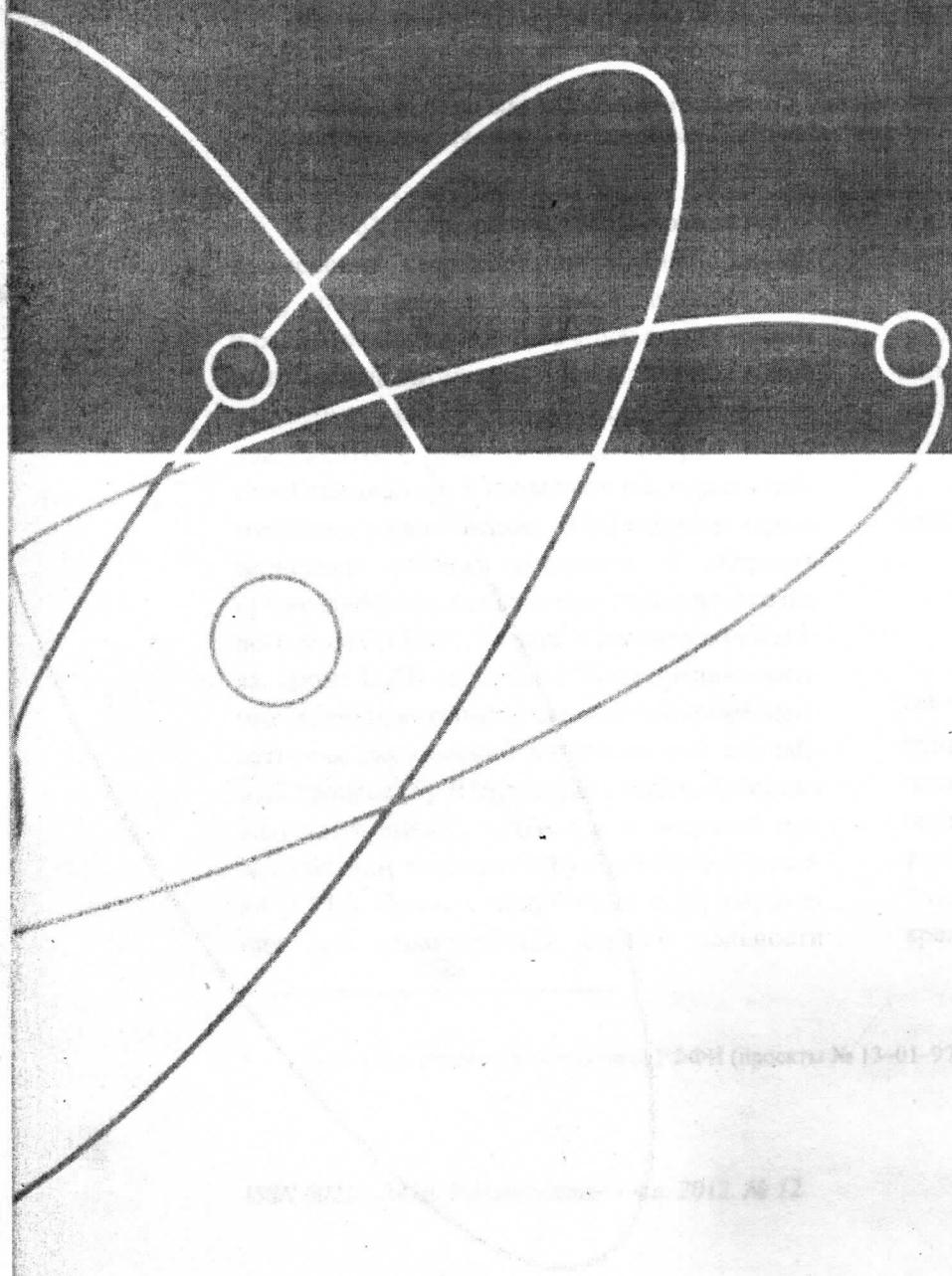
298

Том 55, № 12  
декабрь 2012

ISSN 0021-3470

# РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

ИЗВЕСТИЯ  
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ  
ЗАВЕДЕНИЙ



ИЗДАНИЕ  
НАЦИОНАЛЬНОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА  
УКРАИНЫ  
«КИЕВСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ»

2011 (проект) № 13-01-97704

ISSN 0021-3470 (print) ISSN 1608-9189 (online) 2012 № 12

УДК 621.391.16

ТРИФОНОВ А. П., БЕСПАЛОВА М. Б., ТРИФОНОВ П. А.

## ВЛИЯНИЕ УЗКОПОЛОСНОЙ ПОМЕХИ НА ПОРОГОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОЦЕНОК ДАЛЬНОСТИ И СКОРОСТИ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСОВ\*

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

**Аннотация.** Найдены пороговые характеристики двух алгоритмов оценки дальности и скорости при воздействии гауссовской узкополосной помехи

**Abstract.** Threshold characteristics of two algorithms for the range and velocity estimation under exposure to the Gaussian narrowband interference have been found

**Ключевые слова:** оценка дальности и скорости, узкополосная помеха, пороговые характеристики оценок, range and velocity estimation, narrowband interference, threshold estimate characteristics

В [1–6] и др. рассмотрены возможности применения сверхкоротких (субнаносекундных) импульсов и их последовательностей в радиолокации. Короткоимпульсные сигналы и их последовательности представляют собой частный случай сверхширокополосных сигналов (СШПС), использование которых имеет свою специфику и позволяет расширить возможности радиолокации. В [4] найдены характеристики оценок дальности и скорости при воздействии помех в виде гауссовского белого шума (ГБШ). Однако в реальных условиях, кроме ГБШ часто действуют преднамеренные помехи, которые возможно интерпретировать как гауссовский узкополосный случайный процесс [5]. В [6] найдены характеристики надежных оценок дальности и скорости при воздействии гауссовской узкополосной помехи (ГУП). Однако, полученные в [6] выражения для характеристик оценок дальности

и скорости могут быть использованы только в условиях высокой апостериорной точности, когда отсутствуют аномальные ошибки и влияние пороговых эффектов пренебрежимо мало [7, 8]. В связи с этим в статье рассмотрены пороговые свойства оценок дальности и скорости при воздействии как ГБШ так и ГУП.

Аналогично [4] зондирующую последовательность СШПС запишем в виде

$$\tilde{s}_N(t) = \sum_{k=0}^{N-1} s_0[t - (k - \mu)\theta - \varepsilon] \quad (1)$$

где функция  $s_0(\cdot)$  описывает форму одного импульса,  $\theta$  — период следования,  $\varepsilon$  — временное положение последовательности. Параметр  $\mu$  определяет точку последовательности (1), с которой связано ее временное положение. Так, при  $\mu = 0$  величина  $\varepsilon$  представляет собой временное положение первого импульса по-

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 13–01–97504 и № 13–08–00735).

следовательности, при  $\mu = (N - 1) / 2$  — временное положение середины последовательности, при  $\mu = N - 1$  — временное положение последнего импульса последовательности.

Полагаем, что цель, зондируемая последовательностью (1), находится на расстоянии  $R_0$  и движется с радиальной скоростью  $V_0$ . Незвестные дальность  $R_0$  и скорость  $V_0$  цели принимают значения из априорной области  $W = \{[R_{\min}; R_{\max}], [-V_{\max} / 2; V_{\max} / 2]\}$  так что

$$R_0 \in [R_{\min}; R_{\max}], \quad V_0 \in [-V_{\max} / 2; V_{\max} / 2],$$

$$V_{\max} \ll c, \quad (2)$$

где  $c$  — скорость света. Тогда принимаемый сигнал возможно записать как [4]

$$s(t, R_0, V_0) =$$

$$= \sum_{k=0}^{N-1} s[t - 2R_0 / c - (k - \mu)\theta(1 + 2V_0 / c)]. \quad (3)$$

Функция  $s(\cdot)$  описывает форму одного принимаемого СШПС и в общем случае отличается от  $s_0(\cdot)$  в (1) [4].

При воздействии ГБШ и ГУП на интервале времени  $[0; T]$  наблюдается реализация

$$x(t) = s(t, R_0, V_0) + n(t) + y(t), \quad (4)$$

где  $n(t)$  — центрированный ГБШ с односторонней спектральной плотностью  $N_0$ ,  $y(t)$  — центрированная ГУП, обладающая корреляционной функцией  $K_y(\tau) = \langle y(t)y(t+\tau) \rangle$ . Процессы  $n(t)$  и  $y(t)$  предполагаются статистически независимыми.

Положим вначале, что корреляционная функция ГУП априори неизвестна. В этом случае для оценки дальности и скорости предлагается использовать алгоритм максимального правдоподобия, синтезированный при условии, что ГУП отсутствует. Пусть скважность последовательности (3) достаточно велика, так что отдельные импульсы не перекрываются и интервал наблюдения  $[0; T]$  больше длитель-

ности всей последовательности, т.е.  $T > N\theta$ . Тогда, при воздействии только ГБШ, логарифм функционала отношения правдоподобия, опуская несущественное слагаемое, возможно записать в виде [4, 6, 7]

$$L_1(R, V) = \frac{2}{N_0} \times$$

$$\times \sum_{k=0}^{N-1} \int_0^T x(t) s[t - 2R / c - (k - \mu)\theta(1 + 2V / c)] dt. \quad (5)$$

Реализация наблюдаемых данных  $x(t)$  (4), кроме ГБШ  $n(t)$  содержит ГУП  $y(t)$ . Следовательно оценки

$$(\hat{R}_1, \hat{V}_1) = \operatorname{argsup} L_1(R, V), \quad (R, V) \in W \quad (6)$$

не являются оценками максимального правдоподобия (ОМП). Эти оценки можно назвать квазиправдоподобными оценками (КПО) [9], поскольку они совпадают с ОМП при  $y(t) \equiv 0$ , т.е. в отсутствие ГУП.

Для определения характеристик КПО (6) представим (5) в виде суммы сигнальной и шумовой функций [7, 8]:

$$L_1(R, V) = S_1(R, R_0, V, V_0) + N_1(R, V).$$

Здесь сигнальная функция

$$S_1(R, R_0, V, V_0) = \frac{2}{N_0} \times$$

$$\times \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \int_0^T s[t - 2R_0 / c - (k - \mu)\theta(1 + 2V_0 / c)] \times$$

$$\times s[t - 2R / c - (n - \mu)\theta(1 + 2V / c)] dt, \quad (7)$$

а шумовая функция

$$N_1(R, V) = L_1(R, V) - \langle L_1(R, V) \rangle$$

является реализацией гауссовского случайного поля. Первые два момента шумовой функции имеют вид

$$\langle N_1(R, V) \rangle = 0,$$

$$\begin{aligned} K_1(R_1, R_2, V_1, V_2) &= \langle N_1(R_1, V_1) N_1(R_2, V_2) \rangle = \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \frac{2}{N_0} \int_0^T s[t-2R_1/c - (k-\mu)\theta(1+2V_1/c)] \right. \\ &\quad \times s[t-2R_2/c - (n-\mu)\theta(1+2V_2/c)] dt + \frac{4}{N_0^2} \times \\ &\quad \left. \int_0^T \int_0^T K_y(t_2-t_1) s[t_1-2R_1/c - (k-\mu)\theta(1+2V_1/c)] \right. \\ &\quad \left. \times s[t_2-2R_2/c - (n-\mu)\theta(1+2V_2/c)] dt_1 dt_2 \right\}. \quad (8) \end{aligned}$$

Поскольку предполагается  $T > N\theta$ , так что вся принимаемая последовательность (3) размещается внутри интервала наблюдения, пределы интегрирования в (7), (8) возможно заменить на бесконечные. В результате получаем

$$\begin{aligned} S_1(R, R_0, V, V_0) &= \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} S_f \{ 2(R-R_0)/c + \\ &\quad + (n-k)\theta + 2\theta[nV - kV_0 - \mu(V-V_0)]/c \}, \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_1(R_1, R_2, V_1, V_2) &= \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} K_H \{ 2(R_2-R_1)/c + \\ &\quad + (n-k)\theta + 2\theta[nV_2 - kV_1 - \mu(V_2-V_1)]/c \}, \quad (10) \end{aligned}$$

где  $S_f(\tau) = \frac{2}{N_0} \int_{-\infty}^{\infty} s(t)s(t-\tau)dt$  — сигнальная

функция (функция неопределенности) [7, 8] для одиночного СШПС последовательности (3),

$$\begin{aligned} K_H(\eta) &= S_f(\eta) + \\ &\quad + \frac{4}{N_0^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_y(t_2-t_1+\eta) s(t_1)s(t_2) dt_1 dt_2. \end{aligned}$$

Обозначим  $\tau_s$  — длительность одного импульса последовательности (3),  $\tau_y$  — время корреляции ГУП, так что  $S_f(\pm\tau_s) \cong 0$  и  $K_y(\pm\tau_y) \cong 0$ . Ограничимся рассмотрением центральных пиков сигнальной (9) и корреляционной (10) функций, положив, что кроме (2) выполняется условие

$$\max\{|R-R_0|, |R_1-R_2|\} \leq c\theta/2. \quad (11)$$

Пусть скважность принимаемой последовательности СШПС (3) достаточно велика, так что

$$\tau_s \ll \theta, \quad \tau_y \ll \theta. \quad (12)$$

Тогда, при выполнении (2), (11), (12) функции (9), (10) принимают вид [2, 6]

$$\begin{aligned} S_1(R, R_0, V, V_0) &= \quad (13) \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} S_f [2(R-R_0)/c + 2\theta(k-\mu)(V-V_0)/c], \\ K_1(R_1, R_2, V_1, V_2) &= \quad (14) \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} K_H [2(R_2-R_1)/c + 2\theta(k-\mu)(V_2-V_1)/c]. \end{aligned}$$

Из последнего выражения следует, что шумовая функция является реализацией однородного гауссовского поля.

Очевидно [7], сигнальная функция (13) достигает максимума при  $R=R_0, V=V_0$ . Поэтому отношение сигнал-шум (ОСШ) [7] возможно записать как

$$z_1^2 = S_1^2(R_0, R_0, V_0, V_0) / K_1(R_0, R_0, V_0, V_0). \quad (15)$$

Подставляя в (15) значения функций (13), (14) получаем для ОСШ

$$z_1^2 = z^2 / \chi_1 = Nz_0^2 / \chi_1, \quad (16)$$

где  $z^2 = Nz_0^2$  — ОСШ на выходе приемника максимального правдоподобия при отсутствии ГУП,  $z_0^2 = 2E / N_0$  — ОСШ для одного СШПС при отсутствии ГУП,  $E = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t)dt$  — энергия одного СШПС последовательности (3). Величина  $\chi_1$  в (16) показывает во сколько раз уменьшается ОСШ вследствие воздействия ГУП и определяется выражением:

$$\chi_1 = 1 + \frac{\frac{2}{N_0} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_y(t_2 - t_1) s(t_1) s(t_2) dt_1 dt_2}{\int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt}$$

Обозначим через  $\Delta R_1$  и  $\Delta V_1$  длительность (протяженность) сигнальной функции (13) по соответствующим аргументам. Тогда

$$S_1(R_0 \pm \Delta R_1, R_0, V_0, V_0) \cong 0,$$

$$S_1(R_0, R_0, V_0 \pm \Delta V_1, V_0) \cong 0$$

и очевидно,

$$S_1(R_0 \pm \Delta R_1, R_0, V_0 \pm \Delta V_1, V_0) \cong 0.$$

Выделим в области  $W$  (2) возможных значений дальности и скорости сигнальную подобласть

$$W_S = \{ [R_0 - \Delta R_1; R_0 + \Delta R_1], [V_0 - \Delta V_1; V_0 + \Delta V_1] \}, \quad (17)$$

в которой сигнальная функция (13) отлична от нуля. Если

$$(\hat{R}_1, \hat{V}_1) \in W_S, \quad (18)$$

то КПО (6) являются надежными [7, 8].

Для случая надежных КПО (6) в [6] найдены их дисперсии

$$D_1(R) = \langle (\hat{R}_1 - R_0)^2 \rangle = D_0(R) \kappa_1,$$

$$D_1(V) = \langle (\hat{V}_1 - V_0)^2 \rangle = D_0(V) \kappa_1, \quad (19)$$

где

$$D_0(R) = \frac{c^2 N_0 \left( N^2 - 1 + 12 \left[ (N-1) / 2 - \mu \right]^2 \right)}{8 F_0 N (N^2 - 1)}, \quad (20)$$

$$D_0(V) = 3c^2 N_0 / 2\theta^2 F_0 N (N^2 - 1) \quad (21)$$

— дисперсии ОМП дальности и скорости при отсутствии ГУП [4],  $F_0 = \int_{-\infty}^{\infty} [ds(t) / dt] dt$ .

Величина

$$\kappa_1 = 1 + \frac{\frac{2}{N_0} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_y(t_2 - t_1) \frac{ds(t_1)}{dt_1} \frac{ds(t_2)}{dt_2} dt_1 dt_2}{F}$$

показывает проигрыш в точности надежной КПО (6) вследствие воздействия ГУП.

Если условие (18) не выполняется, возможно появление аномальных ошибок [7, 8], что приводит к резкому (пороговому) ухудшению точности КПО (6). Соответственно, дисперсия КПО становится значительно большей, чем следует из (19). Пороговые свойства КПО возможно характеризовать вероятностью надежной оценки [7]

$$P_{01} = P[(\hat{R}_1, \hat{V}_1) \in W_S] \quad (22)$$

Пусть  $W_N$  — дополнение области  $W_S$  (17) до области  $W$  (2), так, что  $W = W_S \cup W_N$ . Обозначим  $H_{1S} = \sup L_1(R, V), (R, V) \in W_S$  и  $H_{1N} = \sup L_1(R, V), (R, V) \in W_N$ . Поскольку КПО (6) определяются по положению абсолютного (наибольшего) максимума случайного поля (5), выражение (22) можно переписать как

$$P_{01} = P[H_{1N} < H_{1S}]. \quad (23)$$

Если априорная область возможных значений дальности и скорости (2) не слишком мала, так что

$$\Delta R_1 \ll R_{\max} - R_{\min}, \quad \Delta V_1 \ll V_{\max}, \quad (24)$$

тогда случайные величины  $H_{1S}$  и  $H_{1N}$  приближенно статистически независимы [7, 8]. Это позволяет представить (23) в виде

$$P_{01} = \int F_{1N}(x) dF_{1S}(x), \quad (25)$$

где  $F_{1N}(x)$  и  $F_{1S}(x)$  — функции распределения случайных величин  $H_{1S}$  и  $H_{1N}$  соответственно.

Используя результаты [2, 10] аппроксимации функций распределения  $F_{1N}(x)$  и  $F_{1S}(x)$  можем записать как (26), (27) (см. внизу с. 7).

В (27)  $\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \exp(-t^2/2) dt / \sqrt{2\pi}$  — интеграл вероятности,

$$\xi_0 = 2(R_{\max} - R_{\min})V_{\max} \theta d_0^2 \sqrt{N^2 - 1} / c^3 \sqrt{3}$$

— приведенная площадь [10] априорной области  $W$  возможных значений дальности и скорости при наличии только ГБШ [4],  $d_0^2 = F_0 / E$ .

Подставляя аппроксимации (26) и (27) в (25) находим приближенное выражение для вероятности надежной КПО (6) в виде (28) (см. внизу с. 7).

Точность этого выражения улучшается с ростом ОСШ и приведенной площади апри-

орной области возможных значений дальности и скорости.

Пусть неизвестные дальность  $R_0$  и скорость  $V_0$  распределены равномерно в априорной области  $W$  (2) их возможных значений. Тогда, аналогично [8], для безусловных рассеяний КПО (6) с учетом пороговых эффектов получаем выражения

$$B_1(R) = \langle (\hat{R}_1 - R_0)^2 \rangle = P_{01} D_0(R) \kappa_1 + (1 - P_{01}) (R_{\max} - R_{\min})^2 / 6, \quad (29)$$

$$B_1(V) = \langle (\hat{V}_1 - V_0)^2 \rangle = P_{01} D_0(V) \kappa_1 + (1 - P_{01}) V_{\max}^2 / 6. \quad (30)$$

Сопоставляя (29), (30) с (19) возможно определить, какой вклад в средний квадрат ошибки оценки вносят пороговые эффекты при воздействии ГУП. При  $\kappa_1 = \chi_1 = 1$  в (28)–(30) получим характеристики ОМП дальности и скорости в отсутствие ГУП [4]. В частности, сопоставляя (29), (30) с результатами [4] возможно определить влияние наличия ГУП на точность оценки дальности и скорости.

Формула (28) для вероятности надежной оценки КПО довольно громоздка и расчеты с ее использованием возможны только численными методами. Поэтому, аналогично [8], найдем относительно простое аналитическое выражение для вероятности аномальных ошибок

$$F_{1N}(x) \cong \begin{cases} \exp \left[ -\frac{x \xi_0 \kappa_1}{z_0 (2\pi \chi_1)^{3/2} \sqrt{N}} \exp \left( -\frac{x^2}{2N z_0^2 \chi_1} \right) \right], & x \geq z_0 \sqrt{N \chi_1}, \\ 0, & x < z_0 \sqrt{N \chi_1}. \end{cases} \quad (26)$$

$$F_{1S}(x) \cong \Phi \left( x / z_0 \sqrt{N \chi_1} - z_0 \sqrt{N / \chi_1} \right), \quad (27)$$

$$P_{01} \cong \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_1^\infty \exp \left[ -\frac{x \xi_0 \kappa_1}{\chi_1 (2\pi)^{3/2}} \exp \left( -\frac{x^2}{2} \right) - \frac{(x - z_0 \sqrt{N / \chi_1})^2}{2} \right] dx. \quad (28)$$

$P_{a1} = 1 - P_{01}$ , справедливое при достаточно больших ОСШ (16)

$$P_{a1} \cong \frac{\xi_0 z_0 \kappa_1 \sqrt{N}}{8(\pi\chi_1)^{3/2}} \exp\left(-\frac{z_0^2 N}{4\chi_1}\right). \quad (31)$$

Эта формула обладает удовлетворительной точностью при  $P_{a1} < 0,05 \dots 0,1$ . Полагая в (31)  $\kappa_1 = \chi_1 = 1$  получаем вероятность аномальной ошибки

$$P_a \cong \frac{\xi_0 z_0 \sqrt{N}}{8\pi^{3/2}} \exp\left(-\frac{z_0^2 N}{4}\right) \quad (32)$$

для ОМП дальности и скорости в отсутствие ГУП. Сопоставляя (31) и (32) находим

$$\alpha_1 = \frac{P_{a1}}{P_a} = \frac{\kappa_1}{\chi_1^{3/2}} \exp\left[\frac{z_0^2 N(\chi_1 - 1)}{4\chi_1}\right]. \quad (33)$$

Величина (33), показывает во сколько раз возрастает вероятность аномальной ошибки вследствие воздействия ГУП.

Наибольшую точность оценок дальности и скорости возможно обеспечить, если априори известна корреляционная функция  $K_y(\tau)$  ГУП. В этом случае логарифм функционала отношения правдоподобия, опуская несущественное слагаемое, можно записать как [7]

$$L_2(R, V) = \sum_{k=0}^{N-1} \int_0^T x(t) v[t - 2R/c - (k - \mu)\theta(1 + 2V/c)] dt, \quad (34)$$

где функция  $v(t)$  определяется из решения интегрального уравнения

$$N_0 v(t) / 2 + \int_0^T K_y(t - \tau) v(\tau) d\tau = s(t).$$

Соответственно, ОМП  $(\hat{R}_2, \hat{V}_2)$  дальности  $R_0$  и скорости  $V_0$  имеет вид

$$(\hat{R}_2, \hat{V}_2) = \operatorname{argsup} L_2(R, V), \quad (R, V) \in W. \quad (35)$$

Для определения характеристик ОМП (27) представим (34) в виде суммы сигнальной и шумовой функций [7]:

$$L_2(R, V) = S_2(R, R_0, V, V_0) + N_2(R, V).$$

Здесь при выполнении (2), (11), (12) сигнальная функция [6]:

$$S_2(R, R_0, V, V_0) = \sum_{k=0}^{N-1} \int_0^T s[t - 2R_0/c - (k - \mu)\theta(1 + 2V_0/c)] \times \\ \times v[t - 2R/c - (k - \mu)\theta(1 + 2V/c)] dt,$$

а корреляционная функция центрированной шумовой функции

$$K_2(R_1, R_2, V_1, V_2) = \langle N_2(R_1, V_1) N_2(R_2, V_2) \rangle = \\ = S_2(R_1, R_2, V_1, V_2).$$

Для алгоритма (34), (35) ОСШ можно записать

$$z_2^2 = S_2(R_0, R_0, V_0, V_0) = z^2 / \chi_2 = Nz_0^2 / \chi_2, \quad (36)$$

где  $z^2$  — ОСШ на выходе приемника максимального правдоподобия при отсутствии ГУП, а  $z_0^2$  — ОСШ для одного СШПС при отсутствии ГУП. Величина  $\chi_2$  в (36) показывает, во сколько раз уменьшается ОСШ вследствие воздействия ГУП с априори известной корреляционной функцией и определяется выражением:

$$\chi_2 = \frac{2}{N_0} \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt / \int_{-\infty}^{\infty} s(t) v(t) dt.$$

Аналогично (28), ОМП (35) являются надежными [7, 8], если

$$(\hat{R}_2, \hat{V}_2) \in W_S. \quad (37)$$

Для случая надежных ОМП (37) в [6] найдены их дисперсии

$$D_2(R) = \langle (\hat{R}_2 - R_0)^2 \rangle = D_0(R) \kappa_2, \\ D_2(V) = \langle (\hat{V}_2 - V_0)^2 \rangle = D_0(V) \kappa_2, \quad (38)$$

где  $D_0(R)$  (20) и  $D_0(V)$  (21) — дисперсии надежных ОМП дальности и скорости при наличии только ГБШ, а величина

$$\kappa_2 = \frac{2}{N_0} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{ds(t)}{dt} \right]^2 dt \Big/ \int_{-\infty}^{\infty} \frac{ds(t)}{dt} \frac{dv(t)}{dt} dt$$

показывает проигрыш в точности надежных ОМП (35) вследствие воздействия ГУП с априори известной корреляционной функцией.

Для ОМП (35), аналогично (22) вероятность надежной оценки возможно определить как

$$P_{02} = P \left[ (\hat{R}_2, \hat{V}_2) \in W_S \right]. \quad (39)$$

При выполнении условий, аналогичных (24), для (39) получаем выражение, аналогичное (25)

$$P_{02} = \int F_{2N}(x) dF_{2S}(x), \quad (40)$$

где  $F_{2N}(x)$  — функция распределения случайной величины  $H_{2N} = \sup L_2(R, V), (R, V) \in W_N$ ,

$F_{2S}(x)$  — функция распределения случайной величины  $H_{2S} = \sup L_2(R, V), (R, V) \in W_S$ . Аппроксимации функций распределения  $F_{2N}(x)$  и  $F_{2S}(x)$  получаем аналогично (27), (28) в виде (41), (42) [10] (см. внизу с. 9).

Подставляя аппроксимации (41) и (42) в (40) находим приближенное выражение для вероятности надежной ОМП (35) при наличии ГУП с априори известной корреляционной функцией (43) (см. внизу с. 9).

Точность этого приближенного выражения улучшается с ростом ОСШ и приведенной площади априорной области возможных значений дальности и скорости.

Если неизвестные значения  $R_0$  и  $V_0$  случайны и распределены равномерно в априорной области  $W$  (2), то безусловные рассеяния ОМП (35) с учетом аномальных ошибок имеют вид

$$B_2(R) = \langle (\hat{R}_2 - R_0)^2 \rangle = \quad (44) \\ = P_{02} D_0(R) \kappa_2 + (1 - P_{02}) (R_{\max} - R_{\min})^2 / 6,$$

$$B_2(V) = \langle (\hat{V}_2 - V_0)^2 \rangle = \\ = P_{02} D_0(V) \kappa_2 + (1 - P_{02}) V_{\max}^2 / 6. \quad (45)$$

Сопоставляя (44), (45) с (38) возможно определить, какой вклад в средний квадрат ошибки оценки вносят пороговые эффекты при воздействии ГУП с априори известной

$$F_{2N}(x) \cong \begin{cases} \exp \left[ -\frac{x \xi_0}{z_0 \kappa_2 \sqrt{N}} \left( \frac{\chi_2}{2\pi} \right)^{3/2} \exp \left( -\frac{x^2 \chi_2}{2N z_0^2} \right) \right], & x \geq z_0 \sqrt{N / \chi_2}, \\ 0, & x < z_0 \sqrt{N / \chi_2}, \end{cases} \quad (41)$$

$$F_{2S}(x) \cong \Phi \left( x / z_0 \sqrt{N \chi_2} - z_0 \sqrt{N / \chi_2} \right). \quad (42)$$

$$P_{02} \cong \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_1^{\infty} \exp \left[ -\frac{x \xi_0 \chi_2}{\kappa_2 (2\pi)^{3/2}} \exp \left( -\frac{x^2}{2} \right) - \frac{(x - z_0 \sqrt{N / \chi_2})^2}{2} \right] dx. \quad (43)$$

корреляционной функцией. Если в (43)–(45) принять  $\kappa_2 = \chi_2 = 1$ , получим характеристики ОМП дальности и скорости в отсутствие ГУП [4]. В частности, сопоставляя (44), (45) с результатами [4] возможно определить влияние воздействия ГУП с априори известной корреляционной функцией на точность ОМП дальности и скорости. Наконец, из сравнения (29), (30) и (44), (45) возможно установить, как влияет априорная информация о характеристиках ГУП на точность оценок дальности и скорости.

Формула (43) для вероятности надежной ОМП (35) довольно громоздка и расчет по ней возможен только численными методами. Поэтому, аналогично (31), найдем относительно простое аналитическое выражение для вероятности аномальных ошибок  $P_{a2} = 1 - P_{02}$ , справедливое при достаточно больших ОСШ (36)

$$P_{a2} \cong \frac{\xi_0 z_0 \sqrt{\chi_2 N}}{8\pi^{3/2} \kappa_2} \exp\left(-\frac{z_0^2 N}{4\chi_2}\right). \quad (46)$$

Сравним вероятности аномальных ошибок ОМП в отсутствие ГУП (32) и при наличии ГУП с априори известной корреляционной функцией (46). Сопоставляя (32) и (46) находим

$$\alpha_2 = \frac{P_{a2}}{P_a} = \frac{\sqrt{\chi_2}}{\kappa_2} \exp\left[\frac{z_0^2 N(\chi_2 - 1)}{4\chi_2}\right]. \quad (47)$$

Величина (47), показывает во сколько раз возрастает вероятность аномальной ошибки ОМП дальности и скорости вследствие воздействия ГУП с априори известной корреляционной функцией.

Сравним вероятность аномальной ошибки (31) КПО (6) при воздействии ГУП с априори неизвестной корреляционной функцией и вероятность аномальной ошибки (46) ОМП (35) при воздействии ГУП с априори известной корреляционной функцией. Сопоставляя (31) и (46) находим

$$\alpha = \frac{P_{a1}}{P_{a2}} = \frac{\kappa_1 \kappa_2}{\chi_1^{3/2} \sqrt{\chi_2}} \exp\left[\frac{z_0^2 N(\chi_1 - \chi_2)}{4\chi_1 \chi_2}\right]. \quad (48)$$

Величина (48) показывает, во сколько раз уменьшается вероятность аномальной ошибки оценки дальности и скорости вследствие наличия априорной информации о характеристиках ГУП и использовании алгоритма оценки (35) вместо алгоритма (6).

Анализ полученных результатов показывает, что наличие узкополосной помехи приводит к экспоненциальному относительному росту вероятности аномальных ошибок с увеличением числа импульсов в зондирующей последовательности. Найденные характеристики оценок позволяют с учетом пороговых эффектов сделать обоснованный выбор алгоритма оценки для локационных систем в зависимости от имеющейся априорной информации об узкополосной помехе, а также от требований, предъявляемых к простоте реализации алгоритма и от требований к точности оценок.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Астанин Л. Ю. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений / Л. Ю. Астанин, А. А. Костылев. — М. : Радио и связь, 1989. — 192 с.
2. Трифонов А. П. Эффективность сверхширокополосного обнаружения цели с неизвестными дальностью и скоростью при наличии узкополосной помехи / А. П. Трифонов, М. Б. Беспалова, П. А. Трифонов // Радиоэлектроника. — 2009. — Т. 52, № 12. — С. 3–13. — (Известия вузов).
3. Радзиевский В. Г. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех / В. Г. Радзиевский, П. А. Трифонов. — М. : Радиотехника, 2009. — 288 с.
4. Трифонов А. П. Эффективность сверхширокополосного обнаружения и измерения дальности и скорости цели / А. П. Трифонов, М. Б. Беспалова // Радиотехника и электроника. — 1997. — Т. 42, № 4. — С. 451–456.
5. Радзиевский В. Г. Теоретические основы радиоэлектронной разведки / В. Г. Радзиевский, А. А. Сирота. — М. : Радиотехника, 2004. — 384 с.
6. Трифонов А. П. Эффективность сверхширокополосной оценки дальности и скорости цели при наличии узкополосной помехи / А. П. Трифонов, М. Б. Беспалова, П. А. Трифонов // Радиоэлектроника. — 2011. — Т. 54, № 7. — С. 3–9. — (Известия вузов).

7. Куликов Е. И. Оценка параметров сигналов на фоне помех / Е. И. Куликов, А. П. Трифонов. — М. : Сов. радио, 1978. — 296 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. — 264 с.

9. Мудров В. И. Методы обработки измерений / В. И. Мудров, В. Л. Кушко. — М. : Радио и связь. — 304 с.

10. Теория обнаружения сигналов / П. С. Акимов, П. А. Бакут, В. А. Богданович [и др.] ; под ред. П. А. Бакута. — М. : Радио и связь, 1984. — 440 с.

Поступила после переработки 09.11.2012