

230

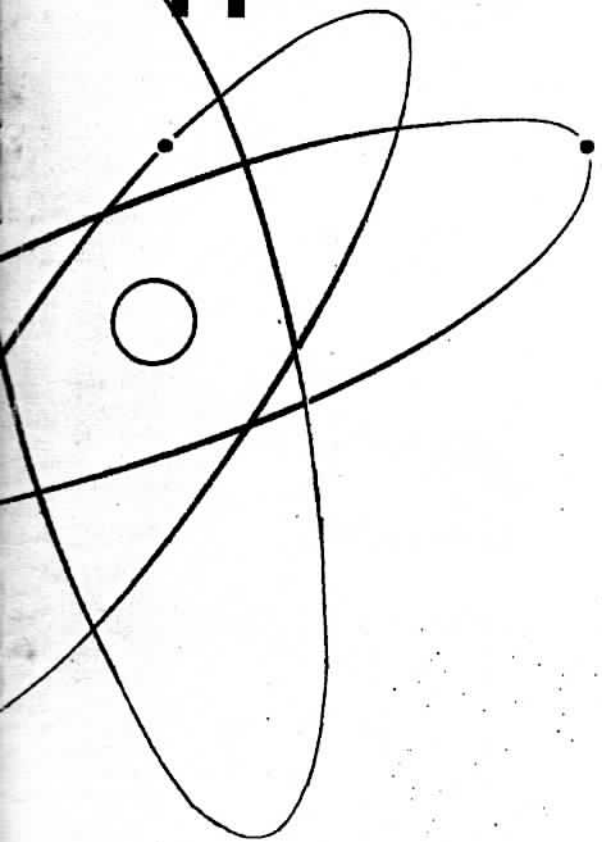
230



ISSN 0021-3470

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ
ЗАВЕДЕНИЙ

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА



ТОМ 46

7-8

июль-август

ИЗДАНИЕ
НАЦИОНАЛЬНОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
УКРАИНЫ
«КИЕВСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ»

2003

ПОРОГОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ОЦЕНОК ДАЛЬНОСТИ, СКОРОСТИ И УСКОРЕНИЯ

Найдена разрешающая способность по дальности, скорости и ускорению, а так же характеристики оценок максимального правдоподобия с учетом аномальных ошибок.

В [1—4] 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 в принципе расширить возможности радиолокации. В [4] найдены характеристики совместно-эффективных оценок дальности, скорости и ускорения при зондировании последовательностью СШПС. Однако, для решения многих задач сверхширокополосной локации надо знать не только потенциальную точность оценок дальности, скорости и ускорения, но и разрешающую способность сигнала по этим параметрам [1, 2, 3, 5]. Кроме того, полученные в [4] выражения для характеристик совместно-эффективных оценок могут быть использованы для расчета характеристик асимптотически эффективных оценок дальности, скорости и ускорения лишь в условиях высокой апостериорной точности, когда отсутствуют аномальные ошибки [3, 5]. Рассмотрим здесь пороговые характеристики оценок максимального правдоподобия (ОМП) дальности, скорости и ускорения с учетом возможного влияния аномальных ошибок.

Аналогично [4], зондирующую последовательность СШПС запишем как

$$\tilde{s}_N(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{s}_k [t - (k - \mu)\theta - \lambda] = \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{a}_k \tilde{s} [t - (k - \mu)\theta - \lambda], \quad (1)$$

где функция $\tilde{s}_k(\cdot)$ описывает форму одного импульса, \tilde{a}_k — его амплитуда, θ — период повторения, а λ — временное положение последовательности.

Параметр μ определяет точку последовательности с которой связано ее временное положение λ . Так, при $\mu = 0$ величина λ представляет собой временное положение первого импульса последовательности, при $\mu = (N - 1)/2$ — временное положение середины последовательности (1), а при $\mu = N - 1$ — временное положение последнего импульса.

В результате рассеяния зондирующей последовательности (1) целью с дальностью R_0 , скоростью V_0 и ускорением A_0 принимаемый сигнал будет иметь вид [4]

$$s(t, l_0) \equiv s(t, R_0, V_0, A_0) = \sum_{k=0}^{N-1} s_k \left[t - 2R_0/c - (k-\mu)\theta(1+2V_0/c) - A_0(k-\mu)^2\theta^2/c \right] = \sum_{k=0}^{N-1} a_k f \left\{ \left[t - 2R_0/c - (k-\mu)\theta(1+2V_0/c) - A_0(k-\mu)^2\theta^2/c \right] / \tau \right\}. \quad (2)$$

Здесь $a_k = \max s_k(t)$ — амплитуда, $\tau = \int_{-\infty}^{\infty} s_k^2(t) dt [\max s_k(t)]^{-2}$ — эквивалентная длительность одного импульса, c — скорость света. Функции $s_k(t)$ и $f(x) = s_k(x\tau)/a_k$ описывают форму одного импульса, причем в общем случае функция $s_k(\cdot)$ в (2) отличается от $\tilde{s}_k(\cdot)$ в (1). Функция $f(\cdot)$ нормирована так, что $\int_{-\infty}^{\infty} f^2(x) dx = 1$, $\max f(x) = 1$, $\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 0$.

Вектор $I = \|l_1, l_2, l_3\|$ в (2) объединяет измеряемые параметры: $l_1 = R, l_2 = V, l_3 = A$, причем $R \in [R_{\min}; R_{\max}]$, $V \in [-V_{\max}/2; V_{\max}/2]$, $A \in [-A_{\max}/2; A_{\max}/2]$. Полагаем, что, как это обычно имеет место в земных условиях, $V_{\max} \ll c$ и $N\theta A_{\max} \ll c$. Пусть 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, т. е. $T > \theta N$. Тогда обработке доступна реализация наблюдаемых данных $x(t) = s(t, l_0) + n(t)$. Скважность последовательности (2) полагаем не слишком малой ($\theta/\tau > 2.3$), так что отдельные импульсы не перекрываются. В этом случае логарифм функционала отношения правдоподобия с точностью до не существенной постоянной определяется формулой [5]

$$L(I) = \frac{2}{N_0} \sum_{k=0}^{N-1} a_k \int_0^T x(t) f \left[\frac{t - 2R/c - (k-\mu)\theta(1+2V/c) - A(k-\mu)^2\theta^2/c}{\tau} \right] dt. \quad (3)$$

В результате ОМП дальности \hat{R} , скорости \hat{V} и ускорения \hat{A} представляют собой положение абсолютного (наибольшего) максимума случайного поля (3)

$$\left(\hat{R}, \hat{V}, \hat{A} \right) = \arg \sup L(R, V, A); (R, V, A) \in W, \quad (4)$$

где

$$W = \left\{ [R_{\min}; R_{\max}], [-V_{\max}/2; V_{\max}/2], [-A_{\max}/2; A_{\max}/2] \right\} \quad (5)$$

— априорная область возможных значений дальности, скорости и ускорения.

Для определения характеристик ОМП (4) представим (3) в виде суммы нормированных сигнальной и шумовой функций [5]: $L(I) = z^2 S(I_0, I) + zN(I)$, где

$$z^2 = 2\tau \sum_{k=0}^{N-1} a_k^2 / N_0 \quad (6)$$

— отношение сигнал/шум для всей последовательности (2), а нормированная сигнальная функция имеет вид [4]

$$S(I_1, I_2) = \sum_{k=0}^{N-1} P(k) S_f \{ [2(R_1 - R_2) + 2\theta(k - \mu)(V_1 - V_2) + \theta^2(k - \mu)^2(A_1 - A_2)] / c\tau \}. \quad (7)$$

Величины

$$P(k) = a_k^2 / \sum_{k=0}^{N-1} a_k^2 \quad (8)$$

характеризуют распределение суммарной мощности последовательности (2) по отдельным импульсам, а $S_f(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)f(x-y)dx$ — нормированная сигнальная функция при оценке положения функции $f(\cdot)$ [3]. При выводе сигнальной функции (7) предполагалось, что

$$|R_1 - R_2| \leq c\theta/2, |V_1 - V_2| \ll c, N\theta|A_1 - A_2| \ll c, \quad (9)$$

так что формула (7) описывает центральный пик сигнальной функции (функции неопределенности) [3, 5]. Шумовая функция $N(I)$ представляет собой реализацию гауссовского центрированного случайного поля, причем $\langle N(I_1)N(I_2) \rangle = S(I_1, I_2)$ [5]. Согласно [4], ОМП (4) обладают высокой апостериорной точностью, если отношение сигнал/шум (6) достаточно велико.

Найдем разрешающую способность последовательности СШПС (2) по дальности, скорости и ускорению. При выполнении (9), разрешающую способность по дальности, скорости и ускорению можно приблизительно определить как полуширину параболической аппроксимации сечения сигнальной функции (7) по соответствующему параметру, отсчитываемую на половинном уровне от максимума [5]. Тогда разрешающая способность по ускорению ΔA может быть найдена из уравнения $S(R_0, V_0, A_0, R_0, V_0, A_0 + \Delta A) = 1/2$. Для приближенного расчета ΔA аппроксимируем сечение сигнальной функции параболой. Тогда это уравнение принимает вид

$$\left[\frac{\partial^2 S(R_0, V_0, A_0, R_0, V_0, A)}{\partial A^2} \right]_{A_0} \Delta A^2 = 1,$$

откуда находим

$$\Delta A = \left[- \frac{\partial^2 S(R_0, V_0, A_0, R_0, V_0, A)}{\partial A^2} \right]_{A_0}^{-1/2}.$$

Подставляя (7) и выполняя дифференцирование, для приближенного значения разрешающей способности по ускорению получаем выражение

$$\Delta A = c \tau / \theta^2 d \sqrt{M_4(\mu)}, \quad (10)$$

где $d^2 = \int_{-\infty}^{\infty} [df(x)/dx]^2 dx$, а $M_n(\mu) = \sum_{k=0}^{N-1} (k-\mu)^n P(k)$.

Величину $M_n(\mu)$ можно интерпретировать как момент n -го порядка дискретной случайной величины $k \in [0, N-1]$ относительно точки μ [6]. При этом предполагается, что вероятность значения k равна величине $P(k)$ (8), которая удовлетворяет условиям: $P(k) \geq 0$, $\sum_{k=0}^{N-1} P(k) = 1$.

Аналогично, для приближенных значений разрешающей способности по скорости ΔV и дальности ΔR имеем [3]

$$\Delta V = c\tau / 2\theta d \sqrt{M_2(\mu)}, \Delta R = c\tau / 2d. \quad (11)$$

Используя введенные величины разрешающей способности по дальности, скорости и ускорению, дисперсии соответствующих совместно-эффективных оценок [4] можно переписать в виде

$$\sigma_R^2(V, A) = \Delta R^2 [M_2(\mu)M_4(\mu) - M_3^2(\mu)] / z^2 b \quad (12)$$

— дисперсия оценки дальности при неизвестных скорости и ускорении,

$$\sigma_V^2(R, A) = \Delta V^2 M_2(\mu) [M_4(\mu) - M_2^2(\mu)] / z^2 b \quad (13)$$

— дисперсия оценки скорости при неизвестных дальности и ускорении,

$$\sigma_A^2(R, V) = \Delta A^2 M_4(\mu) [M_2(\mu) - M_1^2(\mu)] / z^2 b \quad (14)$$

— дисперсия оценки ускорения при неизвестных дальности и скорости, где обозначено

$$b = M_2(\mu)M_4(\mu) - M_1^2(\mu)M_4(\mu) - M_2^3(\mu) - M_3^2(\mu) + 2M_1(\mu)M_2(\mu)M_3(\mu).$$

Согласно (12)...(14) дисперсии эффективных оценок убывают по мере улучшения разрешающей способности.

Пороговые свойства ОМП (4) зависят от вероятности надежной оценки [5]

$$P_0 = P\left[\left(\hat{R}, \hat{V}, \hat{A}\right) \in W_s\right], \quad (15)$$

где

$$W_s = \left\{ [R_0 - \Delta R; R_0 + \Delta R], [V_0 - \Delta V; V_0 + \Delta V], [A_0 - \Delta A; A_0 + \Delta A] \right\} \quad (16)$$

— подобласть априорной области (5) возможных значений, дальности, скорости и ускорения в которой центральный пик сигнальной функции (7) существенно отличен от нуля.

Приближенное значение вероятности надежной оценки (15) удастся найти, если априорная область (5) возможных значений дальности, скорости и ускорения содержит много элементов разрешения, так что выполняется хотя бы одно из неравенств

$$m_R = (R_{\max} - R_{\min}) / \Delta R \gg 1, m_V = V_{\max} / \Delta V \gg 1, m_A = A_{\max} / \Delta A \gg 1. \quad (17)$$

В силу определения ОМП (4) можно переписать (15) как

$$P_0 = P[H_s > H_N], \quad (18)$$

где $H_s = \sup L(R, V, A)$, $(R, V, A) \in W_s$, $H_N = \sup L(R, V, A)$, $(R, V, A) \in W_N$, а W_N — дополнение W_s (16) до W (5), так, что $W_s \cup W_N = W$.

При выполнении (17) случайные величины H_s и H_N приближенно статистически независимы [5] и (18) принимает вид

$$P_0 = \int_{-\infty}^{\infty} F_N(H) dF_s(H). \quad (19)$$

Здесь $F_s(H)$ — функция распределения случайной величины H_s , а $F_N(H)$ — функция распределения случайной величины H_N . Асимптотически точные аппроксимации функций распределения $F_s(H)$ и $F_N(H)$ найдены в [5]. Подставляя эти аппроксимации в (19), находим приближенное выражение для вероятности надежной ОМП дальности, скорости и ускорения

$$P_0 = \frac{z^{3/2}}{\sqrt{2\pi}} \int_{\sqrt{2}}^{\infty} \exp\left[\frac{2z^2 - x^2}{4} - \frac{\xi x^2}{4\pi^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)\right] D_{-3/2}(2z - x) dx, \quad (20)$$

где $D_\nu(\cdot)$ — функция параболического цилиндра, а приведенный объем априорной области возможных значений дальности, скорости и ускорения

$$\xi = (R_{\max} - R_{\min}) V_{\max} A_{\max} \left[\det \left\| \frac{\partial^2 S(I_1, I_2)}{\partial I_i \partial I_j} \right\|_{I_0} \right]^{1/2}, \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (21)$$

Подставляя (7) в (21) и выполняя дифференцирование, имеем

$$\xi = 4(R_{\max} - R_{\min}) V_{\max} A_{\max} d^3 \theta^3 \sqrt{b} / (c\tau)^3.$$

Используя найденные величины разрешающей способности (10), (11) напомним это выражение как

$$\xi = m_R m_V m_A \sqrt{b / M_2(\mu) M_4(\mu)}, \quad (22)$$

где m_R, m_V, m_A определяются из (17) и представляют собой число элементов разрешения соответственно по дальности, скорости и ускорению.

Пусть неизвестны дальность R_0 , скорость V_0 и ускорение A_0 , распределены равномерно в априорной области W (5) их возможных значений. Тогда, используя [5] для безусловных рассеяний ОМП дальности, скорости, ускорения с учетом аномальных ошибок, получаем выражения

$$\begin{aligned} B(R) &= \langle (\hat{R} - R_0)^2 \rangle = P_0 \sigma_R^2(V, A) + (1 - P_0) (R_{\max} - R_{\min})^2 / 6, \\ B(V) &= \langle (\hat{V} - V_0)^2 \rangle = P_0 \sigma_V^2(R, A) + (1 - P_0) V_{\max}^2 / 6, \\ B(A) &= \langle (\hat{A} - A_0)^2 \rangle = P_0 \sigma_A^2(R, V) + (1 - P_0) A_{\max}^2 / 6. \end{aligned} \quad (23)$$

Формула (20) для вероятности надежной оценки довольно громоздка и расчет по ней возможен только численными методами. Поэтому найдем простую верхнюю границу для вероятности аномальных ошибок $P_a = 1 - P_0$. Воспользовавшись неравенством $1 - \exp(-x) \leq x$ при $x > 0$, из (20), аналогично [5], находим

$$P_a \leq P_a^* = \frac{\xi z^2}{24\pi^2 \sqrt{3}} \exp\left(-\frac{z^2}{4}\right). \quad (24)$$

Если $P_a^* \leq 0,05 \dots 0,1$, то для приближенного расчета характеристик ОМП дальности, скорости и ускорения (4) с учетом аномальных ошибок можно использовать упрощенный вариант формул (23), а именно

$$\begin{aligned} B(R) &\equiv \sigma_R^2(V, A) + P_a^* (R_{\max} - R_{\min})^2 / 6, \\ B(V) &\equiv \sigma_V^2(R, A) + P_a^* V_{\max}^2 / 6, \end{aligned}$$

$$B(A) \equiv \sigma_A^2(R, V) + P_a^* A_{\max}^2 / 6. \quad (25)$$

Сопоставления формул (23) или (25) с (12)...(14) соответственно, позволяет определить условия, при которых проявляются пороговые эффекты [5], т. е. рассеяние ОМП резко возрастает по сравнению с дисперсией совместно-эффективных оценок вследствие появления аномальных ошибок.

Рассмотрим, как влияет на пороговые характеристики ОМП дальности априорное незнание скорости и ускорения и соответственно как влияет на пороговые характеристики отдельных оценок скорости (ускорения) априорное незнание дальности и ускорения (дальности и скорости). Для этого приведем вероятность надежной отдельной оценки одного из трех параметров (дальность, скорость или ускорение) при условии, что оба не оцениваемые параметра априори известны [5]

$$P_{01} = \sqrt{\frac{z}{2\pi}} \int_0^{\infty} \exp\left[\frac{2z^2 - x^2}{4} - \frac{\xi_1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)\right] D_{-1/2}(2z - x) dx. \quad (26)$$

Здесь $\xi_1 = m_R$, если оценивается дальность при априори известных значениях скорости и ускорения; $\xi_1 = m_V$, если оценивается скорость при априори известных значениях дальности и ускорения и $\xi_1 = m_A$, если оценивается ускорение при априори известных значениях дальности и скорости. Непосредственное сопоставление (20) и (26) возможно только на основе численных расчетов. Поэтому, аналогично (24) приведем приближенное выражение для вероятности аномальной ошибки $P_{a1} = 1 - P_{01}$ при отдельной оценке одного из трех неизвестных параметров. Если отношение сигнал/шум z (6) не слишком мало, для верхней границы вероятности аномальной ошибки отдельной оценки одного параметра имеем [5]

$$P_{a1}^* = \frac{\xi}{2\pi\sqrt{3}} \exp\left(-\frac{z^2}{4}\right). \quad (27)$$

Сопоставление (24) и (27) позволяет определить влияние наличия двух неинформативных параметров на вероятность аномальной ошибки оценки третьего параметра. Действительно, пусть $P_{a1}^*(R)$ — вероятность аномальной ошибки дальности при априори известных значениях скорости и ускорения. Из (22), (24) и (27) находим увеличение вероятности аномальной ошибки дальности вследствие априорного незнания скорости и ускорения

$$\frac{P_a^*}{P_{a1}^*(R)} = \frac{m_V m_A z^2}{12\pi} \sqrt{\frac{b}{M_2(\mu)M_4(\mu)}}. \quad (28)$$

Соответственно, для увеличения вероятности аномальной ошибки $P_{a1}^*(V)$ скорости, вследствие априорного незнания дальности и ускорения имеем

$$\frac{P_a^*}{P_{a1}^*(V)} = \frac{m_R m_A z^2}{12\pi} \sqrt{\frac{b}{M_2(\mu)M_4(\mu)}} \quad (29)$$

Наконец, для увеличения вероятности аномальной ошибки $P_{a1}^*(A)$ ускорения, вследствие априорного незнания дальности и скорости, можем записать

$$\frac{P_a^*}{P_{a1}^*(A)} = \frac{m_R m_V z^2}{12\pi} \sqrt{\frac{b}{M_2(\mu)M_4(\mu)}} \quad (30)$$

Как следует из (28)...(30), относительное увеличение вероятности аномальной ошибки вследствие наличия двух неинформативных параметров пропорционально квадрату отношения сигнал/шум и числу элементов разрешения по неинформативным параметрам.

Формулы (23) позволяют рассчитать рассеяние — средний квадрат ошибок измерения дальности, скорости и ускорения с учетом пороговых эффектов. Введем в рассмотрение относительные рассеяния — средние квадраты относительных ошибок измерения дальности, скорости и ускорения.

$$\beta(R) = B(R) / (R_{\max} - R_{\min})^2, \beta(V) = B(V) / V_{\max}^2, \beta(A) = B(A) / A_{\max}^2 \quad (31)$$

Далее будем характеризовать точность совместных ОМП дальности, скорости и ускорения (4) взвешенной суммой относительных рассеяний (31)

$$\beta_{\Sigma} = \kappa_R \beta(R) + \kappa_V \beta(V) + \kappa_A \beta(A), \quad (32)$$

где $\kappa_R \geq 0, \kappa_V \geq 0, \kappa_A \geq 0, \kappa_R + \kappa_V + \kappa_A = 1$

Вес κ_R, κ_V и κ_A могут выбираться в зависимости от требований к точности измерения дальности, скорости и ускорения. Если, например, интерес представляет оценка дальности, а точность оценки скорости и ускорения несущественна, то следует в (32) принять $\kappa_R \gg \kappa_V, \kappa_R \gg \kappa_A$. Если важна оценка дальности и скорости, а точность оценки ускорения не играет существенной роли, то следует в (32) принять $\kappa_R = \kappa_V \gg \kappa_A$. Наконец, если к относительной погрешности измерения дальности, скорости и ускорения предъявляются одинаковые требования, следует в (32) принять $\kappa_R = \kappa_V = \kappa_A = 1/3$.

Рассмотрим далее возможность оптимизации длительности τ СШПС последовательности (2) с учетом аномальных ошибок. Полагая, что интерес представляет взвешенная сумма (32) средних квадратов относительных ошибок измерения дальности, скорости и ускорения, оптимальную длительность СШПС (2) будем искать из условия

Подставляя (23) в (32), находим

$$\beta_{\Sigma} = P_0 \left[\frac{\kappa_R \sigma_R^2(V, A)}{(R_{\max} - R_{\min})^2} + \frac{\kappa_V \sigma_V^2(R, A)}{V_{\max}^2} + \frac{\kappa_A \sigma_A^2(R, A)}{A_{\max}^2} \right] + \frac{1 - P_0}{6}. \quad (34)$$

Согласно (10), (11) ... (14) и (20) вероятность надежной оценки и дисперсия надежных оценок убывают по мере уменьшения длительности τ СШПС последовательности (2). Это приводит к тому, что с уменьшением τ величина первого слагаемого в (34) убывает. Однако одновременно возрастает величина второго слагаемого. Следовательно, должно существовать некоторое значение длительности τ_{opt} , которое обеспечивает выполнение условия (33). Это условие с учетом (34) переписывается теперь в виде $\min \beta_{\Sigma}(\tau) = \beta_{\Sigma}(\tau_{\text{opt}}) = \beta_{\text{opt}}$. Таким образом, оптимальная длительность СШПС $\tau_{\text{opt}} = \arg \min \beta_{\Sigma}(\tau)$.

Найти аналитически τ_{opt} не удается вследствие относительно сложной зависимости вероятности надежной оценки (20) от τ . Величину τ_{opt} всегда можно найти, используя численные методы. Однако, необходимость многократного вычисления интеграла в (20) как функции τ приводит к существенным затратам машинного времени. Несколько упростить процедуру нахождения τ_{opt} можно, полагая отношение сигнал/шум z (6) настолько большим, что для вероятности аномальной ошибки справедлива приближенная формула (24).

Используя (24) и (25), получаем взвешенную сумму (32) средних квадратов относительных ошибок измерения дальности, скорости и ускорения в виде

$$\begin{aligned} \beta_{\Sigma}(\tau) = & \frac{c^2 \tau^2}{4z^2 d^2 \theta^4 b} \left\{ \frac{\theta^4 \kappa_R [M_2(\mu)M_4(\mu) - M_3^2(\mu)]}{(R_{\max} - R_{\min})^2} + \right. \\ & \left. + \frac{\theta^2 \kappa_V [M_4(\mu) - M_2^2(\mu)]}{V_{\max}^2} + \frac{4\kappa_A [M_2(\mu) - M_1^2(\mu)]}{A_{\max}^2} \right\} + \\ & + \frac{z^2 d^3 \theta^3 (R_{\max} - R_{\min}) V_{\max} A_{\max} \sqrt{b}}{36c^3 \tau^3 \pi^2 \sqrt{3}} \exp\left(-\frac{z^2}{4}\right). \end{aligned} \quad (35)$$

Решая уравнение $[d\beta_{\Sigma}(\tau)/d\tau] = 0$, находим, что (33) выполняется, если длительности СШПС определяется выражением

$$\begin{aligned} \tau_{\text{opt}} = & (d\theta/c) \left[\theta^2 z^4 b^{3/2} (R_{\max} - R_{\min}) V_{\max} A_{\max} / 6\pi^3 \sqrt{3} \times \right. \\ & \left. \times \left\{ \theta^4 \kappa_R [M_2(\mu)M_4(\mu) - M_3^2(\mu)] / (R_{\max} - R_{\min})^2 + \right. \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +\theta^2 \kappa_V \left[M_4(\mu) - M_2^2(\mu) \right] / V_{\max}^2 + \\
& + 4\kappa_A \left[M_2(\mu) - M_1^2(\mu) \right] / A_{\max}^2 \}]^{1/5} \exp(-z^2 / 20). \quad (36)
\end{aligned}$$

Подставляя (36) в (35), получаем

$$\begin{aligned}
\beta_{\text{opt}} = \min_{\tau} \beta_{\Sigma} = (5/12\theta) & \left[(R_{\max} - R_{\min}) V_{\max} A_{\min} / 6\pi^2 b \sqrt{3\theta} \right]^{2/5} \times \\
& \times \left\{ \theta^4 \kappa_R \left[M_2(\mu) M_4(\mu) - M_3^2(\mu) \right] / (R_{\max} - R_{\min})^2 + \right. \\
& + \theta^2 \kappa_V \left[M_4(\mu) - M_2^2(\mu) \right] / V_{\max}^2 + \\
& \left. + 4\kappa_A \left[M_2(\mu) - M_1^2(\mu) \right] / A_{\max}^2 \right\}^{3/5} \exp(-z^2 / 10). \quad (37)
\end{aligned}$$

Выбор длительности СШПС последовательности (2) в соответствии с (36) приводит к тому, что с ростом отношения сигнал/шум (6) рассеяния ОМП дальности, скорости и ускорения убывают экспоненциально (37), т. е. значительно быстрее, чем дисперсии совместно-эффективных оценок (12)...(14) при фиксированной длительности СШПС. Действительно, как следует из (12)...(14) дисперсии совместно-эффективных оценок дальности, скорости и ускорения убывают лишь обратно-пропорционально квадрату отношения сигнал/шум.

Работа выполнена при поддержке CRDF, Минобразования РФ и РФФИ (проекты VZ-010-0, TO2-3.1-71 и 03-01-00145).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Астанин Л. Ю., Костылев А. А. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений.— М.: Радио и связь, 1989.— 192 с.
2. Бункин Б. В., Какин В. А. Особенности проблемы и перспективы субнаносекундных видеомпульсных РЛС // Радиотехника.— 1995.— № 4, 5.— С. 128—133.
3. Трифонов А. П., Беспалова М. Б. Эффективность сверхширокополосного обнаружения и измерения дальности и скорости // Радиотехника и электроника.— 1997.— Т. 42.— №4.— С. 451—456.
4. Трифонов А. П., Беспалова М. Б. Сверхширокополосная оценка дальности, скорости и ускорения // Радиоэлектроника.— 2003.— Т. 46.— №6.— С. 3—10. (Изв. вузов).
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. Кендалл М., Стьюарт А. Теория распределений.— М.: Наука, 1966.— 588 с.

Воронежский госуниверситет.

Поступила в редакцию 21.01.03.