

235

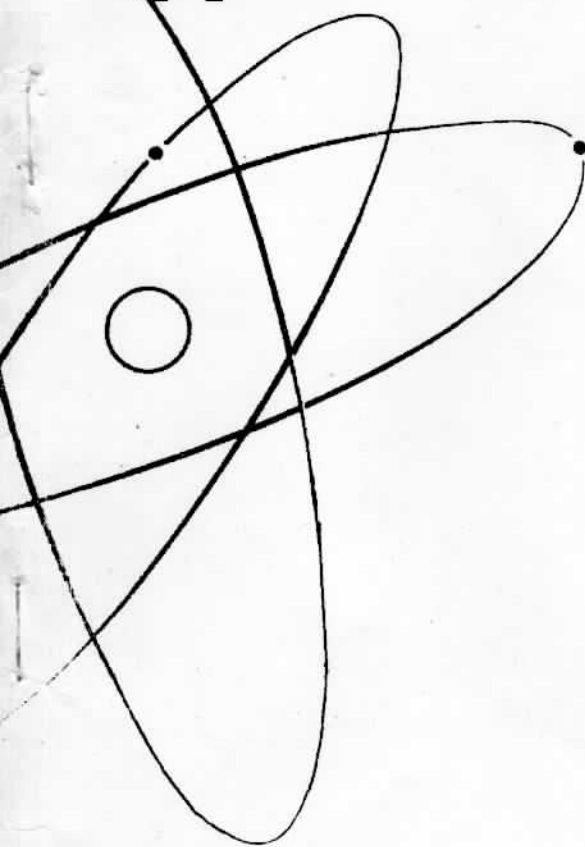
235

ISSN 0021-3470



ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ
ЗАВЕДЕНИЙ

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА



ТОМ 47

5-6
май-июнь

ИЗДАНИЕ
НАЦИОНАЛЬНОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
УКРАИНЫ
«КИЕВСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ»

2004

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

**ПРЕДЕЛЬНАЯ ТОЧНОСТЬ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ ОЦЕНКИ
ДАЛЬНОСТИ***

Рассмотрены характеристики оценки максимального правдоподобия и байесовской оценки при квадратичной функции потерь с учетом аномальных ошибок. Показано, что применение байесовского алгоритма позволяет уменьшить ошибки измерения дальности в пороговой области. Определены оптимальные длительности зондирующего импульса, которые обеспечивают минимальные ошибки измерения дальности.

В последние годы в качестве зондирующих сигналов используют импульсы нано- и пикосекундной длительности [1—4]. Поскольку потенциальная точность измерения дальности цели пропорциональна длительности зондирующего сигнала [5], то применение таких сигналов позволяет определить дальность с точностью до нескольких сантиметров. Короткоимпульсные сигналы и их последовательности представляют собой частный случай сверхширокополосных сигналов (СШПС). Спектр СШПС исключительно широк и его воздействие вызывает возбуждение практически всех возможных колебаний исследуемой цели, что делает высокоинформативной наблюдаемую реакцию. Важной особенностью СШПС является отсутствие у них собственно несущей частоты и, как следствие, невозможность использования классического описания радиосигналов с помощью комплексной огибающей.

В [1—5] и др. рассматривались два алгоритма оценки дальности: оценка максимального правдоподобия (ОМП) и байесовская оценка (БО) при квадратичной функции потерь. Точность обеих оценок фактически характеризовалась дисперсией эффективной оценки. Естественно, возникает вопрос, насколько близка полученная таким образом дисперсия оценки к ее истинному значению в зависимости от отношения сигнал/шум (ОСШ), формы импульса и длины априорного интервала возможных значений дальности.

Практическая ценность любого алгоритма измерения существенно снижается при малых ОСШ и больших априорных интервалах возможных значе-

* Работа выполнена при поддержке CRDF, Минобразования РФ и РФФИ (проекты VZ-0100 и 04-0100523).

ний дальности вследствие появления аномальных ошибок и возникновения пороговых эффектов [4, 5]. Кроме того, использование дисперсии эффективной оценки для описания точности измерения дальности может привести даже к качественно неверным выводам. Действительно, дисперсия эффективной оценки стремится к нулю по мере уменьшения длительности зондирующего импульса. Тем не менее, чрезмерное уменьшение длительности импульса при его ограниченной энергии или мощности может привести к снижению точности измерения дальности вследствие появления пороговых эффектов [4, 5]. В связи с этим рассмотрим характеристики ОМП и БО дальности с учетом аномальных ошибок и исследуем зависимость точности измерения дальности от параметров зондирующего импульса.

Положим, что в результате рассеяния зондирующего импульса объектом, дальность R_0 которого надо измерить, на интервале времени $[0, T]$ наблюдается реализация

$$x(t) = s(t - 2R_0 / c) + n(t), \quad (1)$$

где $n(t)$ — гауссовский белый шум с односторонней спектральной плотностью N_0 , c — скорость света, а неизвестная дальность, подлежащая оценке,

$$R_0 \in [R_{\min}; R_{\max}]. \quad (2)$$

Полезный сигнал $s(t)$ представим в виде

$$s(t) = af(t/\tau), \quad (3)$$

где $a = \max s(t)$ — амплитуда сигнала, $\tau = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt [\max s(t)]^{-2}$ — его эквивалентная длительность, а функция $f(x) = s(x\tau)/a$ описывает форму импульса и удовлетворяет условиям

$$\max f(x) = 1, \int_{-\infty}^{\infty} f^2(x) dx = 1, \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 0. \quad (4)$$

Для получения ОМП или БО необходимо вырабатывать логарифм функционала отношения правдоподобия (ФОР) $L(R)$ [5] для всех возможных значений дальности R из априорного интервала (2). Полагая, что интервал наблюдения достаточно велик, так что

$$T > 2(R_{\max} - R_{\min}) / c, T \gg \tau \quad (5)$$

и, пренебрегая несущественным постоянным слагаемым, можем записать

$$L(R) = 2 \int_0^T x(t) s(t - 2R/c) dt / N_0. \quad (6)$$

Согласно определению [5], ОМП неизвестной дальности $\hat{R}$ представляет собой положение наибольшего максимума логарифма ФОП (6)

$$\hat{R} = \operatorname{argsup} L(R), R \in [R_{\min}, R_{\max}] \quad (7)$$

Используя (6), (7), максимально правдоподобный измеритель дальности можно представить состоящим из двух блоков, выделенных на рис. 1 штриховой линией: линейного фильтра 1, согласованного с сигналом (2) и устройства 2 поиска положения абсолютного максимума выходного сигнала фильтра $\hat{t}$ в интервале времени $[2R_{\min}/c, 2R_{\max}/c]$. Очевидно, ОМП дальности $\hat{R} = c\hat{t}/2$.

Если неизвестная дальность априори распределена равномерно в интервале (4), то БО дальности при квадратичной функции потерь [5]

$$R_B = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} R \exp[L(R)] dR / \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \exp[L(R)] dR \quad (8)$$

Согласно (8) байесовский измеритель дальности можно представить как показано на рис. 1, где следует исключить блок 2. Байесовский измеритель будет состоять из согласованного фильтра 1, нелинейного преобразователя с экспоненциальной характеристикой 3, генератора 4 линейно возрастающего напряжения $u(t) = ct/2$ и интеграторов 5 на интервале времени $[2R_{\min}/c, 2R_{\max}/c]$. Как следует из рис. 1, в общем случае аппаратная или программная реализация БО может оказаться сложнее реализации ОМП.

Рассмотрим характеристики оценки дальности. Будем описывать точность измерения дальности величиной безусловного рассеяния (среднего квадрата ошибки) соответствующей оценки. Тогда, используя результаты [4, 5] для рассеяния ОМП дальности (7) при выполнении (5) имеем приближенное выражение

$$B(\hat{R}) = \left\langle (\hat{R} - R_0)^2 \right\rangle = P_{01} D_E + (1 - P_{01}) (R_{\max} - R_{\min})^2 / 6 \quad (9)$$

Здесь усреднение выполняется по всем возможным значениям случайных величин $\hat{R}$ и R_0 ,

$$D_E = \Delta R^2 / z^2 \quad (10)$$

— дисперсия эффективной оценки дальности [4, 5],

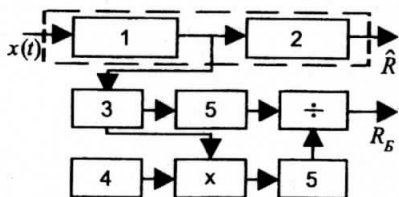


Рис. 1

$$\Delta R = c\tau / 2d \quad (11)$$

— разрешающая способность по дальности,

$$d^2 = \int_{-\infty}^{\infty} [df(x)/dx]^2 dx, \quad (12)$$

$$z^2 = 2E / N_0 \quad (13)$$

— ОСШ, $E = a^2 \tau$ — энергия импульса.

Вероятность надежной оценки $P_{01} = P(|\hat{R} - R_0| < \Delta R)$ согласно [5]

$$P_{01} = \sqrt{z/2\pi} \int_0^{\infty} \exp\left[\left((2z^2 - x^2)/4\right) - (d/\pi\varphi) \exp(-x^2/2)\right] D_{-1/2}(2z - x) dx, \quad (14)$$

где $D_v(\cdot)$ — функция параболического цилиндра,

$$\varphi = \tau / T_R \quad (15)$$

— нормированная длительность сигнала (2), а

$$T_R = (R_{\max} - R_{\min}) / c \quad (16)$$

— время прохождения импульсом априорного интервала (2) возможных значений дальности.

Очевидно, величина $1/\varphi$ определяет количество импульсов, которые могут разместиться в интервале времени T_R . Формулы (9), (14) являются приближенными, однако их точность возрастает с уменьшением нормированной длительности импульса φ (15) и с увеличением ОСШ z (13).

В дальнейшем удобно рассматривать нормированное безусловное рассеяние оценки дальности

$$b_1 = B(\hat{R}) / (R_{\max} - R_{\min})^2 = P_{01} \varphi^2 / 4d^2 z^2 + (1 - P_{01}) / 6, \quad (17)$$

определяющее средний квадрат относительной ошибки измерения дальности. Полагая, что энергия импульса (3) фиксирована, т. е. ОСШ постоянно,

$$z^2 = \text{const}, \quad (18)$$

исследуем возможность оптимального выбора параметров импульса — эквивалентной длительности τ и амплитуды a .

Оптимальное значение длительности будем искать из условия минимума относительного рассеяния (17). Тогда очевидно, оптимальное значение нормированной длительности импульса (2)

$$\varphi_{1\min} = \arg \min_{\varphi} b_1, \quad (19)$$

а соответствующее минимальное значение относительного рассеяния ОМП дальности

$$b_{1 \min} = \min_{\varphi} b_1. \quad (20)$$

Получить аналитически величины (19), (20) не удастся вследствие относительно сложной зависимости вероятности надежной оценки (14) от φ . Величины $\varphi_{1 \min}$ и $b_{1 \min}$ всегда можно найти, используя численные методы. Однако, необходимость многократного вычисления интеграла в (14) приводит к существенным затратам машинного времени. Упростить процедуру нахождения $\tau_{1 \min}$ и $b_{1 \min}$ можно, полагая ОСШ настолько большим, что для вероятности аномальных ошибок $P_{a1} = 1 - P_{01}$ справедливо приближение [5]

$$P_{a1} \approx \frac{d}{\pi\varphi\sqrt{3}} \exp\left(-\frac{z^2}{4}\right). \quad (21)$$

Если $P_{a1} \leq 0,05 \dots 0,1$, то для приближенного расчета $\varphi_{1 \min}$ и $b_{1 \min}$ можно использовать упрощенный вариант (17) с подстановкой (21):

$$b_1 \approx \frac{\varphi^2}{4d^2 z^2} + \frac{d}{6\pi\varphi\sqrt{3}} \exp\left(-\frac{z^2}{4}\right). \quad (22)$$

Минимизацию относительного безусловного рассеяния ОМП дальности (22) по нормированной длительности (15) можно выполнить аналитически. Действительно, решая уравнение $[db_1(\varphi)/d\varphi]_{\varphi_{1 \min}} = 0$, находим

$$\varphi_{1 \min} = 2d(z^2/24\pi\sqrt{3})^{1/3} \exp(-z^2/12). \quad (23)$$

Подставляя (23) в (22), получаем

$$b_{1 \min} = \left(3/(24\pi z\sqrt{3})^{2/3}\right) \exp(-z^2/6). \quad (24)$$

Используя (13), (15) и (23), находим оптимальные параметры СШПС (3), которые обеспечивают минимальное относительное рассеяние ОМП дальности. При выполнении (18) сигнал (3) должен обладать длительностью

$$\tau_{1 \min} = T_R \varphi_{1 \min} = (2d(R_{\max} - R_{\min})/c) \left(z^2/24\pi\sqrt{3}\right)^{1/3} \exp(-z^2/12) \quad (25)$$

и амплитудой

$$a_{1 \min} = z \sqrt{\frac{N_0}{2\tau_{1 \min}}} = \frac{z^{2/3}}{2} \sqrt{\frac{N_0 c}{d(R_{\max} - R_{\min})}} (24\pi\sqrt{3})^{1/6} \exp\left(\frac{z^2}{24}\right). \quad (26)$$

Оптимальное значение длительности СШПС (3) при ограничении пиковой мощности (27) опять будем искать из условия минимума относительного рассеяния (29). Тогда, оптимальное значение нормированной длительности (15) импульса (3)

$$\varphi_{2 \min} = \arg \min_{\varphi} b_2, \quad (32)$$

и соответствующее минимальное значение относительного рассеяния ОМП дальности

$$b_{2 \min} = \min_{\varphi} b_2. \quad (33)$$

Получить аналитически величины (32), (33) не удастся. Эти величины можно найти, используя численные методы. Однако, необходимость многократного вычисления интеграла (28), который входит в (29) приводит к существенным затратам машинного времени. Несколько упростить расчет величин (32), (33) можно при больших ОСШ $z^2 = z_R^2 \varphi$, подставляя в (32), (33) вместо (29) упрощенное выражение (30). Используя (32), можно определить оптимальные параметры СШПС (3), которые обеспечивают минимальное относительное рассеяние ОМП дальности. При выполнении (27) сигнал (3) должен обладать длительностью

$$\tau_{2 \min} = T_R \varphi_{2 \min} = \varphi_{2 \min} (R_{\max} - R_{\min}) / c \quad (34)$$

и амплитудой a_m (27). Оптимальная длительность сигнала (3), как и его разрешающая способность (11), изменяются с изменением ОСШ z_R^2 (31) и длины априорного интервала (2) возможных значений дальности.

Конкретизируем полученные результаты для СШПС, форма которого описывается функцией

$$f(x) = (k / (k - 1)) \left[\exp(-x^2 / 2\alpha^2) - (1 / k) \exp(-x^2 / 2k^2\alpha^2) \right]. \quad (35)$$

Здесь параметр k определяет форму СШПС. Если в (35) выбрать

$$\alpha = (k - 1)^2 \sqrt{k^2 + 1} / k \sqrt{\pi} \left[(k + 1) \sqrt{k^2 + 1} - 2k\sqrt{2} \right], \quad (36)$$

то функция (35) удовлетворяет условиям (4). Анализ сигнальной функции (функции неопределенности) [5] для импульса (35) показывает, что при $k = 3$ ее наибольший побочный максимум имеет относительную величину не более 0,1. Будем полагать, что такой уровень побочных максимумов достаточно мал для обеспечения однозначного измерения времени прихода импульса (35). Следовательно, при $k = 3$, когда параметр $d^2 \equiv 3$ (12), импульс (35) можно полагать сверхширокополосным [1—3].

Таким образом, для обеспечения минимального рассеяния ОМП дальности при фиксированном ОСШ (18), необходимо выбирать амплитуду и длительность сигнала (3) из соотношений (25), (26), а оптимальную разрешающую способность — из (11), (25). Оптимальные параметры сигнала (3) изменяются с изменением ОСШ (13) и длины априорного интервала (2) возможных значений дальности. Выбор оптимальных параметров СШПС (3) согласно (25), (26) приводит к тому, что с ростом ОСШ рассеяние ОМП дальности (24) убывает экспоненциально, т. е. значительно быстрее, чем дисперсия эффективной оценки (10).

При выполнении (18), требуемая величина амплитуды (26) сигнала (3), которая обеспечивает получение минимального рассеяния (24) ОМП дальности, с увеличением ОСШ (13) растет экспоненциально. Однако, для всех источников (генераторов) СШПС характерно ограничение пиковой мощности генерируемого сигнала. Следовательно, возможна ситуация, когда имеющиеся ограничения пиковой мощности не позволяют генерировать СШПС (3) с требуемой величиной амплитуды (26). Поэтому рассмотрим возможность выбора длительности сигнала (3), оптимальной по критерию минимума рассеяния ОМП дальности при ограниченной пиковой мощности, когда амплитуда сигнала (3) удовлетворяет условию

$$a \leq a_m = \text{const.} \quad (27)$$

При наличии ограничения (27) пиковой мощности СШПС (3) выражения (14) и (17) для вероятности надежной оценки и нормированного безусловного рассеяния ОМП дальности перепишем соответственно в виде

$$P_{02} = \left(\frac{z_R \sqrt{\varphi}}{2\pi} \right)^{1/2} \int_0^\infty \exp \left[\frac{2z_R^2 \varphi - x^2}{4} - \frac{d}{\pi \varphi} \exp \left(-\frac{x^2}{2} \right) \right] D_{-1/2}(2zd_R \sqrt{\varphi} - x) x, \quad (28)$$

$$b_2 = \frac{P_{02} \varphi}{4d^2 z_R^2} + \frac{1 - P_{02}}{6}. \quad (29)$$

При больших ОСШ вместо (29), аналогично (22), можно использовать более простое выражение

$$b_2 \cong (\varphi / 4d^2 z_R^2) + (d / 6\pi\varphi\sqrt{3}) \exp(-z_R^2 \varphi / 4). \quad (30)$$

В (28)–(30) обозначено

$$z_R^2 = 2a_m^2 T_R / N_0 \quad (31)$$

— ОСШ для сигнала (3), обладающего длительностью T_R (16) при выполнении условия (27). Очевидно, на интервале времени T_R можно разместить только один сигнал (3) обладающий ОСШ (31).

На рис. 2 сплошной линией 1 представлена зависимость $\varphi_{1 \min}(z)$, рассчитанная по формулам (19), (14), (17) при выполнении (18). Штриховая линия 1 рассчитана по упрощенной формуле (23). Как следует из сопоставления этих линий, использование упрощенной формулы (23) приводит к незначительной погрешности расчета $\varphi_{1 \min}$ (19). Сплошной линией 2 на рис. 2 представлена зависимость $\varphi_{2 \min}(z)$ (32) при $z = z_R \sqrt{\varphi_{2 \min}}$ и выполнении (27). Эта кривая рассчитана по формулам (32), (28), (29). Штриховая линия 2 рассчитана с использованием упрощенной формулы (30) и незначительно отклоняется от сплошной линии 2. Сопоставление кривых 1 и 2 показывает, что оптимальные значения длительности импульса (2) при ограниченной энергии (18) оказываются несколько меньшими, чем оптимальные значения длительности импульса (2) при ограниченной мощности (27).

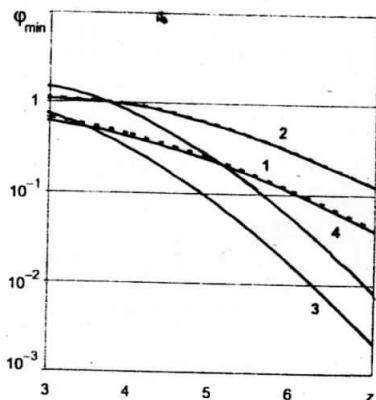


Рис. 2

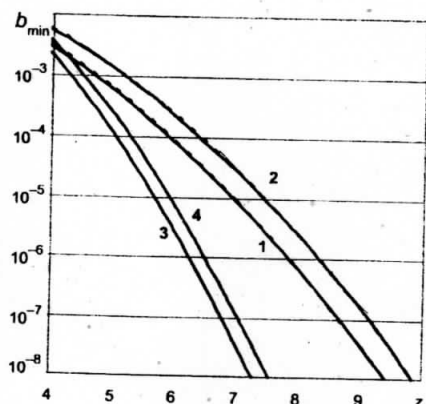


Рис. 3

На рис. 3 сплошной линией 1 показана зависимость $b_{1 \min}(z)$, рассчитанная по формулам (20), (14), (17) при выполнении (18). Штриховая линия 1 рассчитана по упрощенной формуле (24). Сплошной линией 2 на рис. 3 представлена зависимость $b_{2 \min}(z)$ (33) при $z = z_R \sqrt{\varphi_{2 \min}}$ и выполнении (27). Эта кривая рассчитана по формулам (33), (28), (29). Штриховая линия 2 рассчитана с использованием упрощенной формулы (30). Сопоставляя сплошные и штриховые линии, видно, что использование упрощенных формул приводит к незначительным погрешностям расчета минимального относительного рассеяния ОМП дальности. Как следует из рис. 3 минимальное относительное рассеяние ОМП дальности $b_{1 \min}$ (кривая 1) при ограниченной энергии (18) импульса (3) оказывается несколько меньшим, чем минимальное относительное рассеяние $b_{2 \min}$ при ограниченной пиковой мощности (27).

Для сравнения предельной точности ОМП дальности при ограничениях (18) или (27) зависимость $\chi_1(z) = b_{2\min} / b_{1\min}$ приведена на рис. 4 сплошной линией. Эта кривая показывает, что минимальное относительное рассеяние ОМП при ограниченной пиковой мощности возрастает по сравнению с минимальным относительным рассеянием ОМП при ограниченной энергии с увеличением ОСШ. Так, при $z = 7$ рассеяние $b_{2\min}$ приблизительно в 3 раза больше, чем $b_{1\min}$. Возможно, это объясняется тем, что при ограниченной энергии сигнала варьируются два параметра — амплитуда и длительность. Если же ограничена пиковая мощность, то для обеспечения минимума рассеяния оценки варьируется только один параметр — его длительность.

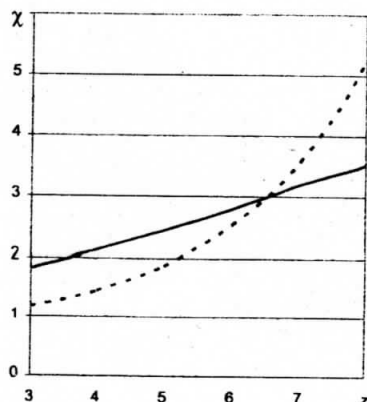


Рис. 4

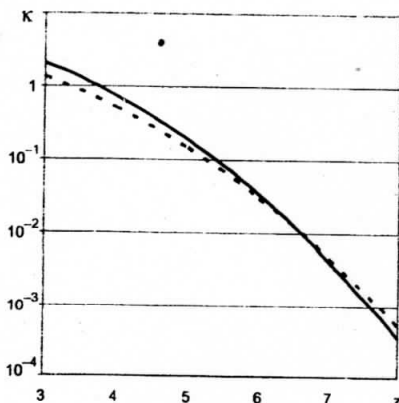


Рис. 5

Рассмотрим предельную точность БО дальности (8). Используя результаты [5], можем записать приближенное выражение для нормированного безусловного рассеяния БО дальности

$$b_3 = \langle (R_B - R_0)^2 \rangle / (R_{\max} - R_{\min})^2 = P_{03} \varphi^2 / 4d^2 z^2 + (1 - P_{03}) / 12, \quad (37)$$

где

$$P_{03} = 1 - (dz / \varphi) \sqrt{2 / \pi} \exp(-z^2 / 2). \quad (38)$$

При не слишком малых ОСШ z последнее выражение можно несколько упростить, положив

$$P_{03} \approx 1 - (dz / \varphi) \sqrt{2 / \pi} \exp(-z^2 / 2). \quad (39)$$

При использовании (39) вместо (38) выражение для нормированного рассеяния БО дальности (37) также несколько упрощается и принимает вид

$$b_3 \equiv (\varphi^2 / 4d^2 z^2) + (dz / 3\varphi\sqrt{2\pi}) \exp(-z^2 / 2). \quad (40)$$

Полагая, что энергия импульса (3) фиксирована, так что выполняется (18), найдем оптимальные значения эквивалентной длительности τ и амплитуды a . Оптимальные параметры сигнала будем искать из условия минимума относительного рассеяния БО (37). Тогда, очевидно, оптимальное значение нормированной длительности (15) импульса (3)

$$\varphi_{3 \min} = \arg \min_{\varphi} b_3, \quad (41)$$

а соответствующее минимальное значение относительного рассеяния БО дальности

$$b_{3 \min} = \min_{\varphi} b_3. \quad (42)$$

Найти аналитически величины (41), (42) можно, используя упрощенную формулу (40). Действительно, решая $[db_3(\varphi) / d\varphi]_{\varphi_{3 \min}} = 0$, находим

$$\varphi_{3 \min} = dz(2 / 9\pi)^{1/6} \exp(-z^2 / 6). \quad (43)$$

Подставляя (43) в (40), получаем

$$b_{3 \min} = (3 / (288\pi))^{1/3} \exp(-z^2 / 3). \quad (44)$$

Используя (13), (15) и (43), находим оптимальные параметры СШПС (3), которые обеспечивают минимальное относительное рассеяние БО дальности. При выполнении (18) сигнал (3) должен обладать длительностью

$$\tau_{3 \min} = T_R \varphi_{3 \min} = (dz(R_{\max} - R_{\min}) / c)(2 / 9\pi)^{1/6} \exp(-z^2 / 6) \quad (45)$$

и амплитудой

$$a_{3 \min} = z\sqrt{N_0 / 2\tau_{3 \min}} = (9\pi / 2)^{1/12} \sqrt{zN_0 c / 2d(R_{\max} - R_{\min})} \exp(z^2 / 12). \quad (46)$$

Таким образом, для обеспечения минимального рассеяния БО дальности при фиксированном ОСШ (18) необходимо выбирать амплитуду и длительность сигнала (3) из соотношений (45), (46).

Положим теперь, что ограничена пиковая мощность сигнала (3), так что его амплитуда удовлетворяет условию (27). При наличии ограничения (27) пиковой мощности СШПС (3) выражения (37) и (38) перепишем как

$$b_4 = (P_{04}\varphi / 4d^2 z^2) + (1 - P_{04}^2) / 12, \quad (47)$$

$$P_{04} = [1 + dz_R \sqrt{2 / \pi\varphi} \exp(-z^2 \varphi)]^{-1}. \quad (48)$$

Оптимальное значение нормированной длительности СШПС (2) при ограничении пиковой мощности (27) определяется как

$$\varphi_{4 \min} = \arg \min_{\varphi} b_4, \quad (49)$$

а соответствующее минимальное значение относительного рассеяния БО дальности как

$$b_{4 \min} = \min_{\varphi} b_4. \quad (50)$$

Получить величины (49), (50) аналитически не удастся. Эти величины можно найти, применяя численные методы. Используя (49), получаем оптимальные параметры СШПС (3), которые обеспечивают минимальное относительное рассеяние БО дальности. При выполнении (27) сигнал (3) должен обладать длительностью

$$\tau_{4 \min} = T_R \varphi_{4 \min} = \varphi_{4 \min} (R_{\max} - R_{\min}) / c \quad (51)$$

и амплитудой a_m (27). Как и ранее, оптимальная длительность изменяется с изменением ОСШ z_R^2 (31) и длины априорного интервала (2) возможных значений дальности.

В качестве примера рассмотрим СШПС, форма которого описывается функцией (35), (36). Для такого СШПС на рис. 2 сплошной линией 3 представлена зависимость $\varphi_{3 \min}(z)$, рассчитанная по формуле (41), (37), (38) при выполнении (18). Расчеты по (43) приводят практически к тем же результатам. Сплошной линией 4 на рис. 2 представлена зависимость $\varphi_{4 \min}(z)$ (50) при $z = z_R \sqrt{\varphi_{4 \min}}$. Сопоставление кривых 3 и 4 на рис. 2 показывает, что оптимальные значения длительности импульса (3) при ограниченной энергии (18) оказываются несколько меньшими, чем оптимальные значения длительности импульса (3) при ограниченной пиковой мощности (27). Из рис. 2 также следует, что оптимальные значения длительности сигнала при использовании БО, когда ОСШ z велико, могут быть заметно меньше, чем оптимальные значения длительности сигнала при использовании ОМП.

На рис. 3 кривой 3 показана зависимость $b_{3 \min}(z)$, рассчитанная по формулам (42), (37), (38) при выполнении (18). Расчеты по упрощенной формуле (44) приводят практически к тем же результатам. Кривой 4 на рис. 3 показана зависимость $b_{4 \min}(z)$ при $z = z_R \sqrt{\varphi_{4 \min}}$ и выполнении (27). Эта кривая рассчитана по формулам (49), (47), (48). Как следует из рис. 3 минимальное относительное рассеяние БО дальности (кривая 3) при ограниченной энергии (18) импульса (3) оказывается несколько меньшим, чем минимальное относительное рассеяние $b_{4 \min}$ (кривая 4) при ограниченной пиковой мощности (27). Сопоставление кривых 1 и 3, а также 2 и 4 показывает, что минимальное рассеяние БО дальности может быть существенно меньше, чем минимальное рассеяние ОМП дальности.

Для сравнения предельной точности БО дальности при ограничениях (18) или (27) на рис. 4 штриховой линией показана зависимость $\chi_2(z) = b_{4 \min} / b_{3 \min}$, откуда следует, что минимальное относительное рассеяние БО при ограниченной пиковой мощности возрастает по сравнению с минимальным относительным рассеянием БО при ограниченной энергии с увеличением ОСШ. Так, при $4 \leq z \leq 7$ рассеяние $b_{4 \min}$ превышает $b_{3 \min}$ в 2...5 раз.

Выигрыш в предельной точности БО дальности по сравнению с предельной точностью ОМП иллюстрирует рис. 5. Сплошная кривая показывает зависимость $\kappa_1(z) = b_{3 \min} / b_{1 \min}$, а штриховая — $\kappa_2(z) = b_{4 \min} / b_{2 \min}$. Согласно рис. 5 применение БО дальности с оптимальными параметрами СШПС приводит к существенному выигрышу в предельной точности измерения дальности по сравнению с применением ОМП при соответствующих оптимальных параметрах СШПС (3). Следует отметить, что при одинаковых параметрах СШПС применение БО и ОМП в условиях высокой апостериорной точности (большие ОСШ) обеспечивает одинаковую точность измерения дальности, которая характеризуется дисперсией эффективной оценки (10) [5].

Таким образом, для достижения предельной точности сверхширокополосной оценки дальности необходимо при заданных $z^2(z_R^2)$ и $R_{\max} - R_{\min}$ выбирать параметры СШПС $a_{i \min}$ и $\tau_{i \min}$ ($i = \overline{1,4}$) согласно (25), (26) или (45), (46) при ограниченной энергии импульса (18) или согласно (27), (34) или (51) при ограниченной пиковой мощности импульса. Соответственно, в блок-схеме измерителя дальности (рис. 1) должен применяться фильтр 1, согласованный с сигналом $a_{i \min} f(t / \tau_{i \min})$, $i = \overline{1,4}$. Использование байесовского алгоритма позволяет существенно повысить точность измерения. Однако, в этом случае структура измерителя оказывается несколько более сложной, чем при использовании алгоритма максимального правдоподобия.

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. Бункин Б. В., Кашин В. А. Особенности, проблемы и перспективы субнаносекундных видеоимпульсных РЛС // Радиотехника. — 1995. — № 4. — С. 128—133.
4. 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.
5. Куликов Е. И., Трифонов А. П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. — М.: Сов. радио, 1978. — 296 с.

Воронежский государственный ун-т.

Поступила в редакцию 16.01.04.