244

ISSN 0021-3470

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ
ЗАВЕДЕНИЙ

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

ВОЕННЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ТОМ 48

3-4
март-апрель

ИЗДАНИЕ
НАЦИОНАЛЬНОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
УКРАИНЫ
«КИЕВСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ»

2005

УДК 621.396

ТРИФОНОВ А. П., БЕСПАЛОВА М. Б.

ПРЕДЕЛЬНАЯ ТОЧНОСТЬ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ОЦЕНОК ДАЛЬНОСТИ И СКОРОСТИ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ РАЗРЫВНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ*

Рассмотрены характеристики оценок максимального правдоподобия с учетом аномальных ошибок. Определены оптимальные параметры последовательности импульсов, которые обеспечивают минимальные ошибки измерения дальности или скорости.

В последние годы новым направлением в теории и технике радиоэлектронных систем является использование в качестве зондирующих сигналов импульсов нано- и пикосекундной длительности [1—7]. Поскольку потенциальная точность измерения дальности или скорости цели пропорциональна длительности зондирующих импульсов [4—6], то применение подобных сигналов позволяет определить дальность с точностью до нескольких сантиметров, а скорость — с точностью до нескольких дециметров в секунду.

В [4] и др. рассматривались оценки максимального правдоподобия (ОМП) дальности и скорости, а в [5] определены оптимальные параметры импульсов, которые обеспечивают минимальные ошибки измерения дальности. При этом предполагалось, что для зондирующих импульсов выполняются обычные условия регулярности [8]. Однако, реальные сверхширокополосные сигналы (СШПС) достаточно часто имеют весьма короткие фронты, что позволяет успешно аппроксимировать их разрывными функциями времени [1—3, 6—8]. В связи с этим рассмотрим характеристики ОМП дальности и скорости с учетом аномальных ошибок и исследуем зависимость точности измерения дальности и скорости от параметров последовательности разрывных импульсов.

Аналогично [7] зондирующую последовательность СШПС запишем как

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

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

где функция $\widetilde{s}(\cdot)$ описывает форму одного импульса, θ — период следования, 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 положение первого импульса последовательности, при $\mu = (N-1)/2$ — временное положение середины последовательности (1), а при $\mu = N-1$ — временное положение последнего импульса. Полагаем, что зондирующая последовательность (1) рассеивается целью с дальностью R_0 и радиальной скоростью V_0, причем

$$R_0 \in [R_{\min}; R_{\max}], V_0 \in [-V_{\max}/2; V_{\max}/2], V_{\max} << c, \qquad (2)$$

где c — скорость света.

Тогда принимаемый сигнал можно записать как [4, 7]

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

$$= a \sum_{k=0}^{N-1} f\{[t - 2R_0/c - (k-\mu)\theta(1 + 2V_0/c)]/\tau\}, \qquad (3)$$

где $a = \max s(t)$ — амплитуда, а $\tau = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t)dt [\max s^2(t)]^{-1}$ — эквивалентная длительность одного импульса, которая, как и в [1—7], не превышает долей наносекунды. Функции $s(\cdot)$ и $f(\cdot)$ в (3) описывают форму одного импульса, причем в общем случае функция $s(\cdot)$ отличается от $\widetilde{s}(\cdot)$ в (1) [1—3]. Функция $f(\cdot)$ нормирована и удовлетворяет условию излучения [1]

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

Обозначим

$$S_f(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) f(x-y)dx \qquad (5)$$

нормированную сигнальную функцию [9] при оценке положения функции (4). Так как СШПС последовательности (3) аппроксимируются разрывными функциями времени, то при $|y| \to 0$ для (5) справедливо асимптотическое представление [8]

$$S_f(y) = 1 - \delta|y| + o(|y|), \delta = \lim_{y \to 0_+} \{[1 - S_f(y)]/y\} > 0. \qquad (6)$$

Пусть рассеянный целью сигнал (3) наблюдается на фоне гауссовского белого шума $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0 и интервал наблюдения $[0,T]$ больше длительности всей последовательности (3), т. е. $T > N\theta$. Скважность последовательности (3) полагаем не слишком малой, так, что отдельные СШПС не перекрываются. Тогда логарифм функционала отношения правдоподобия (ФОП) для (3) определяется выражением [7, 9]

$$L(R,V) = \frac{2a}{N_0} \sum_{k=0}^{N-1} \int_0^T x(t) f\left[\frac{t - 2R/c - (k-\mu)\theta(1+2V/c)}{\tau}\right] \mathrm{d}t, \tag{7}$$

где $x(t) = s_N(t, R_0, V_0) + n(t)$ — реализация наблюдаемых данных.

Найдем вначале предельную точность ОМП дальности $\hat{R}$ при априори известной скорости цели V_0. Согласно [9]

$$\hat{R} = \arg\sup L(R), R \in [R_{\min}, R_{\max}], \tag{8}$$

где $L(R) = L(R, V_0)$, а $L(R,V)$ определяется из (7). Полагаем далее, что априорный интервал (2) возможных значений дальности не превосходит интервала однозначного измерения дальности [4], т. е. $R_{\max} - R_{\min} < c\theta/2$, а истинное значение неизвестной дальности R_0 распределено равновероятно в интервале $[R_{\min}; R_{\max}]$. Будем описывать точность измерения дальности величиной безусловного рассеяния (среднего квадрата ошибки) ОМП дальности. При сделанных предположениях из [6] имеем приближенное выражение для безусловного рассеяния ОМП дальности (8)

$$B(\hat{R}) = \left\langle \left(\hat{R} - R_0\right)^2 \right\rangle = (1 - P_{aR}) D(\hat{R}) + P_{aR} (R_{\max} - R_{\min})^2 / 6. \tag{9}$$

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

$$D(\hat{R}) = 13c^2\tau^2 / 8\delta^2 z^4 = 13c^2\tau^2 / 8\delta^2 N^2 z_1^4 \tag{10}$$

— дисперсия надежной оценки [6, 9];

$$z^2 = 2Na^2\tau / N_0 = Nz_1^2 \tag{11}$$

— отношение сигнал/шум (ОСШ) для последовательности (3);

$$z_1^2 = 2a^2\tau / N_0 \tag{12}$$

— ОСШ для одного СШПС.

Величина $P_{aR} = P\left[\left|\hat{R} - R_0\right| > c\tau / 2\delta\right]$ — вероятность аномальной ошибки [9], которая имеет вид [6]

$$P_{aR} \cong 2z \exp\left(\frac{3z^2}{2}\right) \int_1^\infty \left\{1 - \exp\left[-\delta m \sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)\right]\right\} \times$$

$$\times\left[\exp(-zx)\Phi(x-2z)-\exp\left(\frac{5z^2}{2}-2zx\right)\Phi(x-3z)\right]\mathrm{d}x, \qquad (13)$$

где

$$m=\left(R_{\max}-R_{\min}\right)/\,c\tau \qquad (14)$$

— число импульсов с пространственной длиной $c\tau$, которые размещаются в априорном интервале возможных значений дальности (2), а

$$\Phi(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int\limits_{-\infty}^{x}\exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)\mathrm{d}t \qquad (15)$$

— интеграл вероятности. Формулы (9), (13) являются приближенными, однако их точность возрастает с увеличением параметра m (14) и ОСШ z (11). Согласно (10), дисперсия надежной оценки дальности при зондировании разрывными импульсами с ростом ОСШ убывает как z^{-4}, а с увеличением числа импульсов N в последовательности (3) — как N^{-2}. В тоже время, при зондировании регулярными импульсами, дисперсия надежной оценки дальности [4, 5] с ростом ОСШ убывает лишь как z^{-2}, а с увеличением числа импульсов — лишь как N^{-1}.

В дальнейшем удобно рассматривать нормированное безусловное рассеяние оценки дальности

$$b_R=B\left(\hat{R}\right)/\,(R_{\max}-R_{\min})^2=(1-P_{aR})D\left(\hat{R}\right)/\,(R_{\max}-R_{\min})^2+P_{aR}\,/\,6, \qquad (16)$$

определяющее средний квадрат относительной ошибки измерения дальности. Полагая, что энергия импульсов последовательности (3) фиксирована, так что ОСШ (11), (12) постоянны

$$z^2=\mathrm{const},\quad z_1^2=\mathrm{const}, \qquad (17)$$

исследуем возможность оптимального выбора параметров СШПС последовательности (3) — эквивалентной длительности τ и амплитуды a.

Оптимальное значение эквивалентной длительности будем искать из условия минимума относительного рассеяния (16). Тогда очевидно, оптимальное значение эквивалентной длительности СШПС последовательности (3)

$$\tau_{R\,\mathrm{opt}}=\arg\min_{\tau} b_R\,, \qquad (18)$$

а соответствующее минимальное значение относительного рассеяния ОМП дальности

$$b_{R\,\min}=\min_{\tau} b_R\,. \qquad (19)$$

Получить аналитически величины (18), (19) в общем случае не удается вследствие относительно сложной зависимости вероятности аномальной ошибки (13) от τ. Величины $\tau_{R\,\mathrm{opt}}$ и $b_{R\,\min}$ всегда можно найти, используя численные методы. Однако, необходимость многократного вычисления интеграла (13) приводит к существенным затратам машинного времени. С целью упрощения процедуры определения $\tau_{R\,\mathrm{opt}}$ и $b_{R\,\min}$ найдем простую верхнюю границу для вероятности аномальной ошибки (13). Воспользовавшись неравенством

$$1-\exp(-x)\le x, x\ge 0 \tag{20}$$

из (13) имеем

$$P_{aR}\le P_{aR}^{*}=4z\delta m\exp\left(-z^{2}/4\right)/15\sqrt{\pi}. \tag{21}$$

Если ОСШ (11) достаточно велико, так что $P_{aR}\le 0{,}05\ldots 0{,}1$, то для приближенного расчета $\tau_{R\,\mathrm{opt}}$ и $b_{R\,\min}$ можно использовать упрощенный вариант формулы (16) с подстановкой (21)

$$b_{R}=\frac{13c^{2}\tau^{2}}{8\left(R_{\max}-R_{\min}\right)^{2}\delta^{2}z^{4}}+\frac{2\delta z\left(R_{\max}-R_{\min}\right)}{45c\tau\sqrt{\pi}}\exp\left(-\frac{z^{2}}{4}\right). \tag{22}$$

Минимизацию относительного безусловного рассеяния ОМП дальности (22) по эквивалентной длительности τ можно выполнить аналитически. Действительно, решая уравнение $\left[db_{R}(\tau)/d\tau\right]_{\tau_{R\,\mathrm{opt}}}=0$, имеем

$$\tau_{R\,\mathrm{opt}}=\frac{2\delta\left(R_{\max}-R_{\min}\right)z^{5/3}}{c\left(585\sqrt{\pi}\right)^{1/3}}\exp\left(-\frac{z^{2}}{12}\right). \tag{23}$$

Подставляя (23) в (22), получаем для (19) выражение

$$b_{R\,\min}=\frac{1}{2}\left(\frac{13}{75\pi z^{2}}\right)^{1/3}\exp\left(-\frac{z^{2}}{6}\right). \tag{24}$$

Используя (11) и (23), находим оптимальную амплитуду СШПС (3), которая при длительности (23) обеспечивает минимальное относительное рассеяние ОМП дальности

$$a_{R\mathrm{opt}}=z\sqrt{\frac{N_{0}}{2N\tau_{R\,\mathrm{opt}}}}=\frac{1}{2}\left(585z\sqrt{\pi}\right)^{1/6}\sqrt{\frac{cN_{0}}{N\delta\left(R_{\max}-R_{\min}\right)}}\exp\left(\frac{z^{2}}{24}\right). \tag{25}$$

Таким образом, для обеспечения минимального рассеяния ОМП дальности при зондировании разрывными импульсами и фиксированном ОСШ (17), необходимо выбирать длительность и амплитуду СШПС последовательности

(3) из соотношений (23) и (25) соответственно. Оптимальные параметры импульсов последовательности (3) изменяются с изменением ОСШ (11) и длины априорного интервала (2) возможных значений дальности. Выбор оптимальных параметров СШПС последовательности (3) согласно (23), (25) приводит к тому, что с ростом ОСШ рассеяние ОМП дальности (24) убывает экспоненциально, т. е. значительно быстрее, чем дисперсия надежной оценки (10).

В [5] рассмотрена предельная точность ОМП дальности при использовании регулярных СШПС. Показано, что при фиксированном ОСШ минимальное относительное безусловное рассеяние ОМП дальности определяется выражением [5]

$$b_{1\,\min} = \left[3 / \left(24\pi z\sqrt{3}\right)^{2/3}\right] \exp\left(-z^2 / 6\right). \tag{26}$$

Из (24) и (26) находим, что

$$b_{R\,\min} / b_{1\,\min} = 2\left(13\pi / 75\right)^{1/3} \cong 1{,}63. \tag{27}$$

Следовательно, несмотря на то, что дисперсия надежной ОМП дальности при зондировании разрывными импульсами с ростом ОСШ убывает значительно быстрее, чем дисперсия надежной ОМП дальности при зондировании регулярными импульсами, предельная точность ОМП дальности при зондировании регулярными импульсами оказывается несколько выше. Действительно, из (27) видим, что минимальное рассеяние ОМП дальности при зондировании разрывными импульсами приблизительно на 63% больше, чем при зондировании регулярными импульсами. Это объясняется несколько более высоким уровнем аномальных ошибок при использовании разрывных импульсов [8].

Найдем теперь предельную точность ОМП скорости $\hat{V}$ при априори известной дальности цели R_0. Согласно [9]

$$\hat{V} = \arg\sup L(V), V \in \left[-V_{\max} / 2; V_{\max} / 2\right], \tag{28}$$

где

$$L(V) = L(R_0, V), \tag{29}$$

а $L(R,V)$ определяется из (7). Для расчета характеристик ОМП скорости (28), подставим в (29) реализацию наблюдаемых данных и преобразуем к виду [7, 9]

$$L(V) = z^2 S(V_0, V) + zN(V), \tag{30}$$

где z^2 — ОСШ (11), а сигнальная функция

$$S(V_0, V) = \sum_{k=0}^{N-1} S_f\left[2\theta(k-\mu)(V_0 - V) / c\tau\right] / N. \tag{31}$$

Шумовая функция $N(V)$ в (30) представляет собой реализацию стационарного гауссовского центрированного случайного процесса, корреляционная функция которого $\langle N(V_1)N(V_2)\rangle = S(V_1, V_2)$ [7].

Обозначим ΔV длительность сигнальной функции (31), так что $S(V_0, V_0 \pm \Delta V) \cong 0$. Тогда при $\hat{V} \in [V_0 - \Delta V; V_0 + \Delta V]$ ОМП (28) является надежной [8]. Полагаем далее, что суммарное ОСШ (11) для всей последовательности (3) достаточно велико, так что надежная ОМП обладает высокой апостериорной точностью [9]. Тогда необходимо исследовать поведение логарифма ФОП (29), (30) в малой окрестности истинного значения скорости V_0 [8]. Учитывая (6) для (31) при $|V - V_0| \to 0$ аналогично [7] имеем $S(V_0, V) = 1 - 2A_N(\mu)\delta|V - V_0|\theta / c\tau + o(|V - V_0|)$, где

$$A_N(\mu) = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}|k - \mu|. \tag{32}$$

Будем полагать, что априорный интервал возможных значений скорости (2) достаточно велик, так что $V_{\max} >> \Delta V$, а истинное значение скорости V_0 распределено равновероятно в априорном интервале (2). Установленные свойства логарифма ФОП (29) и сделанные предположения позволяют записать асимптотическое выражение для безусловного рассеяния (среднего квадрата ошибки) ОМП скорости (28). Действительно, применяя метод локально — марковской аппроксимации [8], получаем

$$B(\hat{V}) = \left\langle \left(\hat{V} - V_0\right)^2 \right\rangle = (1 - P_{aV})D(\hat{V}) + P_{aV}V_{\max}^2 / 6. \tag{33}$$

Здесь усреднение выполняется по всем возможным значениям случайных величин $\hat{V}$ и V_0, а

$$D(\hat{V}) = \frac{13c^2\tau^2}{8z^4A_N^2(\mu)\delta^2\theta^2} = \frac{13c^2\tau^2}{8z_1^4N^2A_N^2(\mu)\delta^2\theta^2} \tag{34}$$

— дисперсия надежной оценки. Величина $P_{aV} = P\left[\left|\hat{V} - V_0\right| > \Delta V\right]$ — вероятность аномальной ошибки [9], которая имеет вид

$$P_{aV} = 2z\exp\left(\frac{3z^2}{2}\right)\int_1^\infty \left\{1 - \exp\left[-\gamma\delta A_N(\mu)\exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)\sqrt{\frac{2}{\pi}}\right]\right\} \times$$
$$\times\left[\exp(-zx)\Phi(x - 2z) - \exp\left(\frac{5z^2}{2} - 2zx\right)\Phi(x - 3z)\right]\mathrm{d}x. \tag{35}$$

В (35) $\Phi(x)$ — интеграл вероятности (15), $\gamma = V_{\max}\theta / c\tau$ — отношение максимально возможного перемещения цели за период следования импульсов последовательности (3) к пространственной длине одного импульса. Формулы (33), (35) являются приближенными, однако их точность возрастает с увеличением параметра $m_V = 2\gamma\delta A_N(\mu)$ и ОСШ z (11). Согласно (34) дисперсия надежной оценки скорости при зондировании разрывными импульсами с ростом ОСШ убывает как z^{-4}, в то время как при зондировании регулярными импульсами дисперсия надежной оценки скорости убывает лишь как z^{-2} [4]. Величина (32), которая входит в выражение для дисперсии надежной оценки скорости (34), при большом числе импульсов в последовательности (3) пропорциональна N. Поэтому с ростом числа N импульсов дисперсия надежной оценки скорости (34) убывает как N^{-4}. Если же для зондирования используются регулярные импульсы, то дисперсия надежной оценки скорости, с ростом числа импульсов N в последовательности (3) убывает лишь как N^{-3} [4].

В дальнейшем удобно рассматривать нормированное безусловное рассеяние оценки скорости

$$b_V = B\left(\hat{V}\right) / V_{\max}^2 = (1 - P_{aV})D\left(\hat{V}\right) / V_{\max}^2 + P_{aV} / 6, \tag{36}$$

определяющее средний квадрат относительной ошибки измерения скорости. Полагая, что энергия импульсов последовательности (3) фиксирована, так что ОСШ постоянно (17) исследуем возможность оптимального выбора параметров последовательности (3) — периода следования θ, эквивалентной длительности τ и амплитуды a.

Оптимальное значение периода следования будем искать из условия минимума относительного рассеяния (36), тогда, очевидно, оптимальное значение периода следования СШПС последовательности (3)

$$\theta_{\text{opt}} = \arg\min_{\theta} b_V, \tag{37}$$

а соответствующее минимальное значение относительного рассеяния ОМП скорости

$$b_{V\min} = \min_{\theta} b_V. \tag{38}$$

Получить аналитически величины (37), (38) в общем случае не удается вследствие относительно сложной зависимости вероятности аномальной ошибки (35) от θ. Величины θ_{opt} и $b_{V\min}$ всегда можно найти, используя численные методы. Однако, необходимость многократного вычисления интеграла (35) приводит к существенным затратам машинного времени. С целью упрощения процедур определения θ_{opt} и $b_{V\min}$ найдем простую верхнюю границу для вероятности аномальной ошибки (35). Воспользовавшись неравенством (20) из (35) имеем

$$P_{aV} \le P^{*}_{aV} = 4z\gamma\delta A_N(\mu)\exp\left(-z^2/4\right)/15\sqrt{\pi}. \qquad (39)$$

Если ОСШ (11) достаточно велико, так что $P_{aV} \le 0{,}05\ldots0{,}1$, то для приближенного расчета θ_{opt} и $b_{V\,\min}$ можно использовать упрощенный вариант формулы (36) с подстановкой (39)

$$b_V = \frac{13c^2\tau^2}{8z^4A_N^2(\mu)\delta^2\theta^2V_{\max}^2} + \frac{2zV_{\max}\theta\delta A_N(\mu)}{45c\tau\sqrt{\pi}}\exp\left(-\frac{z^2}{4}\right). \qquad (40)$$

Минимизацию относительного безусловного рассеяния ОМП скорости (40) по периоду следования θ можно выполнить аналитически. Действительно, решая уравнение $\left[\mathrm{d}b_V(\theta)/\mathrm{d}\theta\right]_{\theta_{\text{opt}}} = 0$, находим

$$\theta_{\text{opt}} = \frac{c\tau}{2\delta A_N(\mu)V_{\max}}\left(\frac{585\sqrt{\pi}}{z^5}\right)^{1/3}\exp\left(z^2/12\right). \qquad (41)$$

Подставляя (41) в (40), получаем для (38) выражение

$$b_{V\,\min} = \frac{1}{2}\left(\frac{13}{75\pi z^2}\right)^{1/3}\exp\left(-z^2/6\right). \qquad (42)$$

Отметим, что асимптотическое значение минимального относительного рассеяния ОМП скорости (42) совпадает с асимптотическим значением минимального относительного рассеяния ОМП дальности (24).

Таким образом, для обеспечения минимального рассеяния ОМП скорости при фиксированном ОСШ (17), необходимо выбирать период следования импульсов из соотношения (41). Оптимальный период следования импульсов изменяется с изменением ОСШ (11) и длины априорного интервала (2) возможных значений скорости. Выбор периода следования импульсов согласно (41) приводит к тому, что с ростом ОСШ рассеяние ОМП скорости (42) убывает экспоненциально, т. е. значительно быстрее, чем дисперсия надежной оценки (34).

При выполнении (17) требуемая оптимальная величина периода следования (41) импульсов последовательности (3), которая обеспечивает получение минимального рассеяния ОМП скорости, с увеличением ОСШ (11) растет экспоненциально. Однако, рост θ_{opt} может привести к существенному увеличению времени измерения, что не всегда желательно. Если время измерения, и соответственно, период следования, фиксированы

$$\theta = \text{const}, \qquad (43)$$

то минимизацию относительного рассеяния ОМП скорости (35), (40) можно обеспечить, выбирая эквивалентную длительность импульса последовательности (3) из условия

$$\tau_{V\,\mathrm{opt}} = \min_{\tau} b_V . \tag{44}$$

Минимизацию относительного безусловного рассеяния ОМП скорости (40) по эквивалентной длительности τ можно выполнить аналитически. Действительно, решая уравнение $\left[\mathrm{d}b_V(\tau)/\mathrm{d}\tau\right]_{\tau_{V\,\mathrm{opt}}} = 0$, находим для (44)

$$\tau_{V\,\mathrm{opt}} = \frac{2\delta A_N(\mu)\theta V_{\max} z^{5/3}}{c\left(585\sqrt{\pi}\right)^{1/3}} \exp\left(-z^2/12\right). \tag{45}$$

Подставляя (45) в (40), опять получаем выражение (42) для минимального безусловного относительного рассеяния ОМП скорости. Используя (11) и (45), находим оптимальную амплитуду СШПС (3), которая при длительности (45) обеспечивает минимальное относительное безусловное рассеяние ОМП скорости

$$a_{V\,\mathrm{opt}} = \frac{1}{2}\left(585z\sqrt{\pi}\right)^{1/6} \sqrt{\frac{cN_0}{\delta A_N(\mu)\theta V_{\max}}} \exp\left(\frac{z^2}{24}\right). \tag{46}$$

Таким образом, для обеспечения минимального относительного рассеяния ОМП скорости при фиксированном ОСШ (17) и ограниченном времени наблюдения (43), необходимо выбирать эквивалентную длительность и амплитуду СШПС последовательности (3) из соотношений (45), (46). Оптимальные параметры импульсов последовательности (3) изменяются с изменением ОСШ (11), длины априорного интервала (2) возможных значений скорости и числа импульсов последовательности (32). Выбор оптимальных параметров последовательности СШПС (3) согласно (45), (46) приводит к тому, что с ростом ОСШ рассеяние ОМП скорости (42) убывает экспоненциально, т. е. значительно быстрее, чем дисперсия надежной оценки (34).

Для минимальных рассеяний оценки скорости при зондировании разрывными и регулярными импульсами справедлива формула (27). Поэтому, как и при оценке дальности, предельная точность оценки скорости при зондировании регулярными импульсами оказывается несколько выше, чем при зондировании разрывными импульсами.

Соответствующим выбором эквивалентной длительности τ (и соответственно, амплитуды a) можно обеспечить минимум относительного рассеяния ОМП дальности или скорости. В общем случае, оптимальные значения эквивалентной длительности импульсов последовательности (3) при оценке дальности или скорости имеют различную величину. Действительно, из (23) и (45) имеем

$$\tau_{R\,\mathrm{opt}} / \tau_{V\,\mathrm{opt}} = \left(R_{\max} - R_{\min}\right) / A_N(\mu)\theta V_{\max} . \tag{47}$$

В частном случае $\mu = 0$, $A_N(0) = (N-1)/2$ и (47) принимает вид

$$\tau_{R\,\mathrm{opt}} / \tau_{V\,\mathrm{opt}} = 2(R_{\max} - R_{\min}) / \Delta R_{\max}. \qquad (48)$$

Здесь $\Delta R_{\max} = (N-1)\theta V_{\max}$ — максимально возможное перемещение цели за время облучения. Очевидно, всегда должно быть $\Delta R_{\max} < R_{\max} - R_{\min}$, иначе цель за время облучения выйдет из априорного интервала возможных значений дальности (2). Следовательно, в (48) всегда $\tau_{R\,\mathrm{opt}} / \tau_{V\,\mathrm{opt}} > 2$ и для минимизации рассеяния оценки скорости эквивалентная длительность импульсов последовательности (3) должна быть более, чем в 2 раза меньше, чем эквивалентная длительность, которая обеспечивает минимальное рассеяние оценки дальности.

Таким образом, для достижения предельной точности сверхширокополосной оценки дальности необходимо при заданных z^2 и $\Delta R_{\max} < R_{\max} - R_{\min}$, выбирать параметры СШПС последовательности (3) $\tau_{R\,\mathrm{opt}}$ и $a_{R\,\mathrm{opt}}$ согласно (23) и (25). Соответственно, для достижения предельной точности сверхширокополосной оценки скорости при заданных z^2 и $V_{\max}$ необходимо выбирать период следования из (41). Если же заданы $z_1^2, V_{\max}$ и θ, то параметры СШПС $\tau_{V\,\mathrm{opt}}$ и $a_{V\,\mathrm{opt}}$ необходимо выбирать согласно (45) и (46).

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, 5.— 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. *Трифонов А. П., Беспалова М. Б., Кузнецов А. В.* Предельная точность сверхширокополосной оценки дальности // Радиоэлектроника.— 2004.— Т. 47.— №6.— С. 3—14. (Изв. вузов).

6. *Трифонов А. П., Беспалова М. Б.* Сверхширокополосная оценка дальности при зондировании последовательностью разрывных импульсов // Радиоэлектроника.— 1999.— Т. 42.— №7.— С. 31—41. (Изв. вузов).

7. *Трифонов А. П., Беспалова М. Б.* Сверхширокополосное обнаружение цели при зондировании разрывными импульсами // Радиоэлектроника.— 2003.— Т. 46.— №5.— С. 3—10. (Изв. вузов).

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

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

Воронежский государственный университет. Поступила в редакцию 18.10.04.