

147

147

p-6264/
995/38/3-4

62.

ISSN 0021 — 3470

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ
ЗАВЕДЕНИЙ

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

ТОМ 38

3-4

ИЗДАНИЕ
КИЕВСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА

1995

ТРИФОНОВ А. П., БЕСПАЛОВА М. Б.

Пороговые характеристики оценок дальности и скорости при зондировании последовательностью оптических импульсов

Найдены разрешающая способность по дальности и скорости, а также характеристики оценок максимального правдоподобия с учетом аномальных ошибок. Рассмотрено влияние ограничения пиковой мощности импульсов на характеристики оценок.

В системах оптической локации широко применяются последовательности оптических импульсов [1, 2]. В [2] найдены характеристики совместно-эффективных оценок дальности и скорости при зондировании последовательностью оптических импульсов. Однако для решения многих локационных задач необходимо знать не только потенциальную точность оценок дальности и скорости, но и разрешающую способность зондирующего сигнала по этим параметрам [3]. Кроме того, полученные в [2] выражения для характеристик совместно-эффективных оценок, могут быть использованы для расчета характеристик асимптотически эффективных оценок дальности и скорости лишь в условиях высокой апостериорной точности, когда отсутствуют аномальные ошибки [4]. Рассмотрим пороговые характеристики оценок максимального правдоподобия (ОМП) дальности и скорости, учитывая обычно имеющие место ограничения времени зондирования, пиковой мощности импульсов и энергии зондирующей последовательности.

Положим, что излучается последовательность оптических импульсов с интенсивностью

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} s_k \{ [t - (k + \mu)\theta - \lambda] / \tau \} = \sum_{k=0}^{N-1} a_k f \{ [t - (k + \mu)\theta - \lambda] / \tau \}, \quad (1)$$

где a_k — максимальная интенсивность одного импульса, θ — период следования, λ — временное положение, $\tau = \int_{-\infty}^{\infty} s_k^2(t) dt [\max s_k^2(t)]^{-1}$ — эквивалентная длительность одного импульса последовательности. Функция $f(x) \geq 0$ в (1) описывает форму интенсивности одного импульса

последовательности и нормирована так, что $\max f(x) = 1, \int_{-\infty}^{\infty} f^2(x) dx = 1$.

Значение μ определяет, с какой точкой последовательности связано ее временное положение λ [2].

В результате рассеяния зондирующей последовательности с интенсивностью (1) точечной целью, интенсивность принимаемого сигнала будет иметь вид

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

где R_0 — дальность, V_0 — скорость цели, c — скорость света, причем неизвестная дальность принимает значения из интервала $[R_{\min}, R_{\max}]$, неизвестная скорость — из интервала $[-V_{\max}/2, V_{\max}/2]$ и $V_{\max}/c \ll 1$. Пусть сигнал с интенсивностью (2) наблюдается на фоне оптического шума с интенсивностью ν и интервал наблюдения $[0, T]$ больше длительности всей последовательности, т. е. $T > N\theta$. Тогда обработке доступна реализация $\pi(t)$ пуассоновского процесса с интенсивностью $\nu + s(t, R_0, V_0)$ [1, 2]. Скважность последовательности (2) полагаем не слишком малой ($\theta/\tau > 2 \dots 3$), так что отдельные импульсы не перекрываются. В этом случае логарифм функционала отношения правдоподобия (ФОП) с точностью до несущественной постоянной определяется формулой [1, 5]

$$L(R, V) = \sum_{k=0}^{N-1} \int_0^T \ln [1 + a_k f \{ [t - 2R/c - (k + \mu)\theta(1 + 2V/c)] / \tau \} / \nu] d\pi(t). \quad (3)$$

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

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

где

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

— априорная область возможных значений дальности и скорости.

Для определения характеристик ОМП (4) представим (3) в виде суммы сигнальной и шумовой функций [4]

$$L(R, V) = S(R, V) + N(R, V) + C,$$

$$S(R, V) = M\{L(R, V)\} - C = \tau \sum_{k=0}^{N-1} a_k \int_{-\infty}^{\infty} f\{x + 2[(R - R_0) + (k + \mu)\theta(V - V_0)]/c\tau\} \ln[1 + a_k f(x)/\nu] dx, \\ C = \nu \tau \sum_{k=0}^{N-1} \int_{-\infty}^{\infty} \ln[1 + a_k f(x)/\nu] dx. \quad (6)$$

Шумовая функция $N(R, V) = L(R, V) - M\{L(R, V)\}$ является реализацией случайного поля, причем,

$$M\{N(R, V)\} = 0, K(R_1, R_2, V_1, V_2) = M\{N(R_1, V_1)N(R_2, V_2)\} = \\ = \tau \sum_{k=0}^{N-1} \int_{-\infty}^{\infty} [\nu + a_k f\{x - [2R_0/c + (k + \mu)\theta(1 + 2V_0/c)]/\tau\}] \ln[1 + a_k f\{x - [2R_1/c + (k + \mu)\theta(1 + 2V_1/c)]/\tau\}] \ln[1 + a_k f\{x - [2R_2/c + (k + \mu)\theta(1 + 2V_2/c)]/\tau\}] dx. \quad (7)$$

При выводе сигнальной функции и корреляционной функции шумовой функции предполагалось, что

$$|R - R_0| < c\theta/2, |V - V_0| \ll c. \quad (8)$$

Поэтому формулы (6), (7) описывают центральные пики соответствующих функций [4]. Нетрудно убедиться, что сигнальная функция (6) для всей последовательности (2) достигает максимума при $R = R_0, V = V_0$. Следовательно, выходное отношение сигнал—шум (ОСШ) будет равно [4]

$$z_N^2 = S^2(R_0, V_0) / K(R_0, R_0, V_0, V_0) = \tau \left[\sum_{k=0}^{N-1} \psi_1(a_k) \right]^2 \times \\ \times \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} [\nu \psi_N(a_k) + \psi_2(a_k)] \right\}^{-1} = z^2 / (1 + \kappa^2). \quad (9)$$

Здесь

$$\psi_m(a) = a \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \{\ln[1 + a f(x)/\nu]\}^m dx, \quad m = 1, 2. \\ \psi_N(a) = \int_{-\infty}^{\infty} \{\ln[1 + a f(x)/\nu]\}^2 dx, \quad (10)$$

$$z^2 = \tau \left[\sum_{k=0}^{N-1} \psi_1(a_k) \right]^2 / \nu \sum_{k=0}^{N-1} \psi_N(a_k),$$

$$\kappa^2 = \sum_{k=0}^{N-1} \psi_2(a_k) / \nu \sum_{k=0}^{N-1} \psi_N(a_k).$$

Согласно [4], ОМП (4) обладают высокой апостериорной точностью, если ОСШ (9) достаточно велико.

Найдем разрешающую способность зондирующего сигнала (1) по дальности и скорости. При выполнении (8), разрешающую способность по дальности и скорости можно приближенно определить как полуширину параболической аппроксимации сечения сигнальной функции по соответствующему параметру, отсчитываемую на половинном уровне от максимума [3]. Так, сечение сигнальной функции (6) по дальности получаем, полагая $V = V_0$. Тогда разрешающая способность по дальности ΔR может быть найдена из уравнения

$$S(R_0 + \Delta R, V_0) = S(R_0, V_0) / 2. \quad (11)$$

Для приближенного расчета ΔR аппроксимируем сечение сигнальной функции параболой. Тогда уравнение (11) принимает вид $[\partial^2 S(R, V_0) / \partial R^2]_{R_0} \Delta R^2 = S(R_0, V_0)$, откуда находим

$$\Delta R = \{-S(R_0, V_0) / [\partial^2 S(R, V_0) / \partial R^2]_{R_0}\}^{1/2}. \quad (12)$$

Подставляя (6) в (12) и выполняя дифференцирование, для приближенного значения разрешающей способности по дальности, получаем выражение

$$\Delta R = c\tau \left[\sum_{k=0}^{N-1} \psi_1(a_k) / \sum_{k=0}^{N-1} F(a_k) \right]^{1/2} / 2. \quad (13)$$

Здесь $\psi_1(a)$ определяется из (10) и, согласно [2],

$$F(a) = a^2 \int_{-\infty}^{\infty} [df(x) / dx]^2 [1 + af(x)/\nu]^{-1} dx / \nu.$$

Совершенно аналогично, для приближенного значения разрешающей способности по скорости ΔV имеем

$$\Delta V = c\tau \left[\sum_{k=0}^{N-1} \psi_1(a_k) / \sum_{k=0}^{N-1} (k+\mu)^2 F(a_k) \right]^{1/2} / 2\theta. \quad (14)$$

Используя введенные величины разрешающей способности по дальности и скорости, дисперсии соответственно отдельных и совместных эффективных оценок [2] можно переписать в виде

$$D(R) = \Delta R^2 / \tau \sum_{k=0}^{N-1} \psi_1(a_k), \quad D(V) = \Delta V^2 / \tau \sum_{k=0}^{N-1} \psi_1(a_k), \quad (15)$$

$$D_V(R) = \Delta R^2 / \tau (1 - \rho^2) \sum_{k=0}^{N-1} \psi_1(a_k),$$

$$D_R(V) = \Delta V^2 / \tau (1 - \rho^2) \sum_{k=0}^{N-1} \psi_1(a_k), \quad (16)$$

где

$$\rho = - \sum_{k=0}^{N-1} (k+\mu) F(a_k) \left[\sum_{k=0}^{N-1} F(a_k) \sum_{k=0}^{N-1} (k+\mu)^2 F(a_k) \right]^{-1/2} \quad (17)$$

— коэффициент корреляции совместно-эффективных оценок дальности и скорости. Согласно (15), (16) дисперсии эффективных оценок убывают по мере улучшения разрешающей способности.

Пороговые свойства ОМП зависят от вероятности надежной оценки [3, 4]

$$P_0 = P [\hat{R}, \hat{V} \in W_S], \quad (18)$$

где $W_S = \{ [R_0 - \Delta R, R_0 + \Delta R], [V_0 - \Delta V, V_0 + \Delta V] \}$ — подобласть априорной области (5) возможных значений дальности и скорости, в которой центральный пик сигнальной функции (6) существенно отличается от нуля.

Приближенное значение вероятности надежной оценки (18) удастся найти, если допустима гауссовская аппроксимация распределения логарифма ФОП (3). Распределение логарифма ФОП (3) можно аппроксимировать гауссовским распределением, если выполняются условия [5].

$$(N\nu + \sum_{k=0}^{N-1} a_k) \tau \gg 1, \quad N\nu \tau \gg 1. \quad (19)$$

Пусть кроме того априорная область возможных значений дальности и скорости содержит много элементов разрешения, так что

$$(R_{\max} - R_{\min}) / \Delta R \gg 1, V_{\max} / \Delta V \gg 1. \quad (20)$$

Тогда, используя результаты [3, 4], получаем

$$P_0 = \int_1^{\infty} \exp \{ -(x-z)^2 / 2(1+\kappa^2) - \xi x \exp(-x^2/2) \times \\ \times (2\pi \sqrt{2\pi})^{-1} \} dx / \sqrt{2\pi(1+\kappa^2)}, \quad (21)$$

где z и κ^2 определяются из (10), а

$$\xi = 4\theta(R_{\max} - R_{\min}) V_{\max} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} F_N(a_k) \sum_{k=0}^{N-1} k^2 F_N(a_k) - \right. \\ \left. - \left[\sum_{k=0}^{N-1} k F_N(a_k) \right]^2 \right\}^{1/2} [c^2 \tau^2 \nu \sum_{k=0}^{N-1} \psi_N(a_k)]^{-1}, \quad (22)$$

$$F_N(a) = a^2 \int_{-\infty}^{\infty} [df(x)/dx]^2 [1 + af(x)/\nu]^{-2} dx / \nu.$$

Согласно [3] при выполнении (19) условные смещение (систематическая ошибка) и рассеяние (средний квадрат ошибки) ОМП дальности и скорости (4) имеют вид

$$b(\hat{R} | R_0, V_0) = M \{ \hat{R} - R_0 \} = (1 - P_0) [(R_{\min} + R_{\max}) / 2 - R_0],$$

$$b(\hat{V} | R_0, V_0) = M \{ \hat{V} - V_0 \} = -(1 - P_0) V_0,$$

$$B(\hat{R} | R_0, V_0) = M \{ [\hat{R} - R_0]^2 \} = P_0 D_V(R) + (1 - P_0) [(R_{\min}^2 + \\ + R_{\min} R_{\max} + R_{\max}^2) / 3 - R_0 (R_{\min} + R_{\max}) + R_0^2], \quad (23)$$

$$B(\hat{V} | R_0, V_0) = M \{ [\hat{V} - V_0]^2 \} = P_0 D_R(V) + (1 - P_0) (V_0^2 + V_{\max}^2 / 12).$$

Формула (21) 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 (21) имеем аналогично [3]

$$P_a \leq P_a^* = \xi z \exp[-z^2 / 2(2 + \kappa^2)] [2\pi(2 + \kappa^2)]^{-3/2}. \quad (24)$$

Если $P_a^* \leq 0,05 \dots 0,1$, то для приближенного расчета ОМП можно использовать упрощенный вариант формул (21), (23), а именно

$$B(\hat{R} | R_0, V_0) \approx D_V(R) + P_a^* [(R_{\min}^2 + R_{\min} R_{\max} + R_{\max}^2) / 3 - R_0 (R_{\min} + R_{\max}) + R_0^2],$$

$$B(\hat{V} | R_0, V_0) = D_R(V) + P_a^* (V_0^2 + V_{\max}^2 / 12). \quad (25)$$

Сопоставление (23) или (25) с (16), позволяет определить условия, при которых проявляется пороговый эффект [4], т. е. рассеяние ОМП резко возрастает по сравнению с дисперсией совместно-эффективных оценок из-за появления аномальных ошибок.

Полученные здесь выражения для логарифма ФОП и характеристик ОМП несколько упрощаются, если максимальная интенсивность каждого оптического импульса мала по сравнению с интенсивностью шума, так что

$$a_k / \nu \ll 1, \quad k = \overline{0, N-1}. \quad (26)$$

Выражение для логарифма ФОП (3) в этом случае принимает вид

$$L(R, V) \approx \sum_{k=0}^{N-1} a_k \int_0^T \{ [t - 2R/c - (k + \mu)\theta(1 + 2V/c)] / \tau \} \times \\ \times d\pi(t) / \nu,$$

а ОСШ (7) переписывается как

$$z_N^2 \approx z^2 \approx \tau \sum_{k=0}^{N-1} a_k^2 / \nu. \quad (27)$$

При выполнении (26) разрешающая способность по дальности (13) и скорости (14) определяется выражениями

$$\Delta R = c\tau / 2\alpha, \quad \Delta V = c\tau / 2\alpha\theta \sqrt{M_a \{(k + \mu)^2\}}, \quad (28)$$

где

$$\alpha^2 = \int_{-\infty}^{\infty} [df(x) / dx]^2 dx, \quad P(k) = a_k^2 / \sum_{k=0}^{N-1} a_k^2. \quad (29)$$

Согласно определению $\sum_{k=0}^{N-1} P(k) = 1$, так что величину

$$M_a \{ (k + \mu)^2 \} = \sum_{k=0}^{N-1} (k + \mu)^2 P(k) \quad (30)$$

можно интерпретировать как второй момент дискретной случайной величины $k = \{0, N - 1\}$ относительно точки $(-\mu)$, причем, вероятность значения k равна $P(k)$.

Из (28) следует, что при выполнении (26) разрешающая способность по дальности зондирующей последовательности (1) не зависит от числа и интенсивности импульсов последовательности. В тех же условиях разрешающая способность по скорости определяется величинами $P(k)$ и μ .

Используя обозначения (27)...(30) и учитывая (26), для характеристик надежных совместных ОМП дальности и скорости (16), (17) получаем

$$D_V(R) = \Delta R^2 M_a \{ (k + \mu)^2 \} / z^2 \sigma^2(k),$$

$$D_R(R) = \Delta V^2 M_a \{ (k + \mu)^2 \} / z^2 \sigma^2(k), \quad (31)$$

$$\rho = - [\mu + M_a \{ k \}] / \sqrt{M_a \{ (k + \mu)^2 \} }, \quad (32)$$

где $\sigma^2(k) = M_a \{ k^2 \} - M_a^2 \{ k \}$ — дисперсия дискретной случайной величины k с распределением $P(k)$ (29). Из (32) следует, что при $\mu = -M_a \{ k \}$ совместные ОМП дальности и скорости некоррелированы. Тогда их дисперсии (31) совпадают с дисперсиями отдельных оценок (15) и определяются выражениями

$$D_V(R) = \Delta R^2 / z^2, D_R(V) = \Delta V^2 / z^2 = \Delta R^2 / z^2 \theta^2 \sigma^2(k) =$$

$$= D_V(R) / \theta^2 \sigma^2(k). \quad (33)$$

Пусть, кроме (26) выполняется также (19) и (20). Тогда для вычисления вероятности надежной оценки (18) надо в (21) положить $\kappa^2 = 0$, подставить z^2 из (27) и заменить ξ (22) на величину

$$\xi = \xi_R \xi_V. \quad (34)$$

Здесь $\xi_R = (R_{\max} - R_{\min}) / \Delta R$ — число элементов разрешения по дальности, а $\xi_V = V_{\max} / \Delta V$ — число элементов разрешения по скорости, содержащихся в априорной области (5) возможных значений дальности и скорости. Из (21), (24) следует, что с увеличением ξ (22), (34) вероятность надежной оценки уменьшается, а вероятность аномальных ошибок возрастает. Поэтому с улучшением разрешающей способности повышается точность надежной ОМП дальности и скорости (15), (33), но одновременно увеличивается роль пороговых эффектов.

Положим теперь, что энергия зондирующей последовательности (1) ограничена, так что

$$\sum_{k=0}^{N-1} a_k \leq A. \quad (35)$$

Рассмотрим вначале влияние числа импульсов последовательности (1) на разрешающую способность по дальности (13) при раздельной оценке дальности, т. е. при априори известной скорости цели. Пусть максимальные интенсивности отдельных импульсов последовательности (2) одинаковы. Тогда согласно (35)

$$a_0 = a_1 = \dots = a_{N-1} = A/N, \quad (36)$$

а разрешающая способность по дальности принимает вид

$$\Delta R(N) = c\tau \sqrt{[\psi_1(A/N)/4F(A/N)]}. \quad (37)$$

Отсюда следует, что разрешающая способность в общем случае является убывающей функцией числа импульсов последовательности (2). Поэтому максимальное значение $\Delta R(N)$ достигается при использовании вырожденной зондирующей последовательности, состоящей из одного импульса с интенсивностью A .

Необходимость в использовании последовательности импульсов для раздельной оценки дальности возникает при наличии ограничений пиковой мощности отдельных импульсов [2]. Пусть допустимые значения максимальной интенсивности отдельных импульсов зондирующей последовательности ограничены, так что

$$a_k \leq a_{\max}, \quad k = 0, N-1 \quad (38)$$

и $a_{\max} < A$. Тогда зондирующий сигнал с суммарной интенсивностью A должен содержать

$$N = E[A/a_{\max}] + 1 \quad (39)$$

импульсов. В (39) $E[x]$ означает целую часть x . Используя (37), изменение разрешающей способности при раздельной оценке дальности можем охарактеризовать отношением

$$\chi_1 = \Delta R(1)/\Delta R(N) = [\psi_1(A)F(A/N)/\psi_1(A/N)F(A)]^{1/2}. \quad (40)$$

При этом $\chi_1 \geq 1$, так что наличие ограничения пиковой мощности не ухудшает разрешающей способности по дальности. В частности, при $A \ll \nu$ из (28), (40) получаем $\chi_1 \approx 1$.

Как правило, кроме ограничения энергии зондирующего сигнала (3) и пиковой мощности отдельных импульсов (38), ограничивается время T_S , отводимое на зондирование [2]. При отдельной оценке скорости целесообразно использовать зондирующий сигнал с максимально допустимой длительностью T_S , полагая [2]

$$\theta = T_S / (N - 1). \quad (4)$$

Пусть ограничены энергия (35) и длительность T_S зондирующей последовательности импульсов. Положим в (14)

$$\mu = -(N - 1) / 2 \quad (4)$$

и подставим значения максимальных интенсивностей импульсов и периода следования из (36) и (41) соответственно. Тогда выражение (14) для разрешающей способности по скорости переписывается как

$$\Delta V(N) = c \tau T_S^{-1} \sqrt{[3(N - 1) \psi_1(A/N) / (N + 1) F(A/N)]}. \quad (43)$$

Для оценки скорости необходим зондирующий сигнал, содержащий не менее двух импульсов [1]. Если пиковая мощность отдельных импульсов ограничена (38) и $a_m < A/2$, то необходимо использовать последовательность, содержащую более двух импульсов. Используя (43), изменим разрешающую способность по скорости вследствие ограничения пиковой мощности можем охарактеризовать отношением

$$\chi_2 = \Delta V(2) / \Delta V(N) = \{ (N + 1) \psi_1(A/2) F(A/N) / [3(N - 1) \times \times \psi_1(A/N) F(A/2)] \}^{1/2}. \quad (44)$$

Здесь число импульсов последовательности N определяется из (39). Выражение (44) существенно упрощается при $A \ll \nu$ и принимает вид $\chi_2 = \sqrt{[(N + 1) / 3(N - 1)]}$. Отсюда следует, что с ростом числа импульсов зондирующей последовательности разрешающая способность по скорости ухудшается, так что при $N \gg 1$ величина (43) может увеличиться в $\sqrt{3}$ раз по сравнению с последовательностью, состоящей из двух импульсов.

Положим теперь, что выполняется совместная оценка дальности и скорости при зондировании цели последовательностью оптических импульсов с интенсивностью (1). Опять считаем, что энергия зондирующего сигнала ограничена (35), а максимальные интенсивности отдельных импульсов одинаковы и определяются из (36) при $N \geq 2$. Тогда при отсутствии ограничений пиковой мощности минимальное число импульсов последовательности равно двум, и разрешающая способность по дальности

сти определяется из (37) при $N = 2$. Используя (37), получаем что изменение разрешающей способности по дальности, вследствие необходимости одновременной оценки скорости можно охарактеризовать отношением

$$\chi_3 = \Delta R(1) / R(2) = \sqrt{[\psi_1(A) F(A/2) / \psi_1(A/2) F(A)]}. \quad (45)$$

Пусть при наличии пиковых ограничений (38), определяемое из (39) число импульсов $N > 2$. Тогда разрешающая способность по дальности при совместной оценке дальности и скорости будет такой же, как при раздельной оценке дальности. Однако при $N > 2$ и выполнении (35) разрешающая способность по дальности может изменяться по сравнению со своим значением при $N = 2$ (37). Соответственно, изменение разрешающей способности по дальности при совместной оценке вследствие ограничения пиковой мощности можно охарактеризовать отношением

$$\chi_4 = \Delta R(2) / \Delta R(N) = \sqrt{[\psi_1(A/2) F(A/N) / \psi_1(A/N) F(A/2)]}. \quad (46)$$

Когда выполняется (42) разрешающая способность по скорости (43) при раздельной оценке скорости совпадает с разрешающей способностью по скорости при совместной оценке дальности и скорости. Поэтому изменение разрешающей способности по скорости при совместной оценке так же характеризуется величиной (44).

Таким образом, при отсутствии ограничений пиковой мощности необходимость использования хотя бы двух импульсов для оценки скорости приводит к изменению (45) разрешающей способности по дальности. В общем случае, ограничение пиковой мощности приводит как к изменению разрешающей способности по дальности (46), так и к изменению разрешающей способности по скорости (44) при совместной оценке дальности и скорости.

Для иллюстрации полученных общих выражений рассмотрим конкретный пример. Положим, что форма интенсивности одного импульса зондирующей последовательности описывается кривой Лоренца [2]

$$f(x) = [1 + (\pi x / 2)^2]^{-1}. \quad (47)$$

Подставляя (47) в (10), находим

$$\psi_1(a) = 4a \ln [(1 + \sqrt{1 + a/v}) / 2]. \quad (48)$$

Подставляя затем (48) и формулу для $F(a)$ из [2] в (40), (44) и (46) соответственно, получаем, что изменение разрешающей способности вследствие пиковых ограничений (38) характеризуется выражениями

$$\chi_1 = \{ \ln [(1 + \sqrt{1 + q}) / 2] (3 + \sqrt{1 + q/N}) \times$$

$$\times (1 + \sqrt{1 + q})^3 \}^{1/2} \{ N \ln [(1 + \sqrt{1 + q/N}) / 2] \times \\ \times (3 + \sqrt{1 + q}) (1 + \sqrt{1 + q/N})^3 \}^{-1/2} \quad (49)$$

— для разрешающей способности по дальности при раздельной оценке дальности,

$$\chi_2 = \{ 2(N + 1) \ln [(1 + \sqrt{1 + q/2}) / 2] (3 + \sqrt{1 + q/N}) \times \\ \times (1 + \sqrt{1 + q/2})^3 \}^{1/2} \{ 3N \ln [(1 + \sqrt{1 + q/N}) / 2] \times \\ \times (3 + \sqrt{1 + q/2}) (1 + \sqrt{1 + q/N})^3 (N - 1) \}^{-1/2} \quad (50)$$

— для разрешающей способности по скорости при раздельной и совместной оценке скорости,

$$\chi_4 = \{ 2 \ln [(1 + \sqrt{1 + q/2}) / 2] (3 + \sqrt{1 + q/N}) \times \\ \times (1 + \sqrt{1 + q/2})^3 \}^{1/2} \{ N \ln [(1 + \sqrt{1 + q/N}) / 2] \times \\ \times (3 + \sqrt{1 + q/2}) (1 + \sqrt{1 + q/N})^3 \}^{-1/2} \quad (51)$$

— для разрешающей способности по дальности при совместной оценке дальности и скорости. Из сопоставления (40) и (45) следует, что изменение разрешающей способности по дальности χ_3 , вследствие необходимости

одновременной оценки скорости может быть рассчитано по формуле (49) при $N = 2$. В (49)...(51) обозначено $q = A/\nu$ — отношение суммарной интенсивности зондирующей последовательности к интенсивности оптического шума.

На рис. 1 представлены зависимости изменения разрешающей способности по дальности и скорости от отношения сигнал—фон q для различного числа импульсов последовательности. Изменение разрешающей способности по дальности (49) при раздельной оценке показано сплошными, а

изменение при совместной оценке (51) — штриховыми линиями. Сплошная кривая рисунка при $N = 2$ также показывает изменение разрешающей способности по дальности χ_3 (45) при совместной оценке дальности и

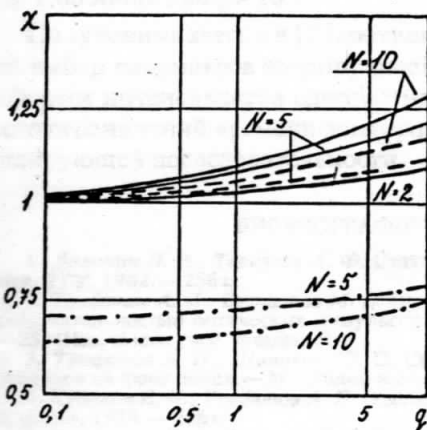


Рис. 1

скорости по сравнению со случаем раздельной оценки дальности в отсутствие пиковых ограничений. Штрихпунктирные кривые рисунка показывают изменение разрешающей способности по скорости (50).

Как следует из рассмотрения кривых рис. 1 и результатов [2], наличие пиковых ограничений приводит к проигрышу в точности надежной ОМП дальности, но одновременно несколько улучшает разрешающую способность по дальности. Применительно к оценке скорости наличие пиковых ограничений вызывает не только проигрыш в точности надежной ОМП, но и некоторое ухудшение разрешающей способности по скорости.

Анализ выражений (49)...(51) показывает, что при фиксированном числе N импульсов в последовательности зависимости $\chi_i(q)$, $i = \overline{1, 4}$ носят не монотонный характер. Действительно, при

$$q \rightarrow \infty, \lim \chi_1(q) = \lim \chi_3(q) = \lim \chi_4(q) = 1.$$

В свою очередь, при $q \rightarrow \infty, \lim \chi_2(q) = [(N+1)/3(N-1)]^{1/2}$. Таким образом, предельные значения функций $\chi_i(q)$ при $q \rightarrow 0$ и $q \rightarrow \infty$ совпадают. Отсюда следует, что в этих предельных случаях разрешающая способность зондирующей последовательности (1) одинакова. Однако эти свойства разрешающей способности проявляются при практически не встречающихся значениях отношения сигнал—фон q . Так, если $N = 2$, то $\chi_1 \leq 1,05$ лишь при $q > 10^7$.

Полученные здесь и в [2] соотношения позволяют сделать обоснованный выбор параметров зондирующей последовательности в зависимости от формы интенсивности одного импульса и с учетом обычно имеющихся место ограничений времени зондирования, пиковой мощности и энергии зондирующей последовательности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Долинин Н. А., Терпугов А. Ф. Статистические методы в оптической локации.— Томск, ТГУ, 1982.— 256 с.
2. Трифонов А. П., Беспалова М. Б. Оценка дальности и скорости при зондировании последовательностью оптических импульсов // Радиоэлектроника.— 1993.— № 1.— С. 17—25. (Изв. высш. учеб. заведений).
3. Трифонов А. П., Шинаков Ю. С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех.— М.: Радио и связь, 1986.— 264 с.
4. Куликов Е. И., Трифонов А. П. Оценка параметров сигналов на фоне помех.— М.: Сов. радио, 1978.— 296 с.
5. Большаков И. А., Ракошиц В. С. Прикладная теория случайных потоков.— М.: Сов. радио, 1978.— 248 с.

Воронежский госуниверситет.

Поступила в редакцию 24.02.94.