188

188

ISSN 0021-3470

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ
ЗАВЕДЕНИЙ

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

ТОМ 42

7-8

ИЗДАНИЕ
НАЦИОНАЛЬНОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
УКРАИНЫ
«КИЕВСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ»

1999

УДК 621.396

ТРИФОНОВ А. П., БЕСПАЛОВА М. Б.

ОЦЕНКА ДАЛЬНОСТИ И СКОРОСТИ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ*

Получены асимптотические выражения для характеристик оценок максимального правдоподобия с учетом аномальных ошибок. Определены параметры последовательности оптических импульсов, которые обеспечивают минимальные ошибки оценивания.

В системах оптической локации широко применяются последовательности оптических импульсов [1—3] и др. В [2, 3] найдены характеристики оценок дальности и скорости при зондировании последовательностью оптических импульсов, интенсивности которых дифференцируемы. Однако реальные оптические импульсы часто имеют весьма короткие фронты, что позволяет успешно аппроксимировать их интенсивности разрывными функциями времени. Среди таких функций наиболее распространенной является аппроксимация в виде прямоугольного импульса [1, 4], в связи с чем рассмотрим характеристики оценок максимального правдоподобия (ОМП) дальности и скорости при зондировании последовательностью прямоугольных оптических импульсов.

Положим, что излучается последовательность оптических импульсов с интенсивностью

$$s_r(t) = a \sum_{k=0}^{N-1} I\{[\,t - (k-\mu)\,\theta - \lambda\,] / \tau\}. \tag{1}$$

Здесь $I(x) = 1$ при $|x| < 1/2$ и $I(x) = 0$ при $|x| > 1/2$, a — максимальная интенсивность импульсов, θ — период следования, τ — длительность одного импульса последовательности, а параметр μ определяет, с какой точкой последовательности связано ее временное положение λ. Если $\mu = 0$, то λ — временное положение первого импульса последовательности. Если же $\mu = (N-1)/2$, то λ — временное положение середины последовательности (1).

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

---

* Приведенные результаты получены при выполнении гранта 97-5-2.1-24 по фундаментальным исследованиям в области электроники и радиотехники.

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

где R_0 — дальность, V_0 — скорость цели, c — скорость света, причем неизвестная дальность принимает значения из априорного интервала $[R_{min}; R_{max}]$, неизвестная скорость — из априорного 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—3]. Скважность последовательности (2) полагаем достаточно большой, так что отдельные импульсы не перекрываются. В этом случае логарифм функционала отношения правдоподобия (ФОП) с точностью до несущественных постоянных определяется выражением [1, 2]

$$L(R, V) = \sum_{k=0}^{N-1} \{\pi[2R/c + (k-\mu)\theta(1 + 2V/c) + \tau/2] -$$

$$- \pi[2R/c + (k-\mu)\theta(1 + 2V/c) - \tau/2]\} \equiv \sum_{k=0}^{N-1} \pi_k(R, V). \quad (3)$$

Рассмотрим вначале характеристики ОМП дальности $\hat{R}$ при априори известной скорости цели V_0. Согласно [2, 5]

$$\hat{R} = \arg\sup L(R), \quad R \in [R_{min}, R_{max}], \quad (4)$$

где

$$L(R) = L(R, V_0) = \sum_{k=0}^{N-1} \pi_k(R), \quad (5)$$

$$\pi_k(R) = \pi_k(R, V_0). \quad (6)$$

Для расчета характеристик ОМП (4) представим слагаемые (6) суммы (5) в виде

$$\pi_k(R) = \mu_\nu + \mu_\nu q S(R, R_0) + N_k(R)\sqrt{\mu_\nu}. \quad (7)$$

Здесь $\mu_\nu = \nu\tau$, $q = a/\nu$,

$$S(R, R_0) = \max\,[1 - 2\,|R - R_0|\,/\,c\,\tau\,,\,0\,], \qquad (8)$$

а $N_k(R) = [\,\pi_k(R) - <\pi_k(R)>\,] \,/\, \sqrt{\mu_\nu}$ — нормированная и центрированная шумовая функция для одного импульса принимаемой последовательности с интенсивностью (2), причем

$$K_k(R_1, R_2) = <N_k(R_1)\,N_k(R_2)> = K_0\,(R_1, R_2) = S\,(R_1, R_2) +$$
$$+\,q\,I\,[2\,(R_1 - R_0)\,/\,c\,\tau]\,I\,[2\,(R_2 - R_0)\,/\,c\,\tau\,] \times$$
$$\times\left\{1 - 2\,[\max\,(R_0, R_1, R_2) - \min\,(R_0, R_1, R_2)\,]\,/\,c\,\tau\right\} \qquad (9)$$

Используя представление (7), перепишем (5) в виде суммы сигнальной и шумовой функций [5]

$$L\,(R) = S\,(R) + N\,(R) + N\,\mu_\nu, \qquad (10)$$

$$S\,(R) = N\,q\,\mu_\nu\,S\,(R, R_0), \qquad (11)$$

$$N\,(R) = \sum_{k=0}^{N-1} N_k\,(R)\,\sqrt{\mu_\nu}\,. \qquad (12)$$

Шумовая функция (12) является реализацией случайного процесса, первые два момента которого определяются выражениями

$$<N\,(R\,)> = 0\,,\;\; K\,(R_1, R_2) = <N\,(R_1\,)\,N\,(R_2\,)> = N\,\mu_\nu\,K_0\,(R_1, R_2\,). \qquad (13)$$

Формулы (7), (8), (11), (13) получены в предположении, что априорный интервал возможных значений дальности не превосходит интервала однозначного измерения дальности [6], так что $R_{\max} - R_{\min} < c\,\theta\,/\,2$. Согласно (8), (11) сигнальная функция в (10) достигает максимума при $R = R_0$. Следовательно, отношение сигнал/шум (ОСШ) при оценке дальности можем записать как [5]

$$z_N^2 = S^2\,(R_0)\,/\,K\,(R_0, R_0\,) = z^2\,N, \qquad (14)$$

где

$$z^2 = \mu_s\,q\,/\,(1 + q) \qquad (15)$$

— ОСШ для одного импульса последовательности, а $\mu_s = a\,\tau$ — среднее число сигнальных точек. Согласно [5], ОМП (4) обладает высокой апостериорной точностью, если ОСШ (14) достаточно велико.

Из (8), (11) и (9), (13) следует, что у сигнальной и корреляционной функций не существует второй производной по оцениваемому параметру при

$R = R_0 = R_1 = R_2$. Следовательно, оптический сигнал с интенсивностью (2) является разрывным по параметру R [5]. Если при не слишком малых ОСШ (14), $N\mu_\nu >> 1$, то найти безусловное рассеяние (средний квадрат ошибки) ОМП дальности (4) можно с помощью метода локально-марковской аппроксимации [5]. Полагая, что неизвестная дальность R_0 распределена равномерно в априорном интервале $[R_{\min}; R_{\max}]$ и используя результаты [4, 5] получаем

$$B(R) = \langle (\hat{R} - R_0) \rangle = P_{0R} D(R) + (1 - P_{0R})(R_{\max} - R_{\min})^2 / 6. \qquad (16)$$

Здесь $P_{0R} = P[\,|\hat{R} - R_0| < c\tau\,]$ — вероятность надежной оценки дальности [5], а

$$D(R) = 13\, c^2 \tau^2 (2+q)^2 / 32\, \mu_s^2 q^2 N^2 \qquad (17)$$

— дисперсия надежной оценки [4, 5].

Аналогично [4, 5] можем записать

$$P_{0R} \cong 2\kappa \int\limits_{1/\sqrt{1+q}}^{\infty} \exp\{\kappa^2/2 - \kappa(x - z_N) - m_R x \exp[-x^2(1+q)^2/2] \times$$

$$\times \sqrt{(1+q)/2\pi}\}\{\Phi(x - z_N - \kappa) - \exp[3\kappa^2/2 - \kappa(x - z_N)]\,\Phi(x - z_N - 2\kappa)\}\,dx, \qquad (18)$$

где $\kappa = 2z_N(1+q)/(2+q)$, $\Phi(\cdot)$ — интеграл вероятности [5], а

$$m_R = 2(R_{\max} - R_{\min})/c\tau \qquad (19)$$

— количество элементов разрешения по дальности в априорном интервале $[R_{\min}, R_{\max}]$. Выражения (16)...(18) являются приближенными, однако их точность улучшается с увеличением параметров z_N (14), m_R (19) и величины $N\mu_\nu$ [4, 5].

Формула (18) для вероятности надежной оценки довольно громоздка и расчет по ней возможен только численными методами. Поэтому найдем простую верхнюю границу для вероятности аномальной ошибки $P_{aR} = 1 - P_{0R}$. Воспользовавшись неравенством $1 - \exp(-x) \le x$ при $x > 0$, из (18) имеем

$$P_{aR} \le P^*_{aR} = (8\, m_R z_N / 15)(2+q)^{-3/2} \exp[-z_N^2 (1+q)/(2+q)] \sqrt{(1+q)/2\pi}. \qquad (20)$$

Если $P^*_{aR} \le 0{,}05 \ldots 0{,}1$, то для приближенного расчета безусловного рассеяния ОМП дальности (4) можно использовать упрощенный вариант формулы (16)

$$B(R) \cong D(R) + P^*_{aR}(R_{\max} - R_{\min})^2 / 6. \tag{21}$$

Наконец, если ОСШ z_N (14) настолько велико, что можно считать $P_{0R} \cong 1$ и пренебречь аномальными ошибками, то безусловное рассеяние ОМП дальности (16) совпадает с дисперсией надежной ОМП (17).

Дисперсия надежной ОМП дальности при зондировании последовательностью регулярных оптических импульсов, интенсивность которых дифференцируема, найдена в [2]. Из результатов [2] следует, что дисперсия надежной ОМП дальности в регулярном случае убывает обратно пропорционально числу импульсов в зондирующей последовательности. Согласно (17), при использовании прямоугольных оптических импульсов, дисперсия надежной ОМП дальности убывает обратно пропорционально квадрату числа импульсов в зондирующей последовательности. Следовательно, применение зондирующей последовательности из разрывных оптических импульсов может привести к повышению точности ОМП дальности по сравнению с зондированием регулярными импульсами.

Дальнейшее упрощение (21) возможно, если

$$q << 1, \tag{22}$$

но $z_N^2 = N z^2 >> 1$, где теперь (15)

$$z^2 = \mu_s q. \tag{23}$$

При выполнении (22) для нормированного безусловного рассеяния ОМП дальности можем записать приближенное выражение

$$\widetilde{B}(R) = \frac{B(R)}{(R_{\max} - R_{\min})^2} \cong \frac{13}{2m_R^2 z^4 N^2} + \frac{m_R z}{45} \exp\left(-\frac{z^2 N}{2}\right)\sqrt{\frac{N}{\pi}}. \tag{24}$$

Рассмотрим возможность оптимизации параметров последовательности (2) с учетом аномальных ошибок оценивания [6]. Полагая, что основной интерес представляет безусловное рассеяние ОМП дальности (16), оптимальные параметры последовательности (2) будем искать из условия

$$\min B(R). \tag{25}$$

Считаем, что фиксированное значение ОСШ z_N^2 (14), при котором оптимизируются параметры последовательности не слишком мало и длина

$R_{\max} - R_{\min}$ априорного интервала возможных значений дальности фиксирована. Тогда от длительности τ одного импульса зависит только величина m_R (19). Следовательно, изменение параметра τ последовательности (2) приводит лишь к изменению числа элементов разрешения по дальности. При каждом фиксированном значении ОСШ z_N^2 увеличение m_R сначала приводит к уменьшению рассеяния оценки дальности (16) (когда оценка надежная), а затем к увеличению рассеяния (когда преобладают аномальные ошибки). Следовательно, при каждом фиксированном ОСШ z_N^2 должно существовать некоторое значение $m_{R\,\mathrm{opt}}$, которое обеспечивает выполнение (25). Определить аналитически $m_{R\,\mathrm{opt}}$, а также (25) на основе (16) затруднительно, вследствие относительно сложной зависимости P_{0R} (18) от m_R. Поэтому считаем ОСШ z_N^2 настолько большим, что при выполнении (22) можно использовать (20), (24). Тогда, решая уравнение $[\, d\widetilde{B}(R) / d\, m_R \,] = 0$, находим, что (25) выполняется, если

$$m_{R\,\mathrm{opt}} = (585\sqrt{\pi})^{1/3} z^{-5/3} N^{-5/6} \exp(z^2 N / \cancel{6}\; 12). \tag{26}$$

Для обеспечения оптимального числа элементов разрешения (26), необходимо, как это следует из (19), выбирать длительность оптического импульса равной

$$\tau_{\mathrm{opt}} = \frac{2(R_{\max} - R_{\min})\, z^{5/3} N^{5/6}}{c\,(585\sqrt{\pi})^{1/3}} \exp\left(\frac{-z^2 N}{\cancel{6}\; 12}\right). \tag{27}$$

Значит, с изменением ОСШ z^2 (23), числа импульсов N и величины априорного интервала дальности $[R_{\min}, R_{\max}]$, должна изменяться длительность импульса последовательности (2). Подставляя (26) в (24) получаем минимальное нормированное рассеяние ОМП дальности

$$\min \widetilde{B}(R) = \frac{1}{2}\left(\frac{13}{75\pi N z^2}\right)^{1/3} \exp\left(-\frac{z^2 N}{6}\right). \tag{28}$$

Выбор длительности импульсов в соответствии с (27) приводит к тому, что с ростом ОСШ (23) и числа N импульсов рассеяния ОМП дальности (28) убывает экспоненциально, т. е. значительно быстрее, чем рассеяние надежной ОМП (17) при фиксированной длительности оптических импульсов с интенсивностью (2).

Рассмотрим далее характеристики ОМП скорости V при априори известной дальности цели R_0. Согласно определению ОМП [2—5]

$$\hat{V} = \arg\sup L(V),\ V \in [-V_{\max}/2, V_{\max}/2], \tag{29}$$

где согласно (3)

$$L(V) = L(R_0, V) = \sum_{k=0}^{N-1} \pi_k(V), \tag{30}$$

$$\pi_k(V) = \pi_k(R_0, V). \tag{31}$$

Для расчета характеристик ОМП (29) представим слагаемые (31) суммы (30) в виде

$$\pi_k(V) = \mu_\nu + \mu_\nu q S_k(V, V_0) + N_k(V) / \sqrt{\mu_\nu}. \tag{32}$$

Здесь

$$S_k(V, V_0) = \max[1 - 2|(V - V_0)(k - \mu)|\theta / c\tau, 0], \tag{33}$$

а $N_k(V) = [\pi_k(V) - <\pi_k(V)>] / \sqrt{\mu_\nu}$ — нормированная и центрированная шумовая функция для одного импульса принимаемой последовательности с интенсивностью (2), причем

$$K_k(V_1, V_2) = <N_k(V_1) N_k(V_2)> = S_k(V_1, V_2) +$$
$$+ q I[2(k-\mu)\theta(V_1 - V_0)/c\tau]\, I\,[2(k-\mu)\theta(V_2 - V_0)/c\tau] \times$$
$$\times \left\{1 - 2[\max(V_0, V_1, V_2) - \min(V_0, V_1, V_2)]\,|k-\mu|\,\theta/c\tau\right\}. \tag{34}$$

Используя представление (32), перепишем (30) в виде суммы сигнальной и шумовой функции [5]

$$L(V) = S(V) + N(V) + N\mu_\nu, \tag{35}$$

$$S(V) = \mu_\nu q \sum_{k=0}^{N-1} S_k(V, V_0), \tag{36}$$

$$N(V) = \sum_{k=0}^{N-1} N_k(V) \sqrt{\mu_\nu}. \tag{37}$$

Шумовая функция (37) является реализацией случайного процесса, первые два момента которого определяются выражениями $<N(V)> = 0$,

$$K(V_1, V_2) = <N(V_1) N(V_2)> = \mu_\nu \sum_{k=0}^{N-1} K_k(V_1, V_2). \tag{38}$$

Согласно (33), (36) сигнальная функция в (35) достигает максимума при $V = V_0$. Следовательно, ОСШ при оценке скорости, аналогично (14), можем записать как

$$z_N^2 = S^2(V_0) / K(V_0, V_0). \tag{39}$$

Подставляя в (39) сигнальную функцию из (36) и корреляционную функцию из (38), получаем, что (39) совпадает с (14). В дальнейшем ОСШ (14), (39) полагаем достаточно большим, так что надежная ОМП скорости обладает высокой апостериорной точностью [5]. Тогда для определения характеристик ОМП необходимо исследовать поведение функций (36) и (38) в окрестности истинного значения скорости V_0.

Если

$$\max\left\{|V_1 - V_2|,\ |V_1 - V_0|, |V_2 - V_0|, |V - V_0|\right\} < c\tau / 2\theta (N-1),$$

то выражения для сигнальной функции (36) и корреляционной функции (38) принимают вид

$$S(V) = N q \mu_v (1 - 2|V - V_0|\theta A / N c\tau), \tag{40}$$

$$K(V_1, V_2) = N\mu_v \Big\{1 + q - 2|V_1 - V_2|\theta A / N c\tau - 2q \times$$
$$\times\ [\max(V_0, V_1, V_2) - \min(V_0, V_1, V_2)]\,\theta A / N c\tau\Big\}. \tag{41}$$

Если же

$$\min\left\{|V_1 - V_0|,\ |V_2 - V_0|, |V - V_0|\right\} > c\tau / \theta (N-1),$$

то выражения для сигнальной (36) и корреляционной (38) функции перепишутся как

$$S(V) \cong 0,\ K(V_1, V_2) = N\mu_v (1 - 2|V_1 - V_2|\theta A / N c\tau). \tag{42}$$

В (40)...(42) обозначено

$$A = \sum_{k=0}^{N-1} |k - \mu| = [(N-1)/2 - \mu]^2 + (N^2 - 1)/4 + \{|\mu|\}(1 - \{|\mu|\}), \tag{43}$$

где $\{x\}$ — дробная часть числа x.

Из (33), (34), (36), (38), (40)...(42) следует, что у сигнальной и корреляционной функций не существует второй производной по оцениваемому параметру при $V = V_0 = V_1 = V_2$. Следовательно, оптический сигнал с интенсивностью (2) является разрывным по параметру V [5]. Если при не слишком малых ОСШ (39), $N\mu_v >> 1$, то найти безусловное рассеяние ОМП скорости можно с помощью метода локально-марковской аппроксимации [5]. Полагая, что неизвестная скорость V_0 распределена равномерно в априорном интервале $[-V_{\max}/2, V_{\max}/2]$ и используя результаты [4, 5], получаем

$$B(V) = P_{0V} D(V) + (1 - P_{0V}) V_{\max}^2 / 6. \tag{44}$$

Здесь

$$D(V) = 13 c^2 \tau^2 (2+q)^2 / 32 \theta^2 A^2 \mu_s^2 q^2 \tag{45}$$

— дисперсия надежной оценки скорости, а P_{0V} — вероятность надежной оценки скорости. Вероятность P_{0V} можно рассчитать по формуле (18), если заменить в ней m_R (19) на

$$m_V = 2 V_{\max} \theta A / c \tau N \tag{46}$$

— количество элементов разрешения по скорости в априорном интервале $[-V_{\max}/2, V_{\max}/2]$. Выражения (44), (45) являются приближенными, однако точность их улучшается с увеличением параметров z_N^2 (14), (39), m_V (46) и величины $N \mu_v$ [4, 5]. Аналогично (20) для верхней границы вероятности аномальной ошибки $P_{aV} = 1 - P_{0V}$ при оценке скорости можем записать

$$P_{aV} \le P_{aV}^* = (2 m_v z_N / 15)(2+q)^{-3/2} \times$$
$$\times \exp[-z_N^2 (1+q)/(2+q)] \sqrt{(1+q)/2\pi}. \tag{47}$$

Если $P_{aV} \le 0{,}05 \ldots 0{,}1$, то для приближенного расчета безусловного рассеяния ОМП скорости можно использовать упрощенный вариант формулы (44), использующий приближение (47).

$$B(V) \cong \frac{13 c^2 \tau^2 (2+q)^2}{32 \theta^2 A^2 \mu_s^2 q^2} + \frac{4 V_{\max}^2 m_V z_N}{45 (2+q)^{3/2}} \times \exp\left[-\frac{z_N^2 (1+q)}{2+q}\right] \sqrt{\frac{1+q}{2\pi}}. \tag{48}$$

Наконец, если ОСШ z_N (14), (39) настолько велико, что можно считать $P_{0V} \cong 1$ и пренебречь аномальными ошибками, то безусловное рассеяние ОМП скорости совпадает с дисперсией надежной ОМП (45).

Дисперсия надежной ОМП скорости при зондировании последовательностью регулярных оптических импульсов, интенсивность которых дифференцируема, найдена в [2]. Из результатов [2] следует, что дисперсия ОМП скорости в регулярном случае убывает обратно пропорционально третьей степени числа импульсов в зондирующей последовательности. Согласно (43), (45), при использовании прямоугольных оптических импульсов, дисперсия надежной ОМП скорости убывает обратно пропорционально четвертой степени числа импульсов в зондирующей последовательности. Следовательно, применение зондирующей последовательности из разрывных оптических импульсов может привести к повышению точности ОМП скорости по сравнению с зондированием регулярными импульсами.

При выполнении (22), используя (23) и (48), можем записать приближенное выражение для нормированного безусловного рассеяния ОМП скорости

$$\widetilde{B}(V)=\frac{B(V)}{V_{\max}^2}=\frac{13}{2\,m_V^2 z^4}+\frac{m_V z}{45}\exp\left(-\frac{z^2 N}{2}\right)\sqrt{\frac{N}{\pi}}. \tag{49}$$

Рассмотрим возможность оптимизации параметров последовательности (2) с учетом аномальных ошибок оценивания скорости [6]. Полагая, что основной интерес представляет безусловное рассеяние ОМП скорости (44), оптимальные параметры последовательности (2) будем искать из условия

$$\min B(V), \tag{50}$$

аналогичного условию (25). Считаем z_N^2 настолько большим, что при выполнении (22) можно использовать (49). Тогда, решая уравнение $[\,d\widetilde{B}(V)/d\,m_V]=0$, с помощью (46) находим, что (50) выполняется, если период следования равен

$$\theta_{\mathrm{opt}}=\frac{c\,\tau}{2\,V_{\max} A}\left(\frac{585}{z^5}\sqrt{\frac{\pi}{N}}\right)^{1/3}\exp\left(\frac{z^2 N}{\cancel{6}\,12}\right). \;?? \tag{51}$$

Подставляя (51) в (49), получаем

$$\min\widetilde{B}(V)=\frac{1}{2}\left(\frac{13\,N}{75\,\pi\,z^2}\right)^{1/3}\exp\left(-\frac{z^2 N}{6}\right). \tag{52}$$

Выбор периода следования импульсов в соответствии с (51) приводит к тому, что с ростом ОСШ (23) и числа N импульсов, рассеяние ОМП скорости (52) убывает экспоненциально, т. е. значительно быстрее, чем рассеяние надежной ОМП (45) при фиксированном значении периода следования оптических импульсов.

Таким образом, оптимизация параметров последовательности оптических импульсов позволяет существенно повысить точность оценки дальности и скорости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Долин 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.— Т. 36.— № 1.— С. 17—25. (Изв. высш. учебн. заведений).

3. *Трифонов А. П., Беспалова М. Б.* Пороговые характеристики оценок дальности и скорости при зондировании последовательностью оптических импульсов // Радиоэлектроника.— 1995.— Т. 38.— № 4.— С. 45—57. (Изв. высш. учебн. заведений).

4. *Трифонов А. П., Овчинникова Т. М.* Прием оптического сигнала с неизвестной задержкой // Радиоэлектроника.— 1989.— Т. 32.— № 8.— С. 24—29. (Изв. высш. учебн. заведений).

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

6. *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.

Воронежский государственный университет.

Поступила в редакцию 30.06.98.

УДК 621.396.96

БУЛЫЧЕВ Ю. Г., ГОРДЕЕВ С. Е.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАКЛОННОЙ ДАЛЬНОСТИ ДО ОБЪЕКТА ПАССИВНОЙ УГЛОМЕРНО-ДОППЛЕРОВСКОЙ СИСТЕМОЙ ЛОКАЦИИ

Применительно к пассивной угломерно-допплеровской системе локации, с учетом инвариантов принятой модели движения объекта, развит квазиоптимальный метод определения наклонной дальности при различных составах неполномерного вектора измерений, содержащих систематические ошибки.

Возросло количество публикаций, посвященных вопросам теории и практики построения пассивных угломерно-допплеровских систем (ПУДС), обладающих рядом неоспоримых технико-экономических преимуществ по сравнению с активными системами.

В теоретическом плане проблемы анализа и синтеза пассивных систем более сложны по сравнению с активными системами, поскольку в первом случае мы оперируем с неполномерным вектором измерений. Так, решение задачи оптимального оценивания параметров движения объекта в пассивном режиме локации зачастую связано с плохой наблюдаемостью, низкой устойчивостью линейных и нелинейных алгоритмов фильтрации и, как следствие, их быстрой расходимостью. Выход из указанной проблемной ситуации возможен