

УДК 621.391

КВАЗИОПТИМАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ПО ЛАЗЕРНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ДАЛЬНОСТИ

А. П. Трифонов *, А. В. Курбатов

Воронежский госуниверситет, г. Воронеж, Россия

Синтезирован алгоритм оценки дальности, скорости и ускорения по результатам измерения дальности в каждом периоде повторения зондирующей последовательности оптических импульсов. Найдены характеристики оценок с учётом аномальных ошибок. Показано, что предлагаемые оценки состоятельные и асимптотические (с ростом отношения сигнал/шум для каждого импульса), несмещённые и эффективные.

ВВЕДЕНИЕ

Во многих задачах оптической локации [1–5] кроме оценки дальности цели представляет интерес также оценка радиальных скорости и ускорения. Для определения параметров движения цели широко применяются последовательности оптических импульсов. В связи с этим актуально исследование точности методов, основанных на их использовании.

Оценки максимального правдоподобия дальности, скорости и ускорения при зондировании последовательностью оптических импульсов ранее обсуждались в работах [3, 4], где были найдены потенциальные характеристики оценок дальности, скорости и ускорения. Однако аппаратная реализация алгоритмов максимального правдоподобия для оценок всех трёх параметров движения наталкивается на существенные трудности. Упростить процедуру оценки дальности, скорости и ускорения можно с помощью квазиоптимального алгоритма. Он основан на определении дальности, скорости и ускорения цели по результатам лазерных измерений дальности в каждом периоде повторения последовательности оптических импульсов.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОЦЕНОК МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ

Интенсивность зондирующей последовательности оптических импульсов запишем согласно работам [3–5] в виде

$$s_N(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{s}[t - (k - \mu)\theta - \lambda], \quad (1)$$

где $\hat{s}(t)$ — функция, описывающая интенсивность отдельного импульса, λ — временное положение последовательности, θ — период следования импульсов. Параметр μ определяет точку последовательности, с которой связано временное положение λ последовательности. Так, при $\mu = 0$ величина λ представляет собой время прихода первого импульса, при $\mu = (N - 1)/2$ — время прихода середины последовательности (1), а при $\mu = N - 1$ — время прихода последнего импульса последовательности.

Полагаем, что зондирующая последовательность (1) рассеивается целью с дальностью R_0 , скоростью V_0 и ускорением A_0 , причём возможные значения вектора (R, V, A) лежат в априорной

* trifonov@phys.vsu.ru

области $\mathbf{W} = \{[R_{\min}, R_{\max}], [V_{\min}, V_{\max}], [A_{\min}, A_{\max}]\}$, где $|V_{\max}| \ll c$, $N\theta|A_{\max}| \ll c$, c — скорость света. Тогда интенсивность принимаемого сигнала можно записать согласно работам [1–5] в виде

$$s_N(t, R_0, V_0, A_0) = \sum_{k=0}^{N-1} s[t - 2R_0/c - (k - \mu)(1 + 2V_0/c)\theta - A_0(k - \mu)^2\theta^2/c]. \tag{2}$$

Здесь функция $s(t)$ описывает временной профиль интенсивности одного принимаемого оптического импульса последовательности и, в общем случае, может отличаться от $\hat{s}(t)$ в сумме (1). В формуле (2) и ниже индексом ноль обозначены истинные (неизвестные) значения параметров R , V и A принимаемой последовательности.

Предположим, что сигнал с интенсивностью (2) наблюдается в интервале времени $[0, T]$ на фоне оптического шума, представляющего собой стационарный пуассоновский процесс с интенсивностью $\nu > 0$. В этом случае доступный для обработки сигнал $\pi(t)$ представляет собой пуассоновский процесс с интенсивностью $\beta(t, R, V, A) = s_N(t, R, V, A) + \nu$, где значения параметров R , V , A подлежат оценке. Для оценки параметров движения цели R_0 , V_0 и A_0 с максимальным правдоподобием следует сформировать логарифм функционала отношения правдоподобия согласно статье [3]

$$L(R, V, A) = \int_0^T \ln[1 + s_N(t, R, V, A)/\nu] d\pi(t) - \int_0^T s_N(t, R, V, A) dt. \tag{3}$$

В качестве оценки с максимальным правдоподобием принимается значение вектора $(\tilde{R}, \tilde{V}, \tilde{A})$ из области \mathbf{W} , соответствующее наибольшему максимуму логарифма функционала отношения правдоподобия (3):

$$(\tilde{R}, \tilde{V}, \tilde{A}) \in \mathbf{W} : L(\tilde{R}, \tilde{V}, \tilde{A}) = \sup L(R, V, A). \tag{4}$$

Безусловные характеристики оценок (4) найдены в работах [3, 4] в предположении, что значения R_0 , V_0 и A_0 распределены равномерно в области \mathbf{W} . Для безусловных смещений были получены выражения

$$b(\tilde{R}) = \langle \tilde{R} - R_0 \rangle = 0, \quad b(\tilde{V}) = \langle \tilde{V} - V_0 \rangle = 0, \quad b(\tilde{A}) = \langle \tilde{A} - A_0 \rangle = 0, \tag{5}$$

а для безусловных рассеяний —

$$\begin{aligned} B(\tilde{R}) &= \langle (\tilde{R} - R_0)^2 \rangle = P_0 D_0(\tilde{R}) + (1 - P_0) \Delta R_{\text{pr}}^2 / 6, \\ B(\tilde{V}) &= \langle (\tilde{V} - V_0)^2 \rangle = P_0 D_0(\tilde{V}) + (1 - P_0) \Delta V_{\text{pr}}^2 / 6, \\ B(\tilde{A}) &= \langle (\tilde{A} - A_0)^2 \rangle = P_0 D_0(\tilde{A}) + (1 - P_0) \Delta A_{\text{pr}}^2 / 6, \end{aligned} \tag{6}$$

где

$$\Delta R_{\text{pr}} = R_{\max} - R_{\min}, \quad \Delta V_{\text{pr}} = V_{\max} - V_{\min}, \quad \Delta A_{\text{pr}} = A_{\max} - A_{\min}.$$

В формулах (5) и (6) усреднение (обозначенное угловыми скобками) выполняется по реализациям пуассоновского процесса $\pi(t)$ и по истинным значениям оцениваемых параметров R_0 , V_0 , A_0 , а величин $D_0(\tilde{R})$, $D_0(\tilde{V})$ и $D_0(\tilde{A})$ — по дисперсии надёжных оценок (4) согласно работам [6, 7], т. е. при отсутствии аномальных ошибок. Эти дисперсии совпадают с дисперсиями совместно эффективных оценок и определяются выражениями из статьи [3]

$$D_0(\tilde{R}) = \frac{c^2}{4\alpha} \frac{M_2 M_4 - M_3^2}{(2M_1 M_3 + M_0 M_4) M_2 - M_2^3 - M_0 M_3^2 - M_1^2 M_4},$$

$$D_0(\tilde{V}) = \frac{c^2}{4\vartheta^2\alpha} \frac{M_0M_4 - M_2^2}{(2M_1M_3 + M_0M_4)M_2 - M_2^3 - M_0M_3^2 - M_1^2M_4},$$

$$D_0(\tilde{A}) = \frac{c^2}{\vartheta^4\alpha} \frac{M_0M_2 - M_1^2}{(2M_1M_3 + M_0M_4)M_2 - M_2^3 - M_0M_3^2 - M_1^2M_4}, \quad (7)$$

где

$$\alpha = \int_0^T \frac{1}{\nu + s(t)} \left[\frac{ds(t)}{dt} \right]^2 dt, \quad M_n = \sum_{k=0}^{N-1} (k - \mu)^n. \quad (8)$$

Величина P_0 в выражениях (6) — вероятность надёжной оценки из работ [4, 6]:

$$P_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi(1+\kappa^2)}} \int_{\sqrt{2}}^{\infty} \exp \left[-\frac{(x-\eta)^2}{2(1+\kappa^2)} - \frac{\xi x^2}{(2\pi)^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \right] dx,$$

где

$$\xi = \frac{Q\theta^3}{\sigma_N^3 c^3} \frac{N(N^2-1)}{12} \sqrt{\frac{N(N^2-4)}{15}} \left[\frac{1}{\nu} \int_0^T \left(\frac{ds(t)/dt}{1+s(t)/\nu} \right)^2 dt \right]^{3/2},$$

$$\kappa^2 = \frac{\int_0^T \ln^2[1+s(t)/\nu] s(t)/\nu dt}{\int_0^T \ln^2[1+s(t)/\nu] dt},$$

$$\eta = \sqrt{N} \frac{\int_0^T \ln[1+s(t)/\nu] s(t)/\nu dt}{\sqrt{\nu \int_0^T \ln^2[1+s(t)/\nu] dt}},$$

$$\sigma_N^2 = \nu \int_0^T \ln^2[1+s(t)/\nu] dt,$$

а $Q = (R_{\max} - R_{\min})(V_{\max} - V_{\min})(A_{\max} - A_{\min})$ — евклидов объём априорной области \mathbf{W} возможных значений неизвестных параметров. Величина ξ имеет смысл приведённого объёма из монографии [7] априорной области возможных значений неизвестных дальности, скорости и ускорения, который определяет число различных значений дальности, скорости и ускорения (4) в области \mathbf{W} .

Отношение сигнал/шум (ОСШ) для приёмника с максимальным правдоподобием (3) согласно работам [4, 6] имеет вид

$$z_N^2 = \frac{N}{\nu} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \ln[1+s(t)/\nu] s(t) dt \right]^2 \bigg/ \int_{-\infty}^{+\infty} \ln^2[1+s(t)/\nu] [1+s(t)/\nu] dt. \quad (9)$$

Оценка максимального правдоподобия (4) при большом отношении сигнал/шум (9) является асимптотически эффективной, а также несмещённой и состоятельной.

Аппаратурная реализация оценки (4) весьма затруднительна, поскольку, как правило, для создания измерителя с максимальным правдоподобием приходится использовать многоканальную (по скорости и ускорению) схему. В этом случае измеритель содержит параллельные каналы,

каждый из которых вырабатывает логарифм функционала отношения правдоподобия в одной из некоторого набора точек априорной области возможных значений скорости и ускорения. Каждый канал измерителя содержит согласованный фильтр для одного импульса и идеальный гребенчатый фильтр. Однако техническая реализация гребенчатого фильтра при большом числе импульсов и большом априорном интервале изменения скорости и ускорения затруднительна вследствие жёстких требований к стабильности параметров линии задержки и высокой точности расположения отводов, обеспечивающей синхронность накопления импульсов.

2. ОЦЕНКИ ВРЕМЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ИМПУЛЬСА

С целью упростить реализацию оптического измерителя дальности, скорости и ускорения, рассмотрим возможность определить их по результатам лазерных измерений дальности R_k в каждом периоде повторения последовательности оптических импульсов.

Введём обозначения

$$\begin{aligned}\lambda_k &= 2R/c + (k - \mu)(1 + 2V/c)\theta + A(k - \mu)^2\theta^2/c, \\ \lambda_{0k} &= 2R_0/c + (k - \mu)(1 + 2V_0/c)\theta + A_0(k - \mu)^2\theta^2/c.\end{aligned}\quad (10)$$

Здесь переменные λ_k и λ_{0k} имеют смысл временных положений k -го импульса. В обозначениях (10) интенсивность (2) принимаемого сигнала может быть записана как

$$s_N(t, R_0, V_0, A_0) = \sum_{k=0}^{N-1} s(t - \lambda_{0k}).$$

Здесь временное положение k -го импульса λ_k , определяющее дальность цели $R_k = c\lambda_k/2$ в каждом периоде повторения $[t_k, t_{k+1}]$, принимает значения из априорного интервала

$$\begin{aligned}\Lambda_k &= [\Lambda_{k \min}, \Lambda_{k \max}], \\ \Lambda_{k \min} &= \begin{cases} 2R_{\min}/c + (k - \mu)(1 + 2V_{\min}/c)\theta + A_{\min}(k - \mu)^2\theta^2/c, & k > \mu; \\ 2R_{\min}/c + (k - \mu)(1 + 2V_{\max}/c)\theta + A_{\min}(k - \mu)^2\theta^2/c, & k \leq \mu; \end{cases} \\ \Lambda_{k \max} &= \begin{cases} 2R_{\max}/c + (k - \mu)(1 + 2V_{\max}/c)\theta + A_{\max}(k - \mu)^2\theta^2/c, & k > \mu; \\ 2R_{\max}/c + (k - \mu)(1 + 2V_{\min}/c)\theta + A_{\max}(k - \mu)^2\theta^2/c, & k \leq \mu. \end{cases}\end{aligned}\quad (11)$$

Границы $\Lambda_{k \min}$ и $\Lambda_{k \max}$ определяются по-разному в зависимости от соотношения параметров k и μ . При этом середины $\Lambda_{\text{pr}k} = (\Lambda_{k \min} + \Lambda_{k \max})/2$ промежутков Λ_k находятся по формулам

$$\Lambda_{\text{pr}k} = 2R_{\text{pr}}/c + (k - \mu)(1 + 2V_{\text{pr}}/c)\theta + A_{\text{pr}}(k - \mu)^2\theta^2/c,$$

где

$$R_{\text{pr}} = \frac{R_{\max} + R_{\min}}{2}, \quad V_{\text{pr}} = \frac{V_{\max} + V_{\min}}{2}, \quad A_{\text{pr}} = \frac{A_{\max} + A_{\min}}{2}.$$

С учётом определений (10), оценки дальности, скорости и ускорения можно сформировать на основе оценок $\hat{\lambda}_k$ параметров λ_{0k} . Будем искать оценки $\hat{\lambda}_k$ времён прихода λ_{0k} импульсов последовательности отдельно в каждом периоде повторения методом максимального правдоподобия. Рассмотрим логарифм функционала отношения правдоподобия для одного импульса

$$L_k(\lambda_k) = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \ln[1 + s(t - \lambda_k)/\nu] d\pi(t) - \int_{t_k}^{t_{k+1}} s(t - \lambda_k) dt. \quad (12)$$

В качестве оценки $\hat{\lambda}_k$ возьмём точку наибольшего максимума логарифма функционала отношения правдоподобия (12)

$$\hat{\lambda}_k: L_k(\hat{\lambda}_k) = \sup L_k(\lambda_k), \quad \lambda_k \in \mathbf{\Lambda}_k. \quad (13)$$

Для того, чтобы рассчитать статистические характеристики оценки $\hat{\lambda}_k$ параметра λ_{0k} , представим логарифм (12) в виде суммы сигнальной и шумовой функций согласно работе [6]:

$$L_k(\lambda_k) = S_k(\lambda_{0k}, \lambda_k) + N_k(\lambda_k) + C. \quad (14)$$

Сигнальная функция определяется из соотношения

$$S_k(\lambda_{0k}, \lambda_k) = \langle L_k(\lambda_k) \rangle - C,$$

где угловыми скобками обозначено условное при фиксированном λ_{0k} математическое ожидание в предположении, что принимаемый сигнал $\pi(t)$ является пуассоновским процессом с интенсивностью $\beta_k(t) = s(t - \lambda_k) + \nu$ и соответствует истинному значению λ_{0k} параметра λ_k . Величина C определяется выражением

$$C = \nu \int_{t_k}^{t_{k+1}} \ln[1 + s(t - \lambda_k)/\nu] dt - \int_{t_k}^{t_{k+1}} s(t - \lambda_k) dt. \quad (15)$$

Поскольку параметр λ_k не зависит от энергии сигнала, величина C не зависит от значения оцениваемого параметра λ_k . Кроме того, поскольку энергия импульса не зависит от его номера k , величина C не зависит от номера k . Таким образом, для сигнальной функции имеем представление

$$S_k(\lambda_{0k}, \lambda_k) = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \ln[1 + s(t - \lambda_k)/\nu] s(t - \lambda_{0k}) dt. \quad (16)$$

Введём следующее обозначение для максимума сигнальной функции:

$$m_S = S_k(\lambda_{0k}, \lambda_{0k}) = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \ln[1 + s(t)/\nu] s(t) dt. \quad (17)$$

При этом точкой, в которой сигнальная функция (16) достигает наибольшего максимума, является истинное значение λ_{0k} параметра λ_k такое, что $S_k(\lambda_{0k}, \lambda_{0k}) = \sup S_k(\lambda_{0k}, \lambda_k)$ согласно работе [6]. Шумовую функцию определим выражением $N_k(\lambda_k) = L_k(\lambda_k) - \langle L_k(\lambda_k) \rangle$. Математическое ожидание шумовой функции равно нулю, а корреляционная функция для произвольных положений $\lambda_{1k}, \lambda_{2k} \in \mathbf{\Lambda}_k$ имеет вид

$$\begin{aligned} K_N(\lambda_{1k}, \lambda_{2k}) &= \langle N_k(\lambda_{1k}) N_k(\lambda_{2k}) \rangle = \\ &= \nu \int_{t_k}^{t_{k+1}} \ln[1 + s(t - \lambda_{1k})/\nu] \ln[1 + s(t - \lambda_{2k})/\nu] [1 + s(t - \lambda_{0k})/\nu] dt, \end{aligned} \quad (18)$$

где $\lambda_{1k} = 2R_1/c + (k - \mu)(1 + 2V_1/c)\theta + A_1(k - \mu)^2\theta^2/c$, $\lambda_{2k} = 2R_2/c + (k - \mu)(1 + 2V_2/c)\theta + A_2(k - \mu)^2\theta^2/c$. Выпишем выражение для дисперсии шумовой функции в точке максимума λ_{0k}

сигнальной функции:

$$\sigma_{SN}^2 = K_N(\lambda_{0k}, \lambda_{0k}) = \nu \int_{t_k}^{t_{k+1}} \ln^2[1 + s(t)/\nu] [1 + s(t)/\nu] dt. \quad (19)$$

Из формул (17) и (19) следует, что отношение сигнал/шум в случае приёма одного импульса последовательности (2) согласно работе [6] имеет вид

$$z_1^2 = \frac{m_S^2}{\sigma_{SN}^2} = \frac{1}{\nu} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \ln[1 + s(t)/\nu] s(t) dt \right]^2 / \int_{-\infty}^{+\infty} \ln^2[1 + s(t)/\nu] [1 + s(t)/\nu] dt. \quad (20)$$

Определим длительности $\Delta\lambda$ сигнальных функций (16) соотношением $S_k(\lambda_{0k}, \lambda_{0k} \pm \Delta\lambda) \approx 0$. Длительности $\Delta\lambda$ сигнальных функций не зависят от номера k , т. к. предполагается, что формы всех импульсов в одной последовательности одинаковы. Обозначим через $\Lambda_{kS} = [\lambda_{0k} - \Delta\lambda; \lambda_{0k} + \Delta\lambda]$ подобласть априорной области (11), в которой центральный пик сигнальной функции (16) существенно отличен от нуля, а через Λ_{kN} — дополнение интервала Λ_{kS} до Λ_k . Назовём интервал Λ_{kS} сигнальной областью, а Λ_{kN} — шумовой областью. По определению сигнальная функция $S_k(\lambda_{0k}, \lambda_k) \approx 0$ при $\lambda_k \in \Lambda_{kN}$.

Рассмотрим вначале случай, когда оценка $\hat{\lambda}_k$ попадает в сигнальную область Λ_{kS} . Такую оценку называют надёжной согласно монографии [6].

Характеристики надёжной оценки можно найти из решения уравнения правдоподобия, приведённого в работе [6]. Решим это уравнение методом [6] малого параметра, в качестве которого используем величину $\varepsilon = 1/z_1$, обратную отношению сигнал/шум (20). Ограничиваясь первым приближением, находим математическое ожидание надёжной оценки

$$m_{0k}(\hat{\lambda}_k | R_0, V_0, A_0) = \langle \hat{\lambda}_k \rangle = \lambda_{0k} = 2R_0/c + (k - \mu)(1 + 2V_0/c)\theta + A_0(k - \mu)^2\theta^2/c \quad (21)$$

и её дисперсию согласно работе [8]

$$\sigma_0^2 = \langle (\hat{\lambda}_k - \lambda_{0k})^2 \rangle = 1/\alpha. \quad (22)$$

Здесь величина α определена формулой (8). Если кроме требования

$$z_1 \gg 1$$

выполняется условие из статьи [9]

$$\int_{-\infty}^{+\infty} s(t) dt + \nu\tau \gg 1, \quad (23)$$

то надёжная оценка приближённо является гауссовской случайной величиной. В неравенстве (23) через τ обозначена длительность одного оптического импульса с интенсивностью $s(t)$.

Если отношение сигнал/шум (20) не слишком велико, а для априорного интервала возможных значений временных положений λ_k выполняется неравенство

$$\Delta\Lambda_{prk}/\Delta\lambda \gg 1, \quad (24)$$

где

$$\Delta\Lambda_{prk} = \Lambda_{k \max} - \Lambda_{k \min} = 2\Delta R_{pr}/c + 2\Delta V_{pr}|k - \mu|\theta/c + \Delta A_{pr}(k - \mu)^2\theta^2/c, \quad (25)$$

то возможно появление аномальных ошибок согласно исследованию [6]. Для определения влияния аномальных ошибок необходимо найти вероятность надёжной оценки, следуя работе [6],

$$P_{0\lambda k} = P[\hat{\lambda}_k \in \Lambda_{kS}]. \quad (26)$$

Приближённую вероятность надёжной оценки $P_{0\lambda k}$ удаётся найти, когда допустима гауссовская аппроксимация распределения решающей статистики (12). В сигнальной области Λ_{kS} распределение логарифма функционала отношения правдоподобия приближённо является гауссовским при выполнении условия (23). В шумовой области Λ_{kN} распределение логарифма функционала отношения правдоподобия можно аппроксимировать гауссовским, если вместе с неравенством (23) выполняется условие из статьи [9]

$$\nu\tau \gg 1. \quad (27)$$

Очевидно, при выполнении соотношения (27) всегда выполняется неравенство (23).

В силу определения (13) оценки положения $\hat{\lambda}_k$ с максимальным правдоподобием вероятность (26) надёжной оценки можно представить в виде

$$P_{0\lambda k} = P(H_S > H_N), \quad (28)$$

где

$$H_S = \sup_{\lambda_k \in \Lambda_{kS}} L_k(\lambda_k), \quad H_N = \sup_{\lambda_k \in \Lambda_{kN}} L_k(\lambda_k).$$

При выполненном условии (24) случайные величины H_S и H_N приближённо статистически независимы согласно работе [6]. Поэтому формула (28) принимает вид

$$P_{0\lambda k} = \int_{-\infty}^{+\infty} F_N(H) dF_S(H), \quad (29)$$

где $F_N(H)$ и $F_S(H)$ — функции распределения случайных величин H_N и H_S соответственно.

Найдём функцию распределения $F_S(H)$. Поскольку подынтервалы Λ_{kS} приближённо совпадают с областью высокой корреляции случайного процесса (14), то при достаточно большом отношении сигнал/шум (20) справедлива аппроксимация

$$L_k(\hat{\lambda}_k) \approx m_S + N_k(\lambda_{0k}). \quad (30)$$

Здесь и далее опущена несущественная константа (15). Поскольку случайная величина H_S является приближённо гауссовской с математическим ожиданием (17) и дисперсией (19), можно записать

$$F_S(H) = \Phi[(H - m_S)/\sigma_{SN}], \quad (31)$$

где $\Phi(x) = (2\pi)^{-1/2} \int_{-\infty}^x \exp(-t^2/2) dt$ — интеграл вероятности.

В области аномальных ошибок Λ_{kN} решающая статистика $L_k(\lambda_k)$ также имеет приближённо гауссовское распределение. Корреляционная функция шумовой функции в шумовой области несколько отличается от выражения (18). А именно, при положениях $\lambda_{1k}, \lambda_{2k} \in \Lambda_{kN}$ функция

$$K_N(\lambda_{2k}, \lambda_{1k}) = \nu \int_{t_k}^{t_{k+1}} \ln[1 + s(t - \lambda_{1k})/\nu] \ln[1 + s(t - \lambda_{2k})/\nu] dt,$$

так что в шумовой области логарифм функционала отношения правдоподобия является стационарным случайным процессом с дисперсией

$$\sigma_N^2 = K_N(\lambda_k, \lambda_k) = \nu \int_{t_k}^{t_{k+1}} \ln^2[1 + s(t)/\nu] dt.$$

Аппроксимация функции распределения наибольшего максимума помеховой составляющей H_N при выполненном неравенстве (24) и при большом отношении H/σ_N согласно работе [6] имеет вид

$$F_N(H) = \begin{cases} \exp \left[-\frac{\xi_k}{2\pi} \exp \left(-\frac{H^2}{2\sigma_N^2} \right) \right], & H \geq 0; \\ 0, & H < 0. \end{cases} \tag{32}$$

Здесь переменная

$$\begin{aligned} \xi_k &= \Delta\Lambda_{prk} \sqrt{\frac{1}{\sigma_N^2} \frac{\partial^2 K_N(\lambda_{1k}, \lambda_{2k})}{\partial \lambda_{1k} \partial \lambda_{2k}} \Big|_{\lambda_{1k}=\lambda_{2k}}} = \\ &= \frac{\Delta\Lambda_{prk}}{\nu} \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{[ds/dt(t)]^2}{[1 + s(t)/\nu]^2} dt} / \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} \ln^2[1 + s(t)/\nu] dt}, \end{aligned}$$

а параметр $\Delta\Lambda_{prk}$ определён формулой (25). Величины ξ_k имеют смысл приведённых длин из монографии [7] априорных интервалов возможных значений временных положений импульсов и определяют число различных значений временных положений в интервале Λ_k .

Подставляя выражения (31) и (32) в формулу (29), получаем приближённую вероятность надёжной оценки согласно работе [8]

$$P_{0\lambda k} = \frac{1}{\sqrt{2\pi(1 + \kappa_1^2)}} \int_0^\infty \exp \left[-\frac{(x - \eta_1)^2}{2(1 + \kappa_1^2)} - \frac{\xi_k}{2\pi} \exp \left(-\frac{x^2}{2} \right) \right] dx. \tag{33}$$

Здесь коэффициенты

$$\begin{aligned} \kappa_1^2 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \ln^2[1 + s(t)/\nu] s(t)/\nu dt / \int_{-\infty}^{+\infty} \ln^2[1 + s(t)/\nu] dt, \\ \eta_1 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \ln[1 + s(t)/\nu] s(t) dt / \sqrt{\nu \int_{-\infty}^{+\infty} \ln^2[1 + s(t)/\nu] dt}. \end{aligned}$$

Точность формулы (33) улучшается с увеличением переменных ξ_k и отношения сигнал/шум (20).

При возможном наличии аномальных ошибок, оценки (13) являются статистически независимыми случайными величинами с плотностью вероятности из монографии [6]

$$W_k(\hat{\lambda}_k) = P_{0\lambda k} W_0(\hat{\lambda}_k) + P_{a\lambda k} W_a(\hat{\lambda}_k). \tag{34}$$

Здесь $W_0(\hat{\lambda}_k)$ — гауссовская плотность вероятности надёжной оценки $\hat{\lambda}_k$, которая обладает моментами (21) и (22). В силу стационарности логарифма (12) в шумовой области, плотность вероятности $W_a(\hat{\lambda}_k)$ аномальной оценки постоянна в априорном интервале (11) согласно монографии [6]. Поэтому первые два условных (по отношению к R_0 , V_0 и A_0) момента оценки (13) определяются выражениями

$$\begin{aligned} m_k &= m_k(\hat{\lambda}_k | R_0, V_0, A_0) = \langle \hat{\lambda}_k \rangle = P_{0\lambda k} \lambda_{0k} + (1 - P_{0\lambda k}) \Lambda_{\text{pr}k} = \\ &= P_{0\lambda k} [2R_0/c + (k - \mu)(1 + 2V_0/c)\theta + A_0(k - \mu)^2 \theta^2/c] + \\ &+ (1 - P_{0\lambda k}) [2R_{\text{pr}}/c + (k - \mu)(1 + 2V_{\text{pr}}/c)\theta + A_{\text{pr}}(k - \mu)^2 \theta^2/c], \quad (35) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_k^2 &= \sigma_k^2(\hat{\lambda}_k | R_0, V_0, A_0) = \langle (\hat{\lambda}_k - \langle \hat{\lambda}_k \rangle)^2 \rangle = \\ &= \frac{P_{0\lambda k}}{\alpha} + \frac{1 - P_{0\lambda k}}{12} \Delta \Lambda_{\text{pr}k}^2 + P_{0\lambda k} (1 - P_{0\lambda k}) (\Lambda_{\text{pr}k} - \lambda_{0k})^2 = \\ &= \frac{P_{0\lambda k}}{\alpha} + \frac{1 - P_{0\lambda k}}{12c^2} [2 \Delta R_{\text{pr}} + 2 \Delta V_{\text{pr}} |k - \mu| \theta + \Delta A_{\text{pr}} (k - \mu)^2 \theta^2]^2 + \\ &+ \frac{P_{0\lambda k} (1 - P_{0\lambda k})}{c^2} [2(R_{\text{pr}} - R_0) + 2(V_{\text{pr}} - V_0)(k - \mu)\theta + (A_{\text{pr}} - A_0)(k - \mu)^2 \theta^2]^2. \quad (36) \end{aligned}$$

Соответственно, условные смещение и рассеяние оценки (13) можно записать как

$$\begin{aligned} b_k &= b_k(\hat{\lambda}_k | R_0, V_0, A_0) = \langle \hat{\lambda}_k - \lambda_{0k} \rangle = (1 - P_{0\lambda k}) (\Lambda_{\text{pr}k} - \lambda_{0k}) = \\ &= 2(R_{\text{pr}} - R_0)/c + 2(k - \mu)(V_{\text{pr}} - V_0)\theta/c + (A_{\text{pr}} - A_0)(k - \mu)^2 \theta^2/c, \\ B_k &= B_k(\hat{\lambda}_k | R_0, V_0, A_0) = \langle (\hat{\lambda}_k - \lambda_{0k})^2 \rangle = \frac{P_{0\lambda k}}{\alpha} + (1 - P_{0\lambda k}) \left[\frac{\Delta \Lambda_{\text{pr}k}^2}{12} + (\Lambda_{\text{pr}k} - \lambda_{0k})^2 \right] = \\ &= \frac{P_{0\lambda k}}{\alpha} + \frac{1 - P_{0\lambda k}}{c^2} \left\{ \frac{1}{12} [2 \Delta R_{\text{pr}} c + 2 \Delta V_{\text{pr}} |k - \mu| \theta + \Delta A_{\text{pr}} (k - \mu)^2 \theta^2]^2 + \right. \\ &\quad \left. + [2(R_{\text{pr}} - R_0) + 2(V_{\text{pr}} - V_0)(k - \mu)\theta + (A_{\text{pr}} - A_0)(k - \mu)^2 \theta^2]^2 \right\}. \end{aligned}$$

3. КВАЗИОПТИМАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ

Рассмотрим возможность применить оценки (13) с максимальным правдоподобием для получения оценок дальности, скорости и ускорения. Как видно из формулы (34), распределение оценок (13) при наличии аномальных ошибок является негауссовским. Вследствие сравнительно сложного вида этого негауссовского распределения синтез квазиоптимальной оценки затруднителен. Поэтому при отыскании квазиоптимальной оценки ограничимся гауссовской аппроксимацией распределения оценок (13), которая справедлива для значений $P_{0\lambda k}$, близких к единице. Тогда для условной плотности вероятности случайной величины (13) в случае надёжной оценки можно записать приближённую формулу

$$W_k(\hat{\lambda}_k | R, V, A) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ - \frac{[\hat{\lambda}_k - m_{0k}(\hat{\lambda}_k | R, V, A)]^2}{2\sigma_0^2} \right\}, \quad (37)$$

где математическое ожидание $m_{0k}(R, V, A)$ определено выражением (21), а дисперсия σ_0^2 — равенством (22).

Набор из N независимых случайных величин (13) используем в качестве исходной статистики для получения квазиоптимальных оценок дальности \hat{R} , скорости \hat{V} и ускорения \hat{A} . Соответствующая функция правдоподобия имеет вид

$$W(\hat{\lambda}_0, \dots, \hat{\lambda}_{N-1} | R, V, A) = \prod_{k=0}^{N-1} W_k(\hat{\lambda}_k | R, V, A). \quad (38)$$

Подставляя формулу (37) в равенство (38) и опуская несущественные слагаемые, для логарифма функции правдоподобия получаем выражение

$$\begin{aligned} \ln W(\hat{\lambda}_0, \dots, \hat{\lambda}_{N-1} | R, V, A) = \\ = -\frac{1}{2\sigma_0^2} \sum_{k=0}^{N-1} [\hat{\lambda}_k - 2R/c - (k - \mu)(1 + 2V/c)\theta - A(k - \mu)^2 \theta^2/c]^2. \end{aligned} \quad (39)$$

Согласно методу максимального правдоподобия в качестве оценок \hat{R} , \hat{V} и \hat{A} следует взять значения, при которых функция (39) максимальна. Как известно, в точке максимума должны выполняться условия

$$\frac{\partial \ln W}{\partial R} = 0, \quad \frac{\partial \ln W}{\partial V} = 0, \quad \frac{\partial \ln W}{\partial A} = 0.$$

В подробной записи эти уравнения имеют вид

$$\frac{1}{c} \begin{pmatrix} 4M_0 & 4\theta M_1 & 2\theta^2 M_2 \\ 4\theta M_1 & 4\theta^2 M_2 & 2\theta^3 M_3 \\ 2\theta^2 M_2 & 2\theta^3 M_3 & \theta^4 M_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{R} \\ \hat{V} \\ \hat{A} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\hat{M}_0 - 2\theta M_1 \\ 2\theta \hat{M}_1 - 2\theta^2 M_2 \\ \theta^2 \hat{M}_2 - \theta^3 M_3 \end{pmatrix}, \quad (40)$$

где коэффициенты M_n определены формулой (8), а величины

$$\hat{M}_n = \sum_{k=0}^{N-1} [(k - \mu)^n \hat{\lambda}_k].$$

Решая уравнения (40), получаем вектор

$$\begin{pmatrix} \hat{R} \\ \hat{V} \\ \hat{A} \end{pmatrix} = \sum_{k=0}^{N-1} \begin{pmatrix} \delta_{Rk} \\ \delta_{Vk} \\ \delta_{Ak} \end{pmatrix} \hat{\lambda}_k - \begin{pmatrix} 0 \\ c/2 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (41)$$

где элементы

$$\begin{aligned} \delta_{Rk} &= \frac{c [(M_2 M_4 - M_3^2) + (k - \mu)(M_2 M_3 - M_1 M_4) + (k - \mu)^2 (M_1 M_3 - M_2^2)]}{2 [(2M_1 M_3 + M_0 M_4) M_2 - M_2^3 - M_0 M_3^2 - M_1^2 M_4]}, \\ \delta_{Vk} &= \frac{c [(M_2 M_3 - M_1 M_4) + (k - \mu)(M_0 M_4 - M_2^2) + (k - \mu)^2 (M_1 M_2 - M_0 M_3)]}{2\theta [(2M_1 M_3 + M_0 M_4) M_2 - M_2^3 - M_0 M_3^2 - M_1^2 M_4]}, \\ \delta_{Ak} &= \frac{c [(M_1 M_3 - M_2^2) + (k - \mu)(M_1 M_2 - M_0 M_3) + (k - \mu)^2 (M_0 M_2 - M_1^2)]}{\theta^2 [(2M_1 M_3 + M_0 M_4) M_2 - M_2^3 - M_0 M_3^2 - M_1^2 M_4]}. \end{aligned}$$

Элементы δ_{Rk} , δ_{Vk} и δ_{Ak} зависят только от номера k и величины μ , поэтому их достаточно рассчитать один раз.

Поскольку оценки (41) получены на основе информации только об оценках $\hat{\lambda}_k$, а не полной информации о принимаемой реализации, то эти оценки не являются оценками максимального правдоподобия.

Реализовать описанный квазиоптимальный алгоритм можно при помощи блок-схемы, показанной на рис. 1. На вход приёмника поступает поток коротких импульсов, который является производной реализации пуассоновского случайного процесса $\pi'(t)$. Поток импульсов проходит через фильтр (блок 1) с импульсной характеристикой $h(t) = a \ln[1 + s(t^* - t)/\nu]$, где a — коэффициент передачи фильтра, t^* — задержка, причём необходима задержка $t^* > \tau$ при выполненном неравенстве (23). После фильтра сигнал умножается на функцию

$$\chi_k(t) = \begin{cases} 1, & t \in \Lambda_k, \\ 0, & t \notin \Lambda_k. \end{cases}$$

последовательно для всех номеров $k = 0, \dots, N-1$. Блок 2 (экстрематор) определяет временное положение наибольшего максимума сигнала, поступающего на вход, и вырабатывает последовательность оценок $\hat{\lambda}_k$, блок 3 — вычислительное устройство, рассчитывающее оценки дальности, скорости и ускорения по формуле (41).

Найдём характеристики квазиоптимальных оценок (41). Чтобы получить математические ожидания оценок (41), необходимо в эти оценки вместо оценок $\hat{\lambda}_k$ подставить их математические ожидания. В результате получим

$$\begin{pmatrix} \langle \hat{R} | R_0, V_0, A_0 \rangle \\ \langle \hat{V} | R_0, V_0, A_0 \rangle \\ \langle \hat{A} | R_0, V_0, A_0 \rangle \end{pmatrix} = \sum_{k=0}^{N-1} \begin{pmatrix} \delta_{Rk} \\ \delta_{Vk} \\ \delta_{Ak} \end{pmatrix} \langle \hat{\lambda}_k \rangle - \begin{pmatrix} 0 \\ c/2 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (42)$$

Вычитая из формулы (42) тождество

$$\begin{pmatrix} R_0 \\ V_0 \\ A_0 \end{pmatrix} = \sum_{k=0}^{N-1} \begin{pmatrix} \delta_{Rk} \\ \delta_{Vk} \\ \delta_{Ak} \end{pmatrix} \lambda_{0k} - \begin{pmatrix} 0 \\ c/2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

и используя формулу (35), получим выражение для условных смещений квазиоптимальных оценок

$$b(\hat{l} | R_0, V_0, A_0) = \frac{2}{c} \varphi_{l0} (R_{\text{пр}} - R_0) + \frac{2\theta}{c} \varphi_{l1} (V_{\text{пр}} - V_0) + \frac{\theta^2}{c} \varphi_{l2} (A_{\text{пр}} - A_0). \quad (43)$$

Здесь l — один из оцениваемых параметров движения, R , V или A , коэффициенты

$$\varphi_{lm} = \sum_{k=0}^{N-1} \delta_{lk} P_{a\lambda k} (k - \mu)^m, \quad m = 0, 1, 2, \quad (44)$$

а $P_{a\lambda k} = 1 - P_{0\lambda k}$ — вероятность аномальной ошибки [6].

Согласно формуле (43), квазиоптимальные оценки (41) при наличии аномальных ошибок являются условно смещёнными. Используя независимость случайных величин (13), из равенств (36),

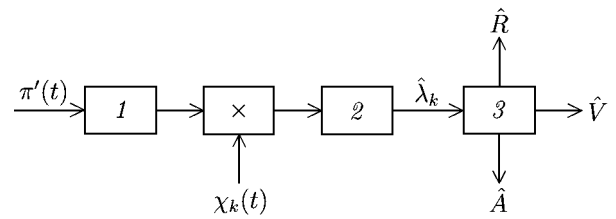


Рис. 1. Блок-схема квазиоптимального измерителя

(41) и (43) получаем выражение для условного рассеяния квазиоптимальных оценок

$$B(\hat{l} | R_0, V_0, A_0) = \sum_{k=0}^{N-1} \delta_{lk}^2 \sigma_k^2(\hat{\lambda}_k | R_0, V_0, A_0) + b^2(\hat{l} | R_0, V_0, A_0).$$

Подставляя в эту формулу выражения (36) и (43), получаем

$$\begin{aligned} B(\hat{l} | R_0, V_0, A_0) = & \frac{1}{\alpha} \sum_{k=0}^{N-1} \delta_{lk}^2 P_{0\lambda k} + \frac{1}{c^2} \left[\frac{1}{12} (4\chi_{l0} \Delta R_{pr}^2 + 4\theta^2 \chi_{l2} \Delta V_{pr}^2 + \theta^4 \chi_{l4} \Delta A_{pr}^2 + \right. \\ & + 8\theta \chi_{l1} \Delta R_{pr} \Delta V_{pr} + 4\theta^2 \chi_{l2} \Delta R_{pr} \Delta A_{pr} + 4\theta^3 \chi_{l3} \Delta V_{pr} \Delta A_{pr}) + \\ & + 4(\psi_{l0} + \varphi_{l0}^2)(R_{pr} - R_0)^2 + 4\theta^2(\psi_{l2} + \varphi_{l1}^2)(V_{pr} - V_0)^2 + \theta^4(\psi_{l4} + \varphi_{l2}^2)(A_{pr} - A_0)^2 + \\ & + 8\theta(\psi_{l1} + \varphi_{l0}\varphi_{l1})(R_{pr} - R_0)(V_{pr} - V_0) + 4\theta^3(\psi_{l2} + \varphi_{l0}\varphi_{l2})(R_{pr} - R_0)(A_{pr} - A_0) + \\ & \left. + 4\theta^3(\psi_{l3} + \varphi_{l1}\varphi_{l2})(V_{pr} - V_0)(A_{pr} - A_0) \right], \quad (45) \end{aligned}$$

где

$$\chi_{lm} = \sum_{k=0}^{N-1} \delta_{lk}^2 P_{a\lambda k} |k - \mu|^m, \quad \psi_{lm} = \sum_{k=0}^{N-1} \delta_{lk}^2 P_{0\lambda k} P_{a\lambda k} (k - \mu)^m, \quad (46)$$

а коэффициенты φ_{lm} определены выражением (44).

С увеличением отношения сигнал/шум (20) для одного импульса последовательности (2) вероятность надёжной оценки временного положения оптического импульса (33) возрастает, т. е. $P_{0\lambda k} \rightarrow 1$, а $P_{a\lambda k} \rightarrow 0$ при $z_1 \rightarrow \infty$. Соответственно из формул (43) и (45) при этом имеем

$$b(\hat{R} | R_0, V_0, A_0) \rightarrow 0, \quad b(\hat{V} | R_0, V_0, A_0) \rightarrow 0, \quad b(\hat{A} | R_0, V_0, A_0) \rightarrow 0 \quad (47)$$

и

$$B(\hat{l} | R_0, V_0, A_0) \rightarrow \frac{1}{\alpha} \sum_{k=0}^{N-1} \delta_{lk}^2. \quad (48)$$

Выполняя суммирование, получаем при большом отношении сигнал/шум (20)

$$B(\hat{R} | R_0, V_0, A_0) = D_0(\tilde{R}), \quad B(\hat{V} | R_0, V_0, A_0) = D_0(\tilde{V}), \quad B(\hat{A} | R_0, V_0, A_0) = D_0(\tilde{A}). \quad (49)$$

Здесь величины $D_0(\tilde{R})$, $D_0(\tilde{V})$ и $D_0(\tilde{A})$ определены выражениями (7) и представляют собой дисперсии совместно эффективных оценок параметров движения. Следовательно, квазиоптимальные оценки (41) являются асимптотически (с ростом отношения сигнал/шум (20)) условно несмещёнными согласно пределам (47) и совместно эффективными согласно пределу (49).

Найдём далее безусловные характеристики квазиоптимальных оценок (41). Будем считать, что истинные значения R_0 , V_0 и A_0 равномерно распределены в априорной области \mathbf{W} . Усредняя выражение (43) по равномерно распределённым значениям величин R_0 , V_0 и A_0 , для безусловных смещений получаем

$$\begin{aligned} b(\hat{R}) = \langle B(\hat{R} | R_0, V_0, A_0) \rangle &= 0, \quad b(\hat{V}) = \langle B(\hat{V} | R_0, V_0, A_0) \rangle = 0, \\ b(\hat{A}) = \langle B(\hat{A} | R_0, V_0, A_0) \rangle &= 0. \end{aligned}$$

Следовательно, квазиоптимальные оценки (41) безусловно несмещённые.

Перейдём к нахождению безусловных рассеяний. Усредняя выражение (45) по равномерно распределённым значениям величин R_0 , V_0 и A_0 , для безусловных рассеяний квазиоптимальных оценок (41) находим

$$B(\hat{l}) = \frac{1}{\alpha} \sum_{k=0}^{N-1} \delta_{lk}^2 P_{0\lambda k} + \frac{1}{12c^2} \left[4(\chi_{l0} + \varphi_{l0} + \psi_{l0}^2) \Delta R_{\text{pr}}^2 + 4\theta^2 (\chi_{l2} + \varphi_{l2} + \psi_{l2}^2) \Delta V_{\text{pr}}^2 + \right. \\ \left. + \theta^4 (\chi_{l4} + \varphi_{l4} + \psi_{l4}^2) \Delta A_{\text{pr}}^2 + 8\theta \chi_{l1} \Delta R_{\text{pr}} \Delta V_{\text{pr}} + 4\theta^2 \chi_{\text{pr}} \Delta R_{\text{pr}} \Delta A_{\text{pr}} + 4\theta^3 \chi_{l3} \Delta V_{\text{pr}} A_{\text{pr}} \right]. \quad (50)$$

Сопоставляя выражения (6) и (50), можно найти потери в точности квазиоптимальных оценок (41) по сравнению с точностью оценок (4) с максимальным правдоподобием.

С увеличением отношения сигнал/шум (20) вероятность надёжной оценки $P_{0\lambda k} \rightarrow 1$, $P_{\alpha\lambda k} \rightarrow 0$, см. формулу (33). Соответственно из выражения (50) при этом имеем

$$B(\hat{l}) \rightarrow \frac{1}{\alpha} \sum_{k=0}^{N-1} \delta_{lk}^2,$$

что аналогично пределу (48). Следовательно, безусловные рассеяния квазиоптимальных оценок (41) с ростом отношения сигнал/шум (20) асимптотически совпадают с безусловными рассеяниями оценок максимального правдоподобия (4).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемые квазиоптимальные оценки (41), как и оценки (4) с максимальным правдоподобием, являются асимптотически эффективными с ростом отношения сигнал/шум. Для того, чтобы оценки (4) с максимальным правдоподобием были близки к эффективным, необходимо, чтобы отношение сигнал/шум (9) было велико для всей наблюдаемой последовательности оптических импульсов с интенсивностью (2). Для близости квазиоптимальных оценок к эффективным необходимо, чтобы отношение сигнал/шум (20) было велико для каждого импульса наблюдаемой последовательности оптических импульсов. Поэтому обеспечение высокой апостериорной точности квазиоптимальных оценок требует существенно большей энергии полезного сигнала.

Таким образом, если выполняются условия для высокой апостериорной точности оценок временных положений каждого импульса, вместо трудно реализуемого алгоритма максимального правдоподобия (4), фактически без потерь в точности, можно использовать более просто реализуемый квазиоптимальный алгоритм (41). Кроме того, алгоритм (41) можно использовать для обработки результатов измерения в существующих высокоточных лазерных дальномерах с целью получить дополнительную информацию о скорости и ускорении цели.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 13-01-97504 и 13-08-00735), Российского научного фонда (проект 14-29-00208) и Минобрнауки РФ (проект 978).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьёв В. И. Оптическая локация для радиоинженеров. М.: Радио и связь, 1983. 176 с.
2. Долинин Н. А., Терпугов А. Ф. Статистические методы в оптической локации. Томск: ТГУ, 1982. 256 с.
3. Трифонов А. П., Беспалова М. Б., Максимов М. В. // Радиотехника. 2001. № 4. С. 99.

4. Трифонов А. П., Беспалова М. Б., Максимов М. В. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2002. Т. 45, № 6. С. 3.
5. Трифонов А. П., Беспалова М. Б., Курбатов А. В. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2013. Т. 56, № 1. С. 24.
6. Куликов Е. И., Трифонов А. П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. М.: Сов. радио, 1978. 296 с.
7. Трифонов А. П., Шинаков Ю. С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
8. Трифонов А. П., Невежин Ю. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42, № 12. С. 1201.
9. Большаков И. А., Ракошиц В. С. Прикладная теория случайных потоков. М.: Сов. радио, 1978. 248 с.

Поступила в редакцию 14 октября 2013 г.; принята в печать 28 февраля 2014 г.

QUASIOPTIMAL ESTIMATION OF MOTION PARAMETERS BASED ON LASER MEASUREMENTS OF RANGE

A. P. Trifonov and A. V. Kurbatov

An algorithm for estimation of range, velocity, and acceleration based on measurements of range in each repetition period of the probing sequence of optical pulses is synthesized. Characteristics of estimates with allowance for abnormal errors are found. It is shown that the offered estimates are consistent, asymptotic (the signal-to-noise ratio increases for each pulse), unbiased, and efficient.