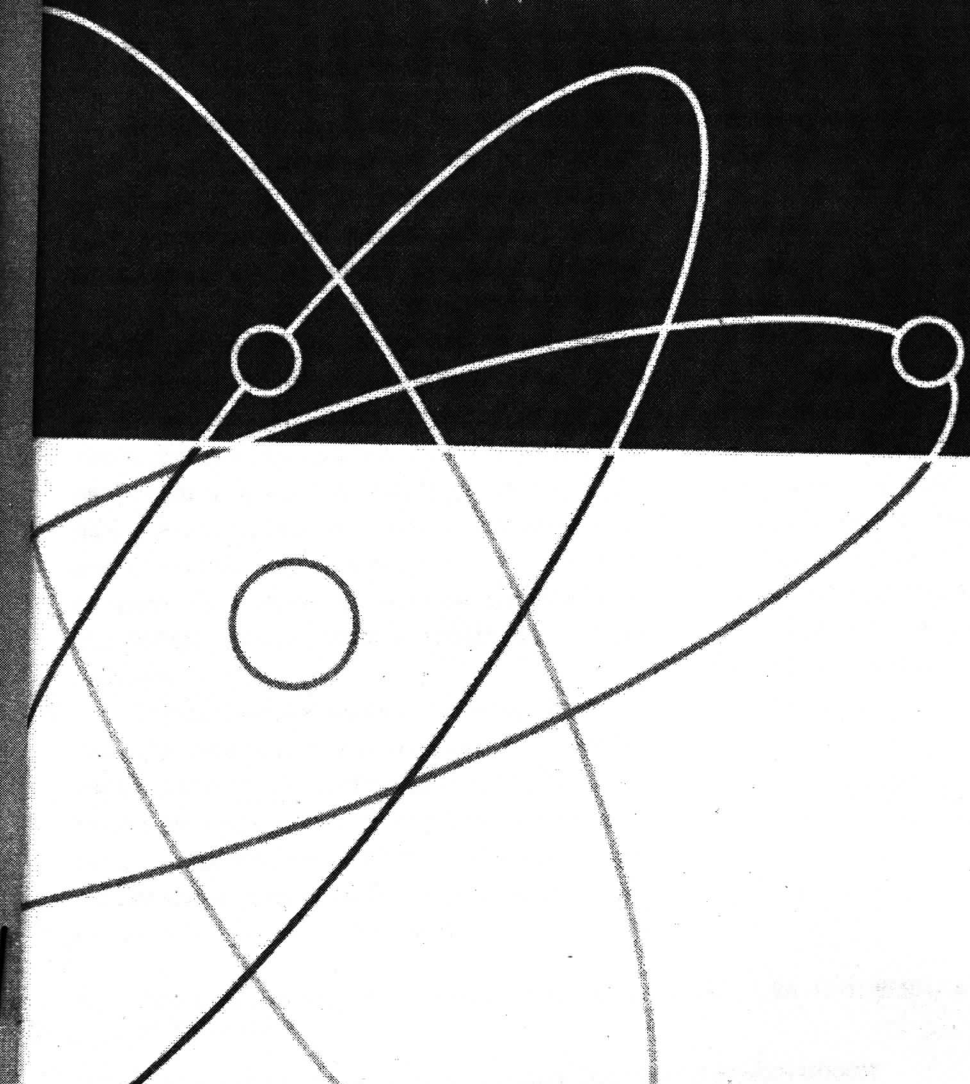
300 300

Том 56, № 2
февраль 2013

ISSN 0021-3470

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ



ИЗДАНИЕ
НАЦИОНАЛЬНОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
УКРАИНЫ
«КИЕВСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ»

УДК 621.396

ТРИФОНОВ А. П., КУРБАТОВ А. В.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ БЫСТРО ФЛУКТУИРУЮЩЕЙ ЦЕЛИ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ*

Воронежский государственный университет,
Россия, Воронеж, 394006, Университетская пл., д. 1

Аннотация. Получены характеристики эффективных оценок дальности, скорости и ускорения быстро флуктуирующей цели при зондировании последовательностью оптических импульсов. Найдены потери в точности оценки дальности, скорости и ускорения вследствие наличия неинформативных параметров

Ключевые слова: дальность, скорость, ускорение, оценка максимального правдоподобия, состоятельность оценок, корреляционная матрица оценок

В системах оптической локации широко применяются последовательности оптических импульсов [1–4]. В [3] исследована потенциальная точность оценок таких параметров движения цели, как дальность, скорость и ускорение. При этом предполагалось, что все параметры рассеянной целью последовательности, кроме оцениваемых, априори известны. Однако, в реальных условиях флуктуации цели, а также физические эффекты, сопровождающие рассеяние и распространение света в различных средах, приводят к тому, что интенсивность отдельных оптических импульсов может зависеть от конечного числа неинформативных параметров, в оценке которых нет необходимости.

Хотя в оценке неинформативных параметров нет необходимости, однако их наличие влияет на точность оценки информативных параметров, в качестве которых выступают дальность, скорость и ускорение. Зависимость интенсивности рассеянной последовательности оптических импульсов от неинформативных параметров определяется характером флуктуаций цели. При медленных флуктуациях цели значения параметров одинаковы для всех импульсов последовательности. Для быстро флуктуирующей — разные у различных импульсов.

В статье рассматривается случай, когда цель является быстро флуктуирующей. Обсуждается эффективность оценок дальности, скорости и ускорения цели при наличии у рассеянной последовательности оптических импульсов конечного числа произвольных неинформативных параметров.

Положим, что излучается последовательность оптических импульсов с интенсивностью

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

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 13-08-00735, № 13-01-97504) и Минобрнауки РФ (соглашение 14.B37.21.2032).

Электронный вариант статьи: http://radio.kpi.ua/article/view/S0021347013020027

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

В результате рассеяния зондирующей последовательности (1) целью, дальность R_0, скорость V_0 и ускорение A_0 которой необходимо оценить, интенсивность принимаемого сигнала запишется как [1, 3]

$$s(t, R_0, V_0, A_0, \vec{L}_0) =$$
$$= \sum_{k=0}^{N-1} s(t - 2R_0/c - (k-\mu)(1+2V_0/c)\theta -$$
$$-A_0(k-\mu)^2\theta^2/c, \vec{l}_{0k}), \qquad (2)$$

где функция $s(t, \vec{l}_{0k})$ описывает форму интенсивности одного рассеянного оптического импульса последовательности (2) и, в общем случае, отличается от $\hat{s}(t)$ в (1), где c — скорость света, причем $|V_0| << c$ и $N\theta|A_0| << c$.

В отличие от случая, рассмотренного в [3], последовательность импульсов зависит от неинформативных параметров, причем значения параметров разные для различных импульсов последовательности. Вектор

$$\vec{l}_{0k} = || l_{0k1}, l_{0k2}, \ldots, l_{0kp} ||$$

состоит из p неинформативных параметров, неизвестных в силу влияния флуктуаций цели и среды распространения. В случае, когда вектор $\vec{l}_{0k}$ не зависит от k, т.е. форма у всех импульсов последовательности одинакова, последовательность импульсов (2) принято называть медленно флуктуирующей. Если вектор $\vec{l}_{0k}$ изменяется с изменением k, последовательность импульсов (2) принято называть быстро флуктуирующей.

Физически необходимость рассмотрения быстро флуктуирующих последовательностей связана с тем, что за время, проходящее между посылкой отдельных импульсов последовательности, параметры одиночного импульса могут существенно изменяться вследствие флуктуации цели. Полный набор неинформативных параметров $\vec{l}_{0k}$, $k = 0, 1, \ldots, N-1$, будем записывать в виде $\vec{L}_0 = (\vec{l}_{00}, \vec{l}_{01}, \ldots, \vec{l}_{0N-1})$ или подробнее

$$\vec{L}_0 = || l_{001}, l_{002}, \ldots, l_{00p}; l_{011}, l_{012}, \ldots, l_{01p}; \ldots;$$
$$l_{0,N-1,1}, l_{0N-12}, \ldots, l_{0N-1p} ||.$$

Здесь и далее индексом «0» отмечены истинные значения неизвестных параметров принимаемой последовательности оптических импульсов с интенсивностью (2).

Предположим, что сигнал с интенсивностью (2) наблюдается в течение интервала времени $[0; T]$ на фоне оптического шума с интенсивностью $\nu > 0$. Следовательно, обработке доступна реализация пуассоновского процесса с интенсивностью

$$\beta(t, R_0, V_0, A_0, \vec{L}_0) = s(t, R_0, V_0, A_0, \vec{L}_0) + \nu. \qquad (3)$$

Согласно [5] для расчета потенциальной точности совместных оценок неизвестных параметров последовательности оптических импульсов с интенсивностью (2) вначале необходимо найти функцию неопределенности

$$H(R_1, R_2, V_1, V_2, A_1, A_2, \vec{L}_1, \vec{L}_2) =$$
$$= \int_0^T \beta(t, R_0, V_0, A_0, \vec{L}_0) \ln\left(\frac{\beta(t, R_1, V_1, A_1, \vec{L}_1)}{\nu}\right) \times$$

$$\times \ln\left(\frac{\beta(t, R_2, V_2, A_2, \vec{L}_2)}{\nu} \right) \mathrm{d}t. \qquad (4)$$

Будем считать, что интервал наблюдения $[0;T]$ больше длительности всей последовательности оптических импульсов, т. е. $T > N\theta$, а величина скважности последовательности не менее двух, так что отдельные импульсы не перекрываются. Тогда, подставляя (2) в (3), а (3) в (4), получаем

$$H(R_1, R_2, V_1, V_2, A_1, A_2, \vec{L}_1, \vec{L}_2) =$$

$$= \sum_{k=0}^{N-1} H_k(R_1, R_2, V_1, V_2, A_1, A_2, \vec{l}_{1k}, \vec{l}_{2k}), \qquad (5)$$

где

$$H_k(R_1, R_2, V_1, V_2, A_1, A_2, \vec{l}_{1k}, \vec{l}_{2k}) =$$

$$= \int_0^T (\nu + s(t - 2R_0 / c - (k-\mu)(1 + 2V_0 / c)\theta -$$

$$- A_0 (k-\mu)^2 \theta^2 / c, \vec{l}_{0k})) \ln(1 + s(t - 2R_1 / c -$$

$$-(k-\mu)(1 + 2V_1/c)\theta - A_1 (k-\mu)^2 \theta^2 / c, \vec{l}_{1k}) / \nu) \times$$

$$\times \ln(1 + s(t - 2R_2 / c - (k-\mu)(1 + 2V_2 / c)\theta -$$

$$- A_2 (k-\mu)^2 \theta^2 / c, \vec{l}_{2k}) / \nu) \mathrm{d}t. \qquad (6)$$

Рассмотрим регулярный случай [6], когда интенсивности отдельных оптических импульсов дифференцируемы по t и по всем параметрам l_{ki}, $k = 0, \ldots, N-1$, $i = 1, \ldots, p$. В этом случае потенциальная точность оценки как информативных, так и неинформативных параметров последовательности оптических импульсов с интенсивностью (2) характеризуется корреляционной матрицей совместно эффективных оценок

$$\mathbf{K}_p = \mathbf{I}^{-1}, \qquad (7)$$

где $\mathbf{I}$ — информационная матрица Фишера [6], которую представим в виде блочной матрицы

$$\mathbf{I} = \begin{Vmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B}^{\mathrm{T}} & \mathbf{D} \end{Vmatrix}, \qquad (8)$$

где «Т» — операция транспонирования, а блоки

$$\mathbf{A} = \begin{Vmatrix} \dfrac{\partial^2 H}{\partial R_1 \partial R_2} & \dfrac{\partial^2 H}{\partial R_1 \partial V_2} & \dfrac{\partial^2 H}{\partial R_1 \partial A_2} \\ \dfrac{\partial^2 H}{\partial V_1 \partial R_2} & \dfrac{\partial^2 H}{\partial V_1 \partial V_2} & \dfrac{\partial^2 H}{\partial V_1 \partial A_2} \\ \dfrac{\partial^2 H}{\partial A_1 \partial R_2} & \dfrac{\partial^2 H}{\partial A_1 \partial V_2} & \dfrac{\partial^2 H}{\partial A_1 \partial A_2} \end{Vmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{Vmatrix} \dfrac{\partial^2 H}{\partial R_1 \partial l_{2mj}} \\ \dfrac{\partial^2 H}{\partial V_1 \partial l_{2mj}} \\ \dfrac{\partial^2 H}{\partial A_1 \partial l_{2mj}} \end{Vmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{Vmatrix} \dfrac{\partial^2 H}{\partial l_{1ki} \partial l_{2mj}} \end{Vmatrix}.$$

Здесь все производные вычисляются при $R_1 = R_2 = R_0$, $V_1 = V_2 = V_0$, $A_1 = A_2 = A_0$, $l_{1ki} = l_{0ki}$ и $l_{2mj} = l_{0mj}$.

Отметим, что матрица $\mathbf{B}$ имеет размер $3 \times P$, где $P = Np$, а матрица $\mathbf{D}$ имеет размер $P \times P$. Будем считать, что внутренняя нумерация в строках этих матрицах организована следующим образом: $\mathbf{B}$ состоит из N блоков $\mathbf{B}_m$ размера $3 \times p$, а именно:

$$\mathbf{B} = \| \mathbf{B}_0, \mathbf{B}_1, \ldots, \mathbf{B}_{N-1} \|,$$

где

$$\mathbf{B}_m = \begin{Vmatrix} \dfrac{\partial^2 H}{\partial R_1 \partial l_{2m1}} & \dfrac{\partial^2 H}{\partial R_1 \partial l_{2m2}} & \cdots & \dfrac{\partial^2 H}{\partial R_1 \partial l_{2mp}} \\ \dfrac{\partial^2 H}{\partial V_1 \partial l_{2m1}} & \dfrac{\partial^2 H}{\partial V_1 \partial l_{2m2}} & \cdots & \dfrac{\partial^2 H}{\partial V_1 \partial l_{2mp}} \\ \dfrac{\partial^2 H}{\partial A_1 \partial l_{2m1}} & \dfrac{\partial^2 H}{\partial A_1 \partial l_{2m2}} & \cdots & \dfrac{\partial^2 H}{\partial A_1 \partial l_{2mp}} \end{Vmatrix},$$

а матрица **D** имеет вид

$$\mathbf{D} = \begin{Vmatrix} \mathbf{D}_{00} & \cdots & \mathbf{D}_{0N-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{D}_{N-10} & \cdots & \mathbf{D}_{N-1N-1} \end{Vmatrix},$$

где блоки

$$\mathbf{D}_{km} = \begin{Vmatrix} \dfrac{\partial^2 H}{\partial l_{1k1} \partial l_{2m1}} & \cdots & \dfrac{\partial^2 H}{\partial l_{1k1} \partial l_{2mp}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \dfrac{\partial^2 H}{\partial l_{1kp} \partial l_{2m1}} & \cdots & \dfrac{\partial^2 H}{\partial l_{1kp} \partial l_{2mp}} \end{Vmatrix}$$

имеют размер $p \times p$. Поскольку функция (5) состоит из N слагаемых, каждое из которых содержит неинформативные параметры, соответствующие только одному импульсу (со своим номером k), то для пар параметров l_{1k} и l_{2mj} с $k \neq m$ частные производные $\dfrac{\partial^2 H}{\partial l_{1ki} \partial l_{2mj}}$ равны нулю. Это означает, что матрица **D** является блочно-диагональной с блоками $\mathbf{D}_{kk}$ на диагонали.

Подставляя (6) в (5), а (5) в (8) и выполняя дифференцирование, получаем

$$\mathbf{A} = \frac{1}{c^2} \sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k \begin{Vmatrix} 4 & 4\theta(k-\mu) & 2\theta^2(k-\mu)^2 \\ 4\theta(k-\mu) & 4\theta^2(k-\mu)^2 & 2\theta^3(k-\mu)^3 \\ 2\theta^2(k-\mu)^2 & 2\theta^3(k-\mu)^3 & \theta^4(k-\mu)^4 \end{Vmatrix},$$

$$\mathbf{B}_k = -\frac{1}{c} \begin{Vmatrix} 2 \\ 2\theta(k-\mu) \\ \theta^2(k-\mu)^2 \end{Vmatrix} \vec{\beta}_k,$$

$$\vec{\beta}_k = \| \beta_{k1} \quad \beta_{k2} \quad \ldots \quad \beta_{kp} \|,$$

$$\mathbf{D}_{kk} = (D_{kikj})_{i,j=1,2,\ldots,p},$$

где

$$\alpha_k = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\nu + s(t, \vec{l}_{0k})} \left[\frac{\partial s(t, \vec{l}_{0k})}{\partial t} \right]^2 \mathrm{d}t,$$

$$\beta_{ki} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{(\nu + s(t, \vec{l}_{0k})} \left[\frac{\partial s(t, \vec{l}_k)}{\partial t} \frac{\partial s(t, \vec{l}_k)}{\partial l_{ki}} \right]_{\vec{l}_{0k}} \mathrm{d}t,$$

$$D_{ki\,kj} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\nu + s(t, \vec{l}_{0k})} \left[\frac{\partial s(t, \vec{l}_k)}{\partial l_{ki}} \frac{\partial s(t, \vec{l}_k)}{\partial l_{kj}} \right]_{\vec{l}_{0k}} \mathrm{d}t,$$

$$\mathbf{D}_{kk} = (D_{ki\,kj})_{i,j=1,2,\ldots,p}.$$

Неизвестные параметры $\vec{l}_{0k}$ являются неинформативными. Поэтому нет необходимости определять все элементы корреляционной матрицы (7). Достаточно найти элементы этой матрицы, расположенные на пересечении первых трех строк и столбцов матрицы (7), которые характеризуют потенциальную точность оценок дальности, скорости и ускорения.

Матрицу, образованную из элементов матрицы (7), расположенных на пересечении ее первых трех строк и столбцов, обозначим **K**, а обратную к ней — **F**. Таким образом,

$$\mathbf{K} = \mathbf{F}^{-1}.$$

Матрицу **F** можно найти с помощью формулы Фробениуса [7]. Действительно, полагая что матрица **D** в (8) невырождена, получаем

$$\mathbf{F} = \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{B}^{\mathrm{T}}.$$

Вычислим эту матрицу. Введем обозначение для элементов матрицы Δ_{kk}, обратной к матрице $\mathbf{D}_{kk} = ||D_{ki\,kj}||_{i,j=1,2,\ldots,p}$:

$$\mathbf{D}_{kk}^{-1} = ||D_{ki\,kj}||^{-1} = ||\Delta_{ki\,kj}||_{i,j=1,\ldots,p} = \Delta_{kk}.$$

Введем также обозначение

$$\rho_{pk} = \frac{1}{\alpha_k}\vec{\beta}_k \Delta_{kk} \vec{\beta}_k^T = \frac{1}{\alpha_k}\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{p}\beta_{ki}\Delta_{ki\,kj}\beta_{kj}.$$

В силу блочной диагональности матрицы $\mathbf{D}$ имеем

$$\mathbf{B}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{B}^{\mathrm{T}} = \sum_{k=0}^{N-1}\mathbf{B}_k\mathbf{D}_{kk}^{-1}\mathbf{B}_k^{\mathrm{T}} =$$

$$= \sum_{k=0}^{N-1}\left(-\frac{1}{c}\begin{Vmatrix} 2 \\ 2\theta(k-\mu) \\ \theta^2(k-\mu)^2 \end{Vmatrix}\vec{\beta}_k\right)\Delta_{kk} \times$$

$$\times\left(-\frac{1}{c}\vec{\beta}_k^T ||2,\, 2\theta(k-\mu),\, \theta^2(k-\mu)^2||\right) =$$

$$= \frac{1}{c^2}\sum_{k=0}^{N-1}\alpha_k\rho_{pk} \times$$

$$\times\begin{Vmatrix} 4 & 4\theta(k-\mu) & 2\theta^2(k-\mu)^2 \\ 4\theta(k-\mu) & 4\theta^2(k-\mu)^2 & 2\theta^3(k-\mu)^3 \\ 2\theta^2(k-\mu)^2 & 2\theta^3(k-\mu)^3 & \theta^4(k-\mu)^4 \end{Vmatrix}.$$

Отсюда

$$\mathbf{F} = \begin{Vmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{Vmatrix} = \frac{1}{c^2}\sum_{k=0}^{N-1}\alpha_k(1-\rho_{pk}) \times$$

$$\times\begin{Vmatrix} 4 & 4\theta(k-\mu) & 2\theta^2(k-\mu)^2 \\ 4\theta(k-\mu) & 4\theta^2(k-\mu)^2 & 2\theta^3(k-\mu)^3 \\ 2\theta^2(k-\mu)^2 & 2\theta^3(k-\mu)^3 & \theta^4(k-\mu)^4 \end{Vmatrix}. \quad (9)$$

Введем обозначение

$$M_n = \sum_{k=0}^{N-1}\alpha_k(1-\rho_{pk})(k-\mu)^n.$$

Используя его, можно записать

$$\mathbf{F} = \frac{1}{c^2}\begin{Vmatrix} 4M_0 & 4\theta M_1 & 2\theta^2 M_2 \\ 4\theta M_1 & 4\theta^2 M_2 & 2\theta^3 M_3 \\ 2\theta^2 M_2 & 2\theta^3 M_3 & \theta^4 M_4 \end{Vmatrix}.$$

Отсюда получаем $\mathbf{K}$ (см. внизу с. 28).

Предположим вначале, что скорость и ускорение цели априори известны и необходимо оценить только дальность цели. Тогда в силу (9) дисперсия эффективной оценки дальности для быстро флуктуирующей последовательности имеет вид

$$D(R|R_0,\vec{L}_0) = \frac{1}{F_{11}} = \frac{c^2}{4}\frac{1}{\sum_{k=0}^{N-1}\alpha_k(1-\rho_{pk})}.$$

$$\mathbf{K} = \frac{c^2}{(2M_1M_3 + M_0M_4)M_2 - M_2^3 - M_0M_3^2 - M_1^2M_4} \times$$

$$\times\begin{Vmatrix} \frac{1}{4}(M_2M_4 - M_3^2) & \frac{1}{4\theta}(M_2M_3 - M_1M_4) & \frac{1}{2\theta^2}(M_1M_3 - M_2^2) \\ \frac{1}{4\theta}(M_2M_3 - M_1M_4) & \frac{1}{4\theta^2}(M_0M_4 - M_2^2) & \frac{1}{2\theta^3}(M_1M_2 - M_0M_3) \\ \frac{1}{2\theta^2}(M_1M_3 - M_2^2) & \frac{1}{2\theta^3}(M_1M_2 - M_0M_3) & \frac{1}{\theta^4}(M_0M_2 - M_1^2) \end{Vmatrix}.$$

В случае $\rho_{pk} = 0$, что соответствует отсутствию неинформативных параметров:

$$D(R|R_0) = \frac{c^2}{4} \frac{1}{\sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k}.$$

Таким образом, проигрыш в точности оценки дальности R вследствие наличия неинформативных параметров характеризуется величиной

$$\chi(R|R_0) = \frac{D(R|R_0, \vec{L}_0)}{D(R|R_0)} = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k}{\sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k (1-\rho_{pk})}.$$

Положим далее, что дальность и ускорение цели априори известны и необходимо оценить только скорость цели. Тогда в силу (9) дисперсия эффективной оценки скорости имеет вид

$$D(V|V_0, \vec{L}_0) = \frac{1}{F_{22}} =$$

$$= \frac{c^2}{4\theta^2} \frac{1}{\sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k (1-\rho_{pk})(k-\mu)^2}.$$

В случае $\rho_{pk} = 0$, что соответствует отсутствию неинформативных параметров:

$$D(V|V_0) = \frac{c^2}{4\theta^2} \frac{1}{\sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k (k-\mu)^2}.$$

Отсюда видно, что проигрыш в точности оценки скорости V из-за наличия неинформативных параметров характеризуется величиной

$$\chi(V|V_0) = \frac{D(V|V_0, \vec{L}_0)}{D(V|V_0)} =$$

$$= \frac{\sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k (k-\mu)^2}{\sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k (1-\rho_{pk})(k-\mu)^2}.$$

Положим теперь, что дальность и скорость цели априори известны и необходимо оценить только ускорение цели. Тогда в силу формулы (9) дисперсия эффективной оценки ускорения имеет вид

$$D(A|A_0, \vec{L}_0) = \frac{1}{F_{33}} = \frac{c^2}{\theta^4} \frac{1}{\sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k (1-\rho_{pk})(k-\mu)^4}.$$

В случае $\rho_{pk} = 0$, что соответствует отсутствию неинформативных параметров:

$$D(A|A_0) = \frac{c^2}{\theta^4} \frac{1}{\sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k (k-\mu)^4}.$$

Следовательно, проигрыш в точности оценки ускорения A из-за наличия неинформативных параметров, в предположении, что известны дальность и скорость, характеризуется величиной

$$\chi(A|A_0) = \frac{D(A|A_0, \vec{L}_0)}{D(A|A_0)} =$$

$$= \frac{\sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k (k-\mu)^4}{\sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k (1-\rho_{pk})(k-\mu)^4}.$$

Полученные выражения существенно упрощаются, если все неинформативные параметры являются неэнергетическими [8] или истинные значения неинформативных параметров одинаковы для всех импульсов последовательности (2). Последнее предположение соответствует случаю, когда после-

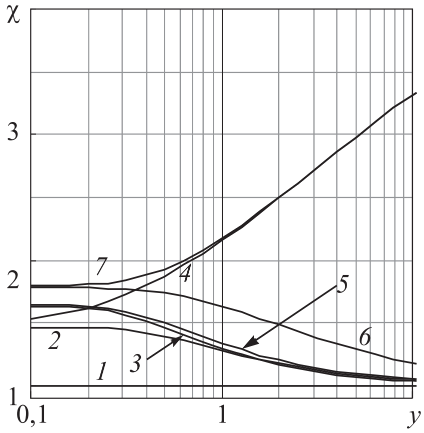


Рис. 1

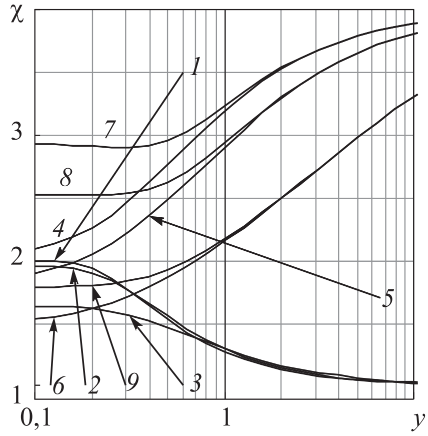


Рис. 2

довательность медленно флуктуирующая, но обрабатывается как быстро флуктуирующая. Следовательно

$$\alpha_0 = \alpha_1 = \ldots = \alpha_k = \ldots = \alpha,$$

$$\rho_{p0} = \rho_{p1} = \ldots = \rho_{pk} = \ldots = \rho_p,$$

а выражения для проигрыша в точности оценок принимают вид

$$\chi(R|R_0) = \chi(V|V_0) = \chi(A|A_0) = \chi = (1-\rho_p)^{-1}.$$

Следовательно, проигрыш в точности оценок вследствие наличия неинформативных параметров оказывается одинаковым для всех параметров движения цели.

Найдем проигрыш в точности оценки параметров движения цели при использовании оптических импульсов, обладающих интенсивностью вида

$$s(t,\vec{l}) = a\left\{\eta(t)\left[1-\exp\left(-\frac{t}{\Delta}\right)\right]-\right.$$

$$\left.-\eta(t-\tau)\left[1-\exp\left(-\frac{t-\tau}{\Delta}\right)\right]\right\},$$

$$\eta(t) = \begin{cases} 1, & t \ge 0, \\ 0, & t < 0, \end{cases} \quad \vec{l} = \{a, \tau, \Delta\}, \qquad (10)$$

где τ — длительность импульса, Δ — характеризует длину фронта импульса, a — амплитудный множитель.

При оценке параметров движения цели с использованием последовательности импульсов вида (10) каждый импульс может иметь до 3 неинформативных параметров ($p \le 3$): a, τ, Δ.

На рис. 1 приведена зависимость проигрыша χ в точности оценки от параметра $y = \Delta / \tau$, характеризующего отношение длительности фронта импульса к длительности импульса, для различных наборов неинформативных параметров при $q = a / \nu = 10$. Кривая *1* иллюстрирует проигрыш в точности оценки, когда неинформативным является параметр a. Как видно, наличие неинформативного параметра a не ухудшает характеристик эффективных оценок параметров движения. Кривые *2* и *3* иллюстрируют проигрыш в точности оценки, когда неинформативными являются, соответственно, параметры τ и Δ; *4* — a и τ; *5* — a и Δ; *6* — τ и Δ; *7* — все три параметра a, τ, Δ.

Сопоставление кривых позволяет определить влияние наличия различных неинформативных параметров импульса (10) на точность эффективной оценки параметров движения при быстрых флуктуациях цели. Из рис. 1 видно, что с увеличением параметра y проигрыш из-за наличия некоторых неинформативных параметров (кривые *2*, *3*, *5*, *6*) уменьшается, а из-за некоторых (кривые *4*, *7*) — растет вплоть до значения 4.

На рис. 2 приведена зависимость проигрыша χ в точности оценки от параметра $y = \Delta / \tau$ для некоторых наборов неинформативных параметров при различных значениях параметра $q = a / \nu$. Кривые *1*, *2*, *3* иллюстрируют проигрыш в точности оценки, когда неинформативным является параметр Δ, при значениях параметра $q = 0{,}1$; 1; 10 соответственно. Кривые *4*, *5*, *6* — когда неинформативными являются параметры a и τ, при значениях параметра $q = 0{,}1$; 1; 10. Кривые *7*, *8*, *9* — когда неинформативными являются a, τ и Δ, при значениях параметра $q = 0{,}1$; 1; 10.

Видно, что для наборов неинформативных параметров $\{a, \tau\}$ и $\{a, \tau, \Delta\}$ увеличение параметра q ведет к уменьшению величины проигрыша. Согласно рис. 1 и 2, наличие неинформативных параметров у импульса (10) может привести к увеличению дисперсий эффективных оценок параметров движения цели в 4 раза.

Таким образом, полученные результаты позволяют найти потери в точности оценок дальности, скорости и ускорения вследствие быстрых флуктуаций цели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Воробьев В. И.* Оптическая локация для радиоинженеров / В. И. Воробьев. — М. : Радио и связь, 1983. — 176 с.

2. *Долинин Н. А.* Статистические методы в оптической локации / Н. А. Долинин, А. Ф. Терпугов. — Томск : ТГУ, 1982. — 256 с.

3. *Трифонов А. П.* Оценка дальности, скорости и ускорения при зондировании последовательностью оптических импульсов / А. П. Трифонов, М. Б. Беспалова, М. В. Максимов // Радиотехника. — 2001. — № 4. — С. 99–104.

4. *Трифонов А. П.* Квазиправдоподобная оценка параметров движения при зондировании цели последовательностью оптических импульсов / А. П. Трифонов, М. Б. Беспалова, А. В. Курбатов // Радиоэлектроника. — 2013. — Т. 56, № 1. — С. 23–32. — (Известия вузов).

5. *Хелстром К.* Квантовая теория проверки гипотез и оценивания. — М. : Мир, 1979. — 344 с.

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

7. *Гантмахер Ф. Р.* Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер. — М. : Наука, 1988. — 576 с.

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

Поступила после переработки 10.12.2012

INFORMATION ABOUT ARTICLE

QUAZI-LIKELIHOOD ESTIMATION OF MOTION PARAMETERS OF RAPIDLY FLUCTUATING TARGET DURING THE PROBING WITH A SEQUENCE OF OPTICAL PULSES

Trifonov A. P., trif@phys.vsu.ru, Voronezh State University, Voronezh, Russia
Kurbatov A. V., avkurbatov@gmail.com, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Characteristics of efficient estimates of the range, velocity, and acceleration of a rapidly fluctuating target have been obtained during the probing with a sequence of optical pulses. The losses in estimation accuracy of the range, velocity, and acceleration caused by the presence of non-informative parameters have been also found

The study was carried out with support of RFFI (Project No. 13-08-00735) and FGP "Research and Academic-Teaching Staff of the Innovation Russia" (No. 14.V37.21.2032).

Keywords: range, velocity, acceleration, non-informative parameters, informative parameters, maximum likelihood estimate, consistency of estimates, correlation matrix of estimates

REFERENCES

1. VOROB'EV, V.I., *Optical Detection and Raging for Radio Engineers*. Moscow: Radio i Svyaz', 1983. 176 p. [in Russian].

2. DOLININ, N.A. AND TERPUGOV, A.F., *Statistical Methods in Optical Detection and Raging*. Tomsk: TGU, 1982. 256 p. [in Russian].

3. TRIFONOV, A.P.; BESPALOVA, M.B.; MAKSIMOV, M.V., Estimation of range, speed and acceleration during the probing with an optical pulse sequence. *Radiotekhnika,* n.4, p.99-104, 2001.

4. TRIFONOV, A.P.; BESPALOVA, M.B.; KURBATOV, A.V., Quazi-likelihood estimation of motion parameters during the target probing with a sequence of optical pulses. *Radioelectron. Commun. Syst.*, v.56, n.1, p.20-28, 2013. doi:10.3103/S0735272713010020.

5. HELSTROM, C., Quantum Detection and Estimation Theory. *Dep. of Applied Electrophysics, University of California*, 1975.

6. TRIFONOV, A.P. AND SHINAKOV, YU.S., *Simultaneous Discrimination of Signals and Estimation of their Parameters against the Background of Interferences*. Moscow: Radio i Svyaz', 1986. 264 p. [in Russian].

7. GANTMAKHER, F.R., *Theory of Matrices*. Moscow: Nauka, 1988. 576 p. [in Russian].

8. KULIKOV, E.I. AND TRIFONOV, A.P., *Estimation of Signal Parameters against the Background of Interferences*. Moscow: Sov. Radio, 1978. 296 p. [in Russian].

Received in final form December 10, 2012