

УДК 621.391.1

## ОДНОПОЗИЦИОННАЯ ПАССИВНАЯ ЛОКАЦИЯ ДВИЖУЩЕЙСЯ ЦЕЛИ С УЧЁТОМ ЭВОЛЮЦИИ ПЕРИОДА И УРОВНЯ ИМПУЛЬСНОГО РАДИОСИГНАЛА

© Ю. Г. Булычев

Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт «Градиент»»,  
344000, г. Ростов-на-Дону, просп. Соколова, 96  
E-mail: ProfBulychev@yandex.ru

Развит однопозиционный гибридный метод беспеленговой пассивной локации источника излучения импульсного периодического радиосигнала с учётом временных и энергетических измерений стационарного наблюдателя. Метод справедлив для любых направлений движения цели как для прямолинейных, так и криволинейных траекторий, не требует текущего оценивания частоты Доплера, а в качестве измеряемых параметров выступают временной набег и относительная мощность, обусловленные эволюцией периода и уровня сигнала в точке наблюдения. Рассмотрены вопросы, связанные с исследованием характера эволюции временного набега, построением алгоритмов определения дальности и других параметров движения, вычислительной корректностью и точностными характеристиками этих алгоритмов. Даны практические рекомендации и численный пример.

*Ключевые слова:* беспеленговый метод, однопозиционная пассивная локация, стационарный наблюдатель, временные измерения, энергетические измерения, источник излучения, импульсный радиосигнал, период сигнала, мощность сигнала.

DOI: 10.15372/AUT20230208

**Введение.** В [1] развит метод пассивной беспеленговой однопозиционной локации движущегося источника излучения (далее — цели) по результатам измерений временного набега, обусловленного эволюцией периода и доплеровской частоты импульсного радиосигнала в точке наблюдения. При этом для оценивания временного набега используется крупная сетка аппроксимации малого объёма (что позволяет реализовать идею синтеза базы и сформировать в конечном итоге несколько точек наблюдения на траектории движения цели с последующим применением одного из известных методов многопозиционной локации), а для оценивания непрерывного смещения доплеровской частоты — мелкая сетка большого объёма. Оценка этой частоты осуществляется косвенным способом — путём численного нахождения производной от измеренного временного набега на мелкой сетке. Известно, что даже незначительные ошибки измерений могут существенно влиять на результаты численного дифференцирования и точность решения задач, связанных с оценкой параметров движения цели, поскольку нахождение производных относится к классу некорректных задач. Кроме того, введение мелкой сетки большого объёма приводит не только к увеличению вычислительных затрат, но и серьёзным техническим сложностям.

Метод, изложенный в [1], имеет также существенное ограничение, а именно не допускается движение цели по линии визирования или в её окрестности. Кроме того, для описания цели применяется только модель прямолинейного равномерного движения, что также несколько сужает сферу применения данного метода, а также не исследован характер эволюции временного набега периода сигнала с учётом основных параметров наблюдения.

В предлагаемой работе развивается гибридный беспеленговый метод однопозиционной пассивной локации на базе стационарного наблюдателя, который устраняет отмеченные выше недостатки путём привлечения в обработку не только временных, но и энергетических измерений [2–4].

**Постановка задачи.** Пусть в прямоугольной декартовой системе координат  $XYZ$  (в центре которой находится пассивный стационарный наблюдатель) положение цели характеризуется вектором  $\mathbf{r}(t) = [x(t), y(t), z(t)]^\top$ , где  $t \in [0, T]$ . Для упрощения выкладок ограничимся первоначально случаем прямолинейного равномерного движения цели (далее будет дано обобщение на более сложные варианты движения), для которого изменение квадрата наклонной дальности  $R(t) = \|\mathbf{r}(t)\|$  описывается выражением

$$R^2(t) = R_0^2 + 2tR_0v_0 \cos \gamma_0 + t^2v_0^2, \quad R_0 = R(0), \quad (1)$$

где  $v_0 = \|\mathbf{v}_0\|$  — величина скорости, которая в общем случае может быть неизвестной;  $\gamma_0$  — угол между векторами  $\mathbf{r}_0 = \mathbf{r}(0)$  и  $\mathbf{v}_0$ ;  $R_0 = \|\mathbf{r}_0\|$  — начальная дальность;  $\|\cdot\|$  — норма.

Отрезок наблюдения  $[0, T]$  представим в виде  $[0, T] = \bigcup_{n=1}^N [t_{n-1}, t_n]$ ,  $t_n > t_{n-1}$ ,  $t_0 = 0$ ,  $t_N = T$ . В точке наблюдения для каждого узла  $t_n$  подсчитывается число периодов  $M_n$  принятого импульсного сигнала  $S(t)$  с постоянной огибающей и периодом  $T_S = \text{const} \forall t \in [0, T]$ , целиком укладывающихся в отрезок  $[0, t_n]$ . Текущее приращение дальности до цели описывается как  $\Delta R(t) = R(t) - R_0$ , а соответствующий ему временной набег  $\delta(t) = c^{-1}\Delta R(t) = c^{-1}[R(t) - R_0]$ , где  $c$  — скорость света.

Будем рассматривать два измеряемых параметра  $\delta_n = \delta(t_n)$  и  $p_n = p(t_n)$  (где  $\delta_n$  — временной набег и  $p_n$  — мощность принимаемого сигнала), которым соответствуют следующие векторные уравнения наблюдений:  $\mathbf{h}_\delta = \boldsymbol{\delta} + \boldsymbol{\xi}_\delta$ ,  $\mathbf{h}_p = \mathbf{p} + \boldsymbol{\xi}_p$ , где  $\mathbf{h}_\delta = [h_{\delta n}, n = \overline{1, N}]^\top$ ,  $\boldsymbol{\delta} = [\delta_n, n = \overline{1, N}]^\top$ ,  $\boldsymbol{\xi}_\delta = [\xi_{\delta n}, n = \overline{1, N}]^\top$ ,  $h_{\delta n} = h_\delta(t_n)$ ,  $\xi_{\delta n} = \xi_\delta(t_n)$ ,  $\mathbf{h}_p = [h_{pn}, n = \overline{1, N}]^\top$ ,  $\mathbf{p} = [p_n, n = \overline{1, N}]^\top$ ,  $\boldsymbol{\xi}_p = [\xi_{pn}, n = \overline{1, N}]^\top$ ,  $h_{pn} = h_p(t_n)$ ,  $\xi_{pn} = \xi_p(t_n)$ . Под  $\boldsymbol{\xi}_\delta$  и  $\boldsymbol{\xi}_p$  понимаются погрешности измерений, распределённые по нормальному закону с нулевыми математическими ожиданиями и соответствующими корреляционными матрицами  $\mathbf{K}_\delta$  и  $\mathbf{K}_p$ , сами погрешности  $\boldsymbol{\xi}_\delta$  и  $\boldsymbol{\xi}_p$  полагаются статистически независимыми. Параметр  $\delta_n$  связан с числом периодов  $T_S$  соотношением  $\delta_n = t_n - M_n T_S = c^{-1}[R_n - R_0]$ , где  $R_n = R(t_n)$ ,  $M_n = \sum_{q=1}^n \Delta M_q$ ,  $\Delta M_q$  — количество периодов, подсчитываемых на отрезке  $[t_{q-1}, t_q]$ ,  $t_0 = 0$ .

Если расстояние между целью и наблюдателем уменьшается, то  $\delta_n < 0$ , в противном случае  $\delta_n > 0$ . Появление временного набег  $\delta_n = \delta(t_n)$  обусловлено эффектом сжатия или растяжения исходного периодического импульсного сигнала в точке наблюдения за счёт движения цели.

Необходимо разработать гибридный метод однопозиционной пассивной локации цели как с прямолинейным, так и криволинейным движением, не требующий знания скорости цели, вычисления текущей частоты Доплера (на мелкой сетке большого объёма) и справедливый для любых значений угла  $\gamma_0$ . Метод должен включать в себя решение следующих вопросов: исследование эволюции периода сигнала в точке наблюдения с учётом параметров наблюдения; формирование алгоритмов определения наклонной дальности (временной, энергетико-временной и гибридный алгоритмы), а также ряда характерных параметров движения цели на точных данных (принимая  $\boldsymbol{\xi}_\delta = 0$  и  $\boldsymbol{\xi}_p = 0$ ) и случайных погрешностей измерений; учёт избыточных данных на основе метода наименьших квадратов (МНК); проведение вычислительного эксперимента с целью демонстрации возможностей метода.

**Исследование эволюции периода сигнала.** Набег  $\delta(t)$  описывается выражением  $\delta(t) = c^{-1}\{[R_0^2 + 2tR_0v_0 \cos \gamma_0 + t^2v_0^2]^{1/2} - R_0\}$ ,  $t \geq 0$ ,  $\delta(0) = 0$ . При  $0 < \gamma_0 \leq \pi/2$  функция  $\delta(t)$  является неотрицательной гладкой и строго выпуклой,  $\delta^{(1)}(t) = d\delta(t)/dt = 0$  в точке  $t = 0$ . При  $\pi/2 < \gamma_0 < \pi$  функция  $\delta(t)$  является гладкой и строго выпуклой, имеет два корня ( $t = 0$  и  $t = -2R_0 \cos \gamma_0 / v_0$ ), в точке  $t = -R_0 \cos \gamma_0 / v_0$  достигает минимального

значения  $(c^{-1}R_0(\sin \gamma_0 - 1))$ . При  $\gamma_0 = 0$  имеем  $\delta(t) = (v_0/c)t$ , т. е. набег является линейной неотрицательной функцией, не зависящей от  $R_0$ . При  $\gamma_0 = \pi$  имеем  $\delta(t) = -(v_0/c)t$  для  $0 \leq t \leq R_0/v_0$ , т. е.  $\delta(t)$  является линейной функцией и достигает своего минимума  $(-R_0/c)$  в точке  $t = R_0/v_0$ . Поскольку при  $\gamma_0 = 0$  и  $\gamma_0 = \pi$  набег  $\delta(t)$  не зависит от  $R_0$ , то для этих некорректных случаев, связанных с движением цели вдоль линии визирования, определение дальности с учётом эволюции периода сигнала в точке наблюдения невозможно.

Для более детального исследования  $\delta(t)$  найдём несколько первых производных по времени (в точке  $t = 0$ ):  $\delta_0^{(1)} = c^{-1}v_R$ ,  $\delta_0^{(2)} = (cR_0)^{-1}v_\tau^2$ ,  $\delta_0^{(3)} = -3(cR_0^2)^{-1}v_\tau^2v_R$ , где  $v_R = R_0 \cos \gamma_0$  и  $v_\tau = v_0 \sin \gamma_0$  — величины радиальной и тангенциальной скоростей соответственно. В итоге можно воспользоваться разложением на основе ряда Тейлора:

$$\delta(t) = c^{-1}t \left( v_R + \frac{v_\tau^2 t}{2R_0} - \frac{v_\tau^2 v_R t^2}{2R_0^2} + \dots \right) = c^{-1}t \left[ v_R + \frac{v_\tau^2 t}{2R_0} \left( 1 - \frac{v_R t}{R_0} \right) + \dots \right],$$

из которого следует, что спектральный состав  $\delta(t)$  существенно зависит от условий наблюдения, поэтому во многих практически важных случаях не удаётся пренебречь производными второго и более высоких порядков, особенно для больших интервалов наблюдения и малых дальностей.

**Временной алгоритм.** Несложно убедиться, что справедлива формула

$$R^2(t) = R_0^2 + 2cR_0\delta(t) + c^2\delta^2(t). \quad (2)$$

Приравнивая правые части выражений (1) и (2), после несложных преобразований получаем уравнение

$$-2c\delta(t)\chi_1 + 2t\chi_2 + t^2\chi_3 = c^2\delta^2(t), \quad (3)$$

где  $\chi_1 = R_0$ ,  $\chi_2 = \langle \mathbf{r}_0, \mathbf{v}_0 \rangle$ ,  $\chi_3 = v_0^2$  — неизвестные коэффициенты, имеющие понятный физический смысл и подлежащие идентификации.

Для фиксированных  $i, j, k \in \{1, 2, \dots, N\}$  (где  $i \neq j \neq k$ ) на базе (3) можно сформировать систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)

$$-2c\delta_{i(j,k)}\chi_1 + 2t_{i(j,k)}\chi_2 + t_{i(j,k)}^2\chi_3 = c^2\delta_{i(j,k)}^2, \quad (4)$$

из которой находим

$$R_0 = \frac{c}{2} \left[ \frac{\delta_i^2 \Delta_{jk}^t - \delta_j^2 \Delta_{ik}^t + \delta_k^2 \Delta_{ij}^t}{-\delta_i \Delta_{jk}^t + \delta_j \Delta_{ik}^t - \delta_k \Delta_{ij}^t} \right], \quad \langle \mathbf{r}_0, \mathbf{v}_0 \rangle = \frac{c^2}{2} \left[ \frac{t_i^2 \Delta_{jk}^\delta - t_j^2 \Delta_{ik}^\delta + t_k^2 \Delta_{ij}^\delta}{-\delta_i \Delta_{jk}^t + \delta_j \Delta_{ik}^t - \delta_k \Delta_{ij}^t} \right],$$

$$v_0^2 = \frac{t_k \Delta_{ij}^\delta - t_j \Delta_{ik}^\delta + t_i \Delta_{jk}^\delta}{\delta_i \Delta_{jk}^t - \delta_j \Delta_{ik}^t + \delta_k \Delta_{ij}^t}, \quad \cos \gamma_0 = \frac{\langle \mathbf{r}_0, \mathbf{v}_0 \rangle}{R_0 v_0},$$

где  $\Delta_{ij}^t = t_i t_j (t_i - t_j)$ ,  $\Delta_{ij}^\delta = \delta_i \delta_j (\delta_i - \delta_j)$ .

Следовательно, появляется возможность определения следующих параметров движения:  $R_0$ ,  $v_0$  и  $\gamma_0$ , где  $R_0 = \chi_1$ ,  $v_0 = \sqrt{\chi_3}$ ,  $\cos \gamma_0 = \chi_2 (R_0 v_0)^{-1}$ . По аналогии с [1] несложно показать, что временной алгоритм неработоспособен, когда цель движется вдоль линии визирования или в её окрестности.

Для учёта влияния случайных погрешностей измерений  $\xi$  на точностные характеристики развиваемого метода с учётом СЛАУ (4) воспользуемся традиционной процедурой расчёта элементов корреляционной матрицы  $\mathbf{K}_\chi$  ошибок оценивания координат

вектора  $\boldsymbol{\chi} = [\chi_1, \chi_2, \chi_3]^\top$  (где  $\chi_1 = \chi_1(\delta_i, \delta_j, \delta_k)$ ,  $\chi_2 = \chi_2(\delta_i, \delta_j, \delta_k)$ ,  $\chi_3 = \chi_3(\delta_i, \delta_j, \delta_k)$ ) в линейном приближении [5]. Для этого воспользуемся представлением  $\boldsymbol{\chi} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}$  (где  $\mathbf{b} = [c^2\delta_i^2, c^2\delta_j^2, c^2\delta_k^2]^\top$ ) и частными производными вида  $\partial\chi_k/\partial\delta_d$ ,  $k \in \{1, 2, 3\}$ ,  $d \in \{i, j, k\}$ . С учётом этого искомая матрица находится как  $\mathbf{K}_\chi = \mathbf{F}_\chi \mathbf{K}_\delta \mathbf{F}_\chi^\top$ , где  $\mathbf{F}_\chi$  — матрица частных производных  $\partial\chi_k/\partial\delta_d$ . Принимая во внимание (2)–(4), для дисперсии ошибки определения текущей дальности имеем формулу

$$\sigma_{R_k}^2 = \left(\frac{\chi_1}{R_k}\right)^2 \sigma_{\chi_1}^2 + \left(\frac{t_k}{R_k}\right)^2 \sigma_{\chi_2}^2 + \left(\frac{t_k^2}{2R_k}\right)^2 \sigma_{\chi_3}^2 + 2 \sum_{l < d} \frac{\partial R_k}{\partial \chi_l} \frac{\partial R_k}{\partial \chi_d} r_{ld}, \quad (5)$$

где  $R_k = [\chi_1^2 + 2t_k\chi_2 + t_k^2\chi_3]^{1/2}$ ,  $r_{ld}$  — коэффициент корреляции величин  $\chi_l$  и  $\chi_d$  ( $l, d \in \{1, 2, 3\}$ ), который определяется с учётом матрицы  $\mathbf{K}_\chi$ .

Рассмотрим временной алгоритм с учётом избыточных измерений, когда  $\boldsymbol{\delta} = [\delta_n, n = \overline{1, N}]^\top$ ,  $\mathbf{b} = [b_n, n = \overline{1, N}]^\top = [c^2\delta_n^2, n = \overline{1, N}]^\top$  и  $N \gg 3$ . В этом случае имеем СЛАУ  $\mathbf{A}\boldsymbol{\chi} = \mathbf{b}$  с прямоугольной матрицей  $\mathbf{A}$ , при этом целесообразно рассматривать  $\mathbf{b}$  в качестве вектора вторичных измеряемых параметров, а его корреляционную матрицу находить как  $\mathbf{K}_b = \mathbf{F}_b \mathbf{K}_\delta \mathbf{F}_b^\top$ , где  $\mathbf{F}_b = 2c^2 \text{diag} [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N]$  — диагональная матрица. При условии достаточно малых ошибок измерений для построения сглаженной оценки  $\boldsymbol{\chi}^*$  вектора  $\boldsymbol{\chi}$  можно воспользоваться МНК [6]:

$$\boldsymbol{\chi}^* = (\mathbf{A}^\top \mathbf{K}_b^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^\top \mathbf{K}_b^{-1} \mathbf{h}_b,$$

где  $\mathbf{h}_b = [h_{bn}, n = \overline{1, N}]^\top$  — вектор вторичных измерений величин  $b_n = c^2\delta_n^2$ . Корреляционную матрицу ошибок оценивания находим как  $\mathbf{K}_\chi = (\mathbf{A}^\top \mathbf{K}_b^{-1} \mathbf{A})^{-1}$ .

Следует отметить, что временной алгоритм не является строго оптимальным, поскольку элементы матрицы  $\mathbf{A}$  зависят от результатов наблюдений. Но при определённых ограничениях на погрешности измерений он даёт вполне приемлемый результат. Для более точного сглаживания можно использовать известные процедуры нелинейного оптимального оценивания, которые приводят на практике к трудоёмким рекуррентным алгоритмам, предполагающим задание достаточно точного начального условия (для обеспечения необходимой скорости сходимости и точности).

**Энергетико-временной алгоритм.** Пусть  $\gamma_0 = 0$  или  $\gamma_0 = \pi$  (случай движения цели вдоль линии визирования либо в её окрестности), т. е. имеем вычислительную некорректность временного алгоритма. Рассмотрим задачу определения дальности путём совместного использования временных ( $\boldsymbol{\delta}$ ) и энергетических ( $\mathbf{p}$ ) данных.

*Вариант 1.* Воспользуемся известным уравнением дальнометрии для стационарного радиоканала  $p(t) = \mu R^{-2}(t)$ , где  $\mu \equiv \text{const} \forall t \in [0, T]$ , а также энергетическим методом пассивной локации [2–4], полагая, что скорость цели можно оценить временным алгоритмом (даже в некорректном случае). Согласно [2–4] дальность  $R_k$  находится по трём замерам мощности  $p_i = p(t_i)$ ,  $p_j = p(t_j)$ ,  $p_k = p(t_k)$ :

$$R_k = [2s_{ij}^2(1 + q_{ik} - 2q_{jk})^{-1}]^{1/2}, \quad (6)$$

где  $s_{ij} = v_0(t_j - t_i)$  — путь, пройденный целью, за время  $t_j - t_i$ ;  $q_{ik} = p_k/p_i$  и  $q_{jk} = p_k/p_j$  — относительные мощности принятого сигнала.

При  $\gamma_0 = 0$  или  $\gamma_0 = \pi$  имеем  $v_0 = v_R = c|\delta_i^{(1)}| = c|\delta_j^{(1)}| = c|\delta_k^{(1)}|$ , где  $\delta^{(1)} = d\delta(t)/dt$  для  $t = t_i$ . Следовательно, пройденный путь можно найти как  $s_{ij} = c|\delta_i^{(1)}|(t_j - t_i)$ . Так как при  $\gamma_0 = 0$  или  $\gamma_0 = \pi$  для временного набега справедливы равенства  $\delta(t) = (v_0/c)t =$

$= (v_R/c)t$ , то  $|\delta_i^{(1)}| = |\delta_j - \delta_i|/(t_j - t_i) = |\delta_j^{(1)}| = |\delta_k^{(1)}|$ . Теперь для пройденного пути можно воспользоваться формулой  $s_{ij} = c|\delta_j - \delta_i|$ . Таким образом, с учётом (6) получаем новую формулу для определения дальности согласно энергетико-временному алгоритму:

$$R_k = [2c^2|\delta_j - \delta_i|^2(1 + q_{ik} - 2q_{jk})^{-1}]^{1/2}. \quad (7)$$

По аналогии с [2–4] для дисперсии ошибки вычисления дальности с учётом погрешностей измерений и выражения (7) можно сформировать оценку сверху для стационарного радиоканала:

$$\sigma_{R_k}^2 \leq R_k^2 \left[ \frac{p_k^2(p_j^2 + 4p_i^2 - 2p_i p_j)}{2(p_i p_j + p_j p_k - 2p_i p_k)^2} \varepsilon_p^2 + \varepsilon_{v_0}^2 + \varepsilon_s^2 \right], \quad (8)$$

где  $\varepsilon_p^2$  — максимальная относительная погрешность измерения мощности;  $\varepsilon_{v_0}^2$  и  $\varepsilon_s^2$  — максимальные относительные погрешности вычисления скорости и пройденного пути на базе временных измерений соответственно.

Из (8) следует, что точностные характеристики энергетико-временного алгоритма существенно зависят от дальности до цели. Чем больше дальность, тем выше требования к мощностным измерениям, оценкам скорости и пройденного пути.

*Вариант 2.* Воспользуемся известным уравнением дальнометрии для нестационарного радиоканала  $p(t) = \mu(t)R^{-2}(t)$ , где  $\mu(t) = \boldsymbol{\vartheta}^\top \boldsymbol{\gamma}(t)$ ;  $t \in [0, T]$ ;  $\boldsymbol{\vartheta} = [\vartheta_m, m = \overline{0, M}]^\top$  — вектор неизвестных коэффициентов;  $\boldsymbol{\gamma}(t) = [\gamma_m(t), m = \overline{0, M}]^\top$  — вектор известных базисных функций. Искомая дальность находится как

$$R_k = \sqrt{\mu_k p_k^{-1}}, \quad (9)$$

где  $\mu_k = \boldsymbol{\vartheta}^\top \boldsymbol{\gamma}_k$ ;  $\mu_k = \mu(t_k)$ ;  $\boldsymbol{\gamma}_k = \boldsymbol{\gamma}(t_k)$ , а вектор  $\boldsymbol{\vartheta}$  находится из СЛАУ  $\mathbf{B}\boldsymbol{\vartheta} = \boldsymbol{\psi}$ , в которой элементы матрицы  $\mathbf{B}$  и вектора-столбца  $\boldsymbol{\psi}$  формируются следующим образом:

$$b_{ir} = t_{i+2}^{r-1} p_i p_{i+1} + t_i^{r-1} p_{i+1} p_{i+2} - 2t_{i+1}^{r-1} p_i p_{i+2}, \quad \psi_i = 2s_{i,i+1}^2 p_i p_{i+1} p_{i+2}, \\ i = \overline{1, k-2}, \quad r = \overline{1, M+1},$$

$s_{i,i+1} = v_0(t_{i+1} - t_i)$  — путь, пройденный целью, за время  $t_{i+1} - t_i$ .

Следовательно, совместное использование временных и энергетических измерений позволяет устранить некорректность рассмотренного выше временного алгоритма (как для стационарного, так и нестационарного радиоканала) и выровнять рабочую зону гибридного беспеленгового метода. По аналогии с (8), используя принцип линеаризации функции случайных аргументов, несложно найти оценку сверху для дисперсии ошибки вычисления дальности с учётом погрешностей измерений и выражения (9) для нестационарного радиоканала (не приводится в силу громоздкости формулы).

**Некоторые обобщения и практические рекомендации.** Временной алгоритм несложно обобщить на случай прямолинейного равноускоренного движения цели, когда выполняется условие коллинеарности векторов начальной скорости  $\mathbf{v}_0 = [v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}]^\top$  и ускорения  $\mathbf{a} = [a_x, a_y, a_z]^\top = \eta \mathbf{v}_0$ , где  $\eta$  — соответствующий коэффициент пропорциональности. Теперь вместо (4) мы получим СЛАУ пятого порядка и соответствующие формулы для параметров движения цели (не приводим в силу их громоздкости). Если векторы  $\mathbf{v}_0$  и  $\mathbf{a}$  коллинеарны, то  $\chi_4 = v_0 a$  — коэффициент при базисной функции  $t^3$  и  $\chi_5 = a^2$  — коэффициент при базисной функции  $t^4$ , где  $a = \|\mathbf{a}\|$ . По найденным значениям  $\chi_1, \dots, \chi_5$  вычисляем следующие параметры движения цели:  $R_0 = \chi_1$ ,  $a = \sqrt{\chi_5}$ ,  $v_0 = \chi_4 a^{-1}$ ,  $\cos \gamma_0 = \chi_2 (R_0 v_0)^{-1}$ .

Если координаты цели описываются полиномами второй степени и снимается условие прямолинейного движения, то в соответствующей СЛАУ (размерность не меняется) имеем  $\chi_1 = R_0$ ,  $\chi_2 = \langle \mathbf{r}_0, \mathbf{v}_0 \rangle$ ,  $\chi_3 = (v_0^2 + \langle \mathbf{r}_0, \mathbf{a} \rangle)$ ,  $\chi_4 = \langle \mathbf{v}_0, \mathbf{a} \rangle$ ,  $\chi_5 = a^2$ , т. е. временной алгоритм легко распространяется и на случай криволинейного движения. С ростом степени используемых полиномов (выше второй) увеличивается размерность СЛАУ.

Очевидно, что временной алгоритм наиболее эффективен в случае, когда речь идёт о больших пройденных расстояниях (т. е. «синтезируется база», обеспечивающая необходимую точность оценивания), а это задаёт определённые ограничения на тип цели (в частности, его скорость, возможности манёвра и т. д.), обоснованность используемых полиномов на заданном интервале наблюдения и тактико-технические характеристики наблюдателя.

Энергетический алгоритм, оперирующий относительным уровнем принимаемого импульсного сигнала, наилучшим образом реализует свои потенциальные возможности при движении цели по линии визирования или в её окрестности [2–4].

**Гибридный алгоритм.** В некотором смысле временной и энергетико-временной алгоритмы ортогональны в плане точности. Следовательно, комбинируя эти алгоритмы, можно обеспечить равномерную рабочую зону гибриднему алгоритму и достичь приемлемых точностных характеристик для различных условий наблюдения. Переход с одного алгоритма на другой основан на сравнении вычисленных дисперсий ошибок определения дальности (например, используя формулы (5) и (8)). Предпочтительным в каждом конкретном случае является тот алгоритм, для которого дисперсия минимальна.

Для корректных случаев возможна совместная обработка результатов каждого алгоритма.

### Результаты вычислительного эксперимента.

*Корректный случай.* Предположим, что цель осуществляет плоскостное равноускоренное движение, для которого  $\gamma_0 = 135^\circ$ ,  $R_0 = 7,5 \times 10^3$ ,  $v_0 = 566$ ,  $a = 9,9$  (угол между векторами начальной скорости  $\mathbf{v}_0$  и  $\mathbf{a}$  равен нулю). Здесь и далее время и погрешности измерений временных интервалов задаются в секундах (с), координаты и дальность — в метрах (м), скорость — в м/с, ускорение — в м/с<sup>2</sup>, частота — в герцах (Гц). Цель формирует импульсный сигнал  $S(t)$ , у которого  $T = 16$ ,  $T_S = 10^{-4}$ ,  $\tau = 10^{-5}$  (длительность импульса),  $f_0 = 10^{10}$  (частота несущей). Параметры работы наблюдателя:  $\Delta M_q = \Delta M = 10^4$ ,  $\mathbf{K}_\delta$  — диагональная матрица, при этом  $\sigma_\delta \in \{10^{-10}, 10^{-9}\}$ . Погрешности измерений моделировались с использованием датчика случайных чисел. Сглаживание измерений осуществлялось аппроксимацией полиномом 14-й степени (высокая степень обусловлена широким спектральным составом функции  $\delta(t)$ ).

Величина синтезируемой базы составила  $9,7475 \cdot 10^3$ . Принятым исходным данным соответствуют следующие коэффициенты:  $\chi_1 = 7,5 \cdot 10^3$ ,  $\chi_2 = -2,96 \cdot 10^6$ ,  $\chi_3 = 2,68 \cdot 10^5$ ,  $\chi_4 = 5,6 \cdot 10^3$ ,  $\chi_5 = 9,9$ . Был реализован временной алгоритм на основе МНК по выборке фиксированного объёма, при этом оценки значений коэффициентов и текущей дальности усреднялись на основе тысячи экспериментов. Результаты по абсолютным (абс) и относительным (отн) погрешностям найденных коэффициентов сведены в таблицу.

Т а б л и ц а

$\sigma_\delta$	Значения погрешностей оценивания коэффициентов									
	$\chi_1$		$\chi_2$		$\chi_3$		$\chi_4$		$\chi_5$	
	абс	отн	абс	отн	абс	отн	абс	отн	абс	отн
$10^{-10}$	0,29	0,004	99,42	0,003	9,26	0,003	2,38	0,04	0,013	0,13
$10^{-9}$	1,3	0,02	582,81	0,07	57,86	0,02	0,12	0,002	0,01	0,1

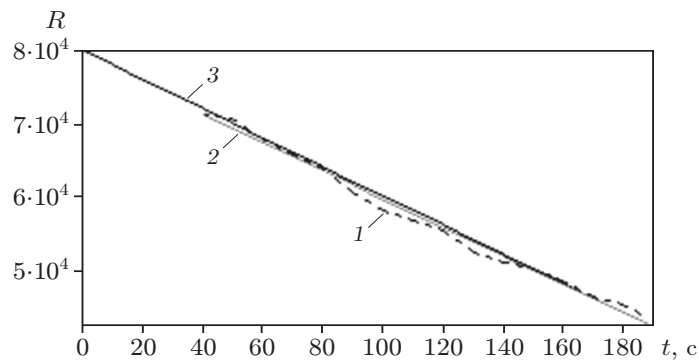


Рис. 1

Как видно из таблицы, в большинстве рассмотренных случаев относительные погрешности не превышают 5 %, при этом наибольшая погрешность оценивания соответствует коэффициентам  $\chi_4$  и  $\chi_5$ . Относительная погрешность оценивания дальности на базе временного алгоритма не превысила 0,12 %.

Результаты численного эксперимента показывают, что чем больше расстояние между узлами используемой временной сетки, тем меньше влияние случайных погрешностей измерений на результирующую точность оценивания. Это расстояние должно быть согласовано с динамикой цели, а именно: чем меньше скорость движения цели, тем больше должны быть шаг этой сетки и длительность интервала наблюдения.

*Некорректный случай.* Пусть цель движется прямолинейно и равномерно в сторону наблюдателя, при этом  $\gamma = 175^\circ$ ,  $R_0 = 8 \cdot 10^4$ ,  $v_0 = 2 \cdot 10^2$ ,  $M = 2$  (нестационарный радиоканал),  $\gamma_m(t) = t^m$ ,  $T = 2 \cdot 10^2$ ,  $F = 10$  (частота съема измерений),  $N = 20$  (число измерений),  $\varepsilon_p = 5$  — максимальная относительная ошибка измерения мощности (в процентах). Погрешности измерений моделировались с использованием датчика случайных чисел. Мощностные измерения сглаживались полиномом второй степени. Оценивание дальности осуществлялось на различных тройках  $(t_i, t_j, t_k)$  в текущем времени по выборке нарастающего объема с их соответствующей весовой обработкой, а также последующим сглаживанием всех результатов на основе МНК.

Результаты моделирования приведены на рис. 1 и 2. На рис. 1 кривая 1 соответствует оценке дальности в текущем времени, кривая 2 — сглаженной дальности на основе МНК, кривая 3 — реальной дальности. На рис. 2 показаны соответствующие графики относительной погрешности  $\varepsilon_R(t)$  для текущей (кривая 1) и сглаженной (кривая 2) дальностей (в процентах).

Рисунки показывают, что в некорректных случаях совместное использование энергетико-временных измерений позволяет достичь приемлемой точности оценивания дальности для нестационарного радиоканала. Если не учитывать нестационарность, то

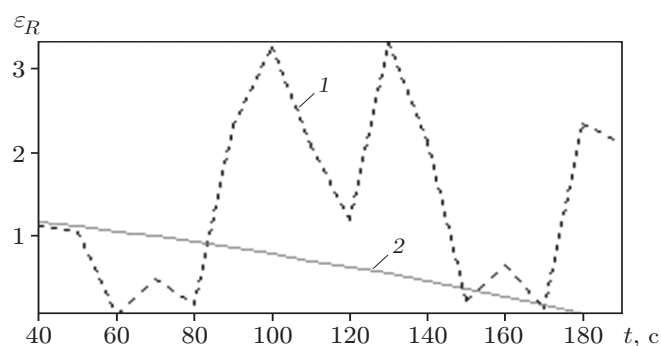


Рис. 2

относительная погрешность оценивания дальности составляет в среднем до 40 %, т. е. резко снижается точность дальнометрии.

**Заключение.** Таким образом, разработан гибридный метод однопозиционной беспеленговой локации применительно к стационарному наблюдателю, позволяющему оценивать параметры движения цели по результатам временных и энергетико-временных измерений. Метод не требует текущего оценивания частоты Доплера, применим к целям с криволинейным движением и произвольными направлениями движения, а также даёт возможность адаптироваться к различным условиям наблюдения. Исследованы основные ограничения метода и условия его наиболее эффективного применения. Также получены аналитические соотношения, позволяющие оценивать точностные характеристики метода.

Метод может быть реализован как самостоятельно, так и в составе других известных подходов пассивной однопозиционной и многопозиционной локаций. Поскольку развитый метод даёт возможность определять дальность, а также ряд других параметров движения цели, то он может быть использован в дальномерных системах многопозиционной локации при решении известной задачи трилатерации [7, 8], а также для фильтрации параметров состояния различных динамических объектов [9, 10].

**Благодарность.** Автор выражает благодарность к. т. н. А. А. Мозолю (АО ВНИИ «Градиент»), принявшему активное участие в проведении численного эксперимента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булычев Ю. Г., Мозоль А. А. Однопозиционная пассивная локация и навигация с учётом эволюции периода радиосигнала в точке приёма // Радиотехника и электроника. 2021. **66**, № 5. С. 468–475.
2. Булычев Ю. Г., Булычев В. Ю., Ивакина С. С., Насенков И. Г. Амплитудно-угломерный метод нестационарной пассивной локации с учётом частично известных параметров движения цели // Автометрия. 2015. **51**, № 3. С. 70–79.
3. Булычев Ю. Г., Насенков И. Г., Ячменёв А. В. Амплитудно-гиперболический метод пассивной локации источника излучения // Автометрия. 2018. **54**, № 4. С. 43–50. DOI: 10.15372/AUT20180406.
4. Булычев Ю. Г., Ивакина С. С., Насенков И. Г. Метод пассивно-энергетической локации и навигации в стационарной и нестационарной постановках // Радиотехника. 2015. № 6. С. 107–115.
5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Высшая школа, 1999. 576 с.
6. Жданюк Б. Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. М.: Сов. радио, 1978. 384 с.
7. Кондратьев В. С., Котов А. Ф., Марков Л. Н. Многопозиционные радиотехнические системы. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
8. Черняк В. С. Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993. 416 с.
9. Булычев Ю. Г., Кондрашов А. Г., Раду П. Ю., Ячменёв А. В. Численно-аналитический метод описания и оценивания входных и выходных параметров многомерного динамического объекта. Ч. I // Автометрия. 2020. **56**, № 3. С. 68–81. DOI: 10.15372/AUT20200308.
10. Булычев Ю. Г., Кондрашов А. Г., Раду П. Ю., Ячменёв А. В. Численно-аналитический метод описания и оценивания входных и выходных параметров многомерного динамического объекта. Ч. II // Автометрия. 2020. **56**, № 6. С. 107–120. DOI: 10.15372/AUT20200612.

*Поступила в редакцию 25.10.2022*

*После доработки 09.11.2022*

*Принята к публикации 09.11.2022*