

УДК 621.391.1

АМПЛИТУДНО-УГЛОМЕРНЫЙ МЕТОД НЕСТАЦИОНАРНОЙ ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ С УЧЁТОМ ЧАСТИЧНО ИЗВЕСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ЦЕЛИ

Ю. Г. Булычев¹, В. Ю. Булычев¹, С. С. Ивакина¹, И. Г. Насенков²

¹ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт «Градиент»»,
344000, г. Ростов-на-Дону, просп. Соколова, 96

²Концерн «Радиоэлектронные технологии»,
109240, Москва, ул. Гончарная, 20/1, стр. 1
E-mail: ProfBulychev@yandex.ru

Представлено развитие одного из направлений пассивной локации, связанного с использованием амплитудных (мощностных) измерений в однопозиционных пеленгаторах. Применительно к такому неподвижному пеленгатору развивается угломерно-энергетический метод пассивной локации, позволяющий определять наклонную дальность до излучающей цели с частично известными параметрами движения. Решение дано для пространственного случая с учётом нестационарности обобщённого коэффициента радиолокации. Построен комплексный алгоритм совместного оценивания данного коэффициента и дальности для модели прямолинейного равномерного движения цели. Приведены результаты вычислительного эксперимента, подтверждающие возможность практического применения разработанного метода.

Ключевые слова: излучающая цель, пеленгатор, угловые измерения, энергетические измерения, пассивная локация.

Введение. В работах [1–8] показано, что вопросы, связанные с решением задачи определения дальности излучающей цели (ИЦ) с частично известными параметрами движения (ЧИПД) на базе одного стационарного или подвижного пеленгатора, не потеряли актуальности и в настоящее время, а также дан подробный обзор и анализ существующих методов решения указанной задачи с привлечением в качестве ЧИПД сведений о скорости, курсе, начальной или конечной точке траектории движения и т. д. Идея, заложенная в этих методах и основанная на совместном использовании угловых измерений и ЧИПД, уже во многом себя исчерпала. Более оригинальной является идея совместного учёта угловых и (или) энергетических (амплитудных и мощностных) измерений стационарного или подвижного пеленгатора, которая остаётся актуальной и в настоящее время. Для её решения были развиты методы [9–12], инвариантные к различным видам излучаемого сигнала с постоянной огибающей (это относится к сигналам с различными видами частотной и фазовой модуляции, например с линейно-частотной модуляцией и фазовой манипуляцией). Изменение огибающей (амплитуды) сигнала на приёмной стороне обусловлено лишь длиной трассы, условиями распространения сигнала, особенностями построения пеленгатора и принятым способом сканирования.

К недостаткам указанных методов можно отнести следующие: отсутствие пространственного варианта пассивной локации с учётом высоты ИЦ; необходимость большого объёма априорной информации для определения дальности до ИЦ на базе подвижного пеленгатора с учётом эффекта интерференции прямого и зеркально отражённого сигналов; слабую устойчивость к различного рода возмущающим факторам и сложную зависимость

интерференционной кривой от условий наблюдения; существенные технические сложности и значительные временные затраты при необходимости маневрирования пеленгатора для улучшения условий наблюдаемости ИЦ; предположение о постоянстве обобщённого коэффициента радиолокации (ОКР — коэффициент, который связывает дальность до ИЦ и мощность (амплитуду) принимаемого сигнала и характеризует условия излучения и энергетические потери на трассе ИЦ—пеленгатор) применительно к стационарному пеленгатору выполняется далеко не всегда и, как правило, только на достаточно малых временных интервалах; не отражён вопрос повышения качества совместного оценивания ОКР и дальности до ИЦ с учётом избыточности измерений.

В предлагаемой работе применительно к стационарному пеленгатору, снабжённому каналом амплитудных измерений, развивается угломерно-энергетический метод (УЭМ) для решения задачи совместного оценивания ОКР и дальности ИЦ, в котором учтены недостатки отмеченных выше известных методов [9–12].

Постановка задачи. Пусть в центре декартовой системы координат XYZ расположен пеленгатор, который производит угловые и амплитудные измерения. Излучающая цель летит прямолинейно равномерно в пространстве (рис. 1, a, b), при этом скорость ($\nu = \|\mathbf{v}\|$) полагается известной с относительной погрешностью $\delta\nu$ (в процентах). Под ИЦ $_i$ и ИЦ $_j$ (где $i, j \in \overline{0, N-1}$, $j > i$) понимаем положения ИЦ в моменты времени t_i и t_j соответственно ($t_i, t_j \in [0, T]$). В эти моменты времени имеем измерения пеленгатора (α_i, β_i, E_i) и (α_j, β_j, E_j) , где α_i, α_j — азимуты, β_i, β_j — углы места, E_i, E_j — амплитуды принимаемого сигнала. Кроме того, на рис. 1, b введены следующие обозначения: $X'Y'Z'$ — вспомогательная система координат, в плоскости $X'OY'$ которой лежит траектория ИЦ; ось OX' с единичным направляющим вектором \mathbf{l} лежит в плоскости XOY и находится на линии пересечения плоскостей XYZ и $X'Y'Z'$, при этом составляет с осью OX острый угол; ось OZ' дополняет вспомогательную систему координат до правой системы координат; \mathbf{r}_i и \mathbf{r}_j — радиусы-векторы ИЦ для моментов времени t_i и t_j соответственно ($R_i = \|\mathbf{r}_i\|$ и $R_j = \|\mathbf{r}_j\|$ — наклонные дальности; $\mathbf{e}_i = R_i^{-1}\mathbf{r}_i$, $\mathbf{e}_j = R_j^{-1}\mathbf{r}_j$ — единичные направляющие векторы линий визирования); γ — угол между вектором скорости \mathbf{v} и направляющим вектором \mathbf{l} . Если ИЦ летит параллельно плоскости XOY , то векторы \mathbf{l} и \mathbf{v} коллинеарны, следовательно, $\gamma = 0^\circ$ или $\gamma = 180^\circ$. Развиваемый далее метод справедлив и в этом случае.

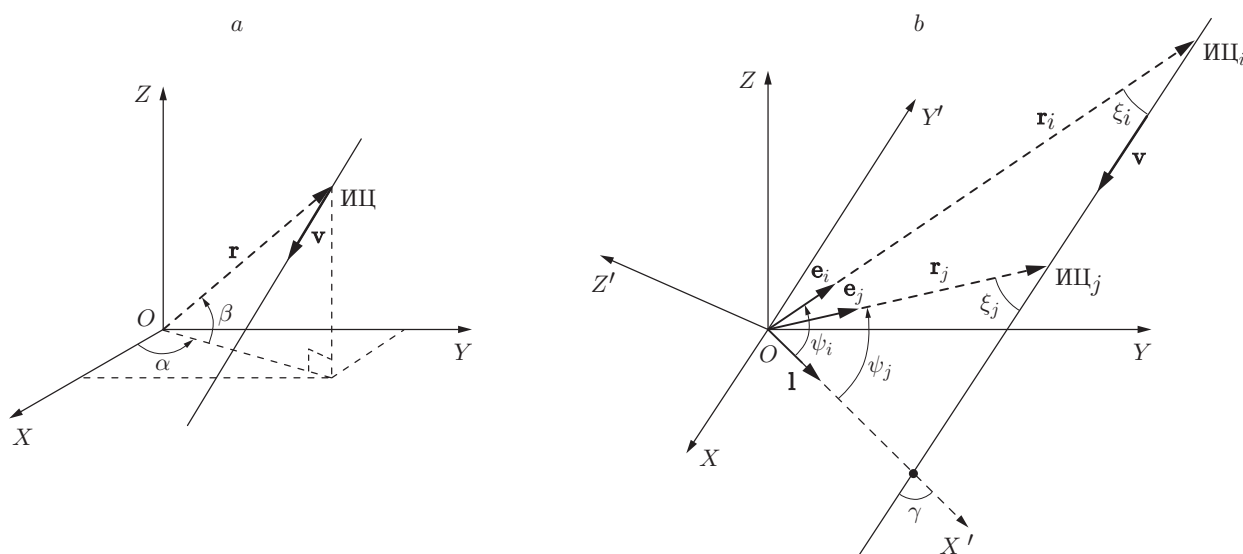


Рис. 1. Геометрия задачи: движение ИЦ в исходной (a) и в повернутой (b) системах координат

Принятая модель прямолинейного равномерного движения является весьма распространённой на практике, особенно для целей, осуществляющих движение вдоль заданных линий барражирования. Это относится к самолётам, беспилотным летательным аппаратам, надводным и подводным целям и др. Для таких целей зачастую имеется банк данных, характеризующих возможные параметры их движения и излучения. Так, в задачах радиотехнической разведки после установления типа ИЦ (на основе анализа принимаемых сигналов) из указанного банка данных выбирают возможную скорость ИЦ с ЧИПД [5]. Режим прямолинейного равномерного движения ИЦ с известной скоростью зачастую используется на практике для реализации известного метода синтезирования апертуры.

Плоскость $X'OY'$ описывается уравнением

$$(\mathbf{r} \times \mathbf{e}_i) \cdot \mathbf{e}_j = 0.$$

Здесь $\mathbf{r} = [x, y, z]^T$ — радиус-вектор произвольной точки плоскости; $\mathbf{e}_i = [\cos \alpha_i \cdot \cos \beta_i, \sin \alpha_i \cdot \cos \beta_i, \sin \beta_i]^T$; $\mathbf{e}_j = [\cos \alpha_j \cdot \cos \beta_j, \sin \alpha_j \cdot \cos \beta_j, \sin \beta_j]^T$. Вектор нормали $\mathbf{N} = [N_x, N_y, N_z]^T$ имеет координаты: $N_x = \sin \alpha_i \cdot \cos \beta_i \cdot \sin \beta_j - \sin \alpha_j \cdot \cos \beta_j \cdot \sin \beta_i$, $N_y = \cos \alpha_j \cdot \cos \beta_j \cdot \sin \beta_i - \cos \alpha_i \cdot \cos \beta_i \cdot \sin \beta_j$, $N_z = \cos \beta_i \cdot \cos \beta_j \cdot \sin(\alpha_j - \alpha_i)$. Плоскость $X'OY'$ пересекает плоскость XOY по прямой $xN_x + yN_y = 0$, координаты направляющего вектора $\mathbf{l} = (l_x, l_y, 0)$ которой находятся из условий: $l_x N_x + l_y N_y = 0$, $l_x^2 + l_y^2 = 1$. Отсюда имеем

$$l_x = \pm N_y (N_x^2 + N_y^2)^{-1/2}, \quad l_y = \mp N_x (N_x^2 + N_y^2)^{-1/2}.$$

Азимуты ИЦ в плоскости траектории полёта определяются через косинусы углов между соответствующими векторами:

$$\begin{cases} \cos \psi_{i(j)} = \cos(\mathbf{e}_{i(j)}^{\wedge}, \mathbf{l}) = l_x \cos \alpha_{i(j)} \cdot \cos \beta_{i(j)} + l_y \sin \alpha_{i(j)} \cdot \cos \beta_{i(j)}, \\ \sin \psi_{i(j)} = \sqrt{1 - \cos^2 \psi_{i(j)}}, \\ \cos \Delta \psi_{ij} = \cos(\mathbf{e}_i^{\wedge}, \mathbf{e}_j) = \cos \beta_i \cdot \cos \beta_j \cdot \cos(\alpha_j - \alpha_i) + \sin \beta_i \cdot \sin \beta_j, \end{cases}$$

где под символом « \wedge » понимается угол между двумя векторами.

Полагаем, что измерения величин (α_i, β_i, E_i) и (α_j, β_j, E_j) осуществляются с ошибками, характеризующимися нулевыми математическими ожиданиями и соответствующей корреляционной матрицей.

Дальность до ИЦ описывается выражением $r(t) = \mu(t)E^{-1}(t)$, где $\mu(t)$ — обобщённый коэффициент радиолокации. В работах [9–12] существенным ограничением являлось предположение о том, что $\mu(t) \equiv \text{const}$ для всех $t \in [0, T]$ (стационарная постановка задачи). Очевидно, что в нестационарном случае имеем $\mu(t) \neq \text{const}$, следовательно, этот факт необходимо учитывать при оценивании дальности ИЦ.

Требуется применительно к нестационарной пассивной локации обосновать приемлемую модель изменения ОКР и разработать метод совместного оценивания ОКР и дальности ИЦ по результатам угловых и амплитудных измерений с учётом принятой модели с ЧИПД и ограничений на ошибки наблюдения. Задачу совместного оценивания можно было бы решать на базе известных статистических методов: максимума апостериорной плотности вероятности, максимума правдоподобия, нелинейного метода наименьших квадратов и др. Однако все целевые задачи, связанные с пассивной локацией, оказываются плохо реализуемыми в рамках таких методов. Это связано с тем, что существенная нелинейность,

заложенная в этих задачах, приводит к итерационным слабо сходящимся, а зачастую и расходящимся вычислительным процедурам, для которых возникает проблема выбора достаточно хорошего начального приближения. На практике, как правило, такое приближение априорно неизвестно, что и затрудняет применение классических методов оценивания, и, кроме того, реализация итерационных процедур нередко невозможна в реальном времени, что является достаточно жёстким ограничением.

Выход из создавшегося положения состоит в применении квазиоптимальных неитерационных методов оценивания, при этом целесообразно использовать только те методы, которые не требуют проведения операций линеаризации нелинейных функций, описывающих сформулированную задачу пассивной локации. В данной работе развивается именно такой метод совместного квазиоптимального оценивания ОКР и дальности ИЦ, не требующий введения операций линеаризации, не приводящий к рекуррентным процедурам и выбору начального приближения и допускающий несложную практическую реализацию с приемлемыми точностными характеристиками. Смысл квазиоптимальности состоит в необходимости минимизации некоторых невязок, соответствующих псевдоматрицам и квазирешениям формируемых систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

Обоснование модели ОКР. Как указывалось во введении, предположение о стационарности ОКР справедливо (с определённой оговоркой) лишь на малых временных интервалах, что не позволяет проводить оптимальную обработку значительного массива измерений, относящегося ко всему отрезку наблюдения $[0, T]$. Для устранения этого недостатка воспользуемся экспоненциальной моделью ОКР $\mu(t) = \exp\{\boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{q}(t)\}$, $t \in [0, T]$, которая обеспечивает выполнение условия его положительности и обладает хорошими аппроксимационными свойствами. Здесь под $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_k, k = \overline{0, K}]^T$ понимается вектор неизвестных коэффициентов, а под $\mathbf{q}(t) = [q_k(t), k = \overline{0, K}]^T$ — вектор базисных функций (в частном случае $q_k(t) = t^k$ — степенной базис), $q_0(t) \equiv 1$. Как будет показано далее, именно эта модель приводит к линейному варианту решения задачи оценивания. Кроме того, данная модель позволяет учесть различные условия наблюдения, в том числе и отмеченное во введении явление интерференции [5].

Целесообразность использования экспоненциальной модели ОКР можно продемонстрировать на примере задачи радиотехнической разведки наземной радиолокационной станции с помощью самолёта-разведчика, осуществляющего прямолинейное равномерное движение на постоянной высоте h_S [5, с. 176–181]. Для ОКР $\mu = \mu(t)$ была построена модель [5, с. 179, 180] $\mu = \kappa\eta\Phi(\theta)$, где κ — коэффициент пропорциональности, $\eta = \eta(t)$ — коэффициент потерь, $\Phi(\theta) = \Phi[\theta(t)]$ — интерференционный множитель. В этой модели интерференционный множитель, зависящий от θ (угла между подстилающей поверхностью и направлением на самолёт-разведчик), находится по формуле [5]

$$\Phi(\theta) = \left[1 + F^2(2\theta) \exp\left\{-\frac{26h_n\theta f}{c}\right\} - 2 \exp\left\{-\frac{13h_n\theta f}{c}\right\} F(2\theta) \cos\left(\frac{4\pi h_R h_S f}{cD}\right) \right]^{1/2},$$

где $F(2\theta)$ — нормированная диаграмма направленности передающей антенны радиолокационной станции; h_R — высота антенны; h_n — средняя высота неровностей подстилающей поверхности; $D = D(t)$ — горизонтальная дальность; f — частота излучения; c — скорость света.

Для описания диаграммы направленности антенны радиолокационной станции воспользуемся моделью [5, с. 179]

$$F(2\theta) = \begin{cases} \exp\{-1,39(2\theta\theta_0^{-1})\} & \text{при } 2\theta\theta_0^{-1} < 1, \\ 0,23\theta_0\theta^{-1} & \text{при } 1 < 2\theta\theta_0^{-1} < \pi\theta_0^{-1}, \end{cases}$$

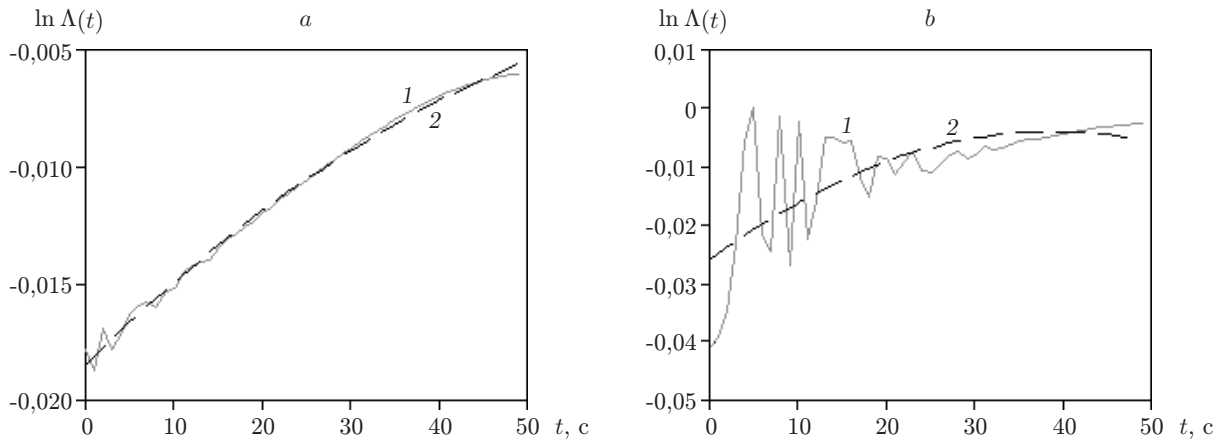


Рис. 2. Зависимость $\ln \Lambda$ от t : при $h_S = 3,5 \cdot 10^3$ м (а), при $h_S = 1,5 \cdot 10^3$ м (б)

где θ_0 — ширина диаграммы направленности антенны на уровне половинной мощности в вертикальной плоскости.

Пусть движение самолёта-разведчика описывается уравнениями $x(t) = -10^4 + 2 \times 10^2 t$ (м); $y(t) = h_S$, кроме того, $h_n = \lambda = 3$ см; $\theta_0 = 6^\circ$; $h_R = 5$ м; $t \in [0, 50]$ с; $\lg \eta = -10^{-1} \tilde{\alpha} R$, $R = R(t)$ — наклонная дальность, $\tilde{\alpha}$ — удельный коэффициент затухания (дБ · км⁻¹).

С учётом принятых исходных данных построим зависимость $\ln \Lambda(t) = \ln\{\eta(t)\Phi[\theta(t)]\}$, которая полностью характеризует поведение ОКР $\mu(t)$ применительно к модели движения самолёта-разведчика. Так, на рис. 2 представлены графики зависимости $\ln \Lambda(t)$ и её квадратичной аппроксимации (с помощью полинома второй степени в модели ОКР): кривые 1 — $\ln \Lambda(t)$, кривые 2 — полином. Графики явно указывают на нестационарный характер поведения ОКР $\mu(t)$, при этом относительная погрешность квадратичного приближения в случае $h_S = 3,5 \cdot 10^3$ м (рис. 2, а) не превысила 2,1 %, что свидетельствует о хороших аппроксимационных свойствах принятой модели ОКР.

При уменьшении высоты полёта h_S самолёта-разведчика до $1,5 \cdot 10^3$ м функция $\ln \Lambda(t)$ приобретает более выраженный колебательный характер, а погрешность квадратичного приближения на основе принятой модели ОКР резко возрастает (рис. 2, б). Это наглядно показывает, что на малых высотах полёта необходимо расширять спектральный состав данной модели и тщательно подбирать её базисные функции с учётом условий радиотехнической разведки.

Таким образом, принятая модель ОКР обеспечивает выполнение трёх основных условий: положительность ОКР для любого момента времени, адекватность описания ОКР при соответствующем выборе числа и типа базисных функций, а также линейность развиваемого далее метода.

Решение задачи. Будем пользоваться записью $\mu(t) = \tilde{\lambda}_0 \tilde{\mu}(t)$, где $\tilde{\lambda}_0 = \exp\{\lambda_0\}$, $\tilde{\mu}(t) = \exp\{\tilde{\lambda}^T \tilde{\mathbf{q}}(t)\}$, $\tilde{\lambda} = [\lambda_k, k = \overline{1, K}]^T$, $\tilde{\mathbf{q}}(t) = [q_k(t), k = \overline{1, K}]^T$. С учётом $E_i = \mu_i r_i^{-1}$ и $E_j = \mu_j r_j^{-1}$ получаем базовые формулы для отношения дальностей:

$$r_i r_j^{-1} = \tilde{\mu}_{ij} E_j E_i^{-1}, \quad r_j r_i^{-1} = \tilde{\mu}_{ji} E_i E_j^{-1},$$

где $\tilde{\mu}_{ij} = \mu_i \mu_j^{-1}$, $\tilde{\mu}_{ji} = \mu_j \mu_i^{-1}$, $\mu_i = \mu(t_i)$ и $\mu_j = \mu(t_j)$. По теореме косинусов (см. рис. 1, б) имеем $(\nu \Delta t_{ij})^2 = r_i^2 + r_j^2 - 2r_i r_j \cos \Delta \psi_{ij}$, где $\Delta t_{ij} = |t_j - t_i|$; $\Delta \psi_{ij} = |\psi_j - \psi_i|$; ψ_i, ψ_j —

азимуты цели в плоскости траектории. Из данного равенства следует формула для расчёта дальности:

$$r_j = \nu \Delta t_{ij} [H_{ij}^2 - 2H_{ij} \cos \Delta \psi_{ij} + 1]^{-1/2}, \quad (1)$$

где $H_{ij} = r_i r_j^{-1} = \tilde{\mu}_{ij} E_{ji}$; $E_{ji} = E_j E_i^{-1}$; $\tilde{\mu}_{ij} = \mu_i \mu_j^{-1} = \tilde{\mu}_i \tilde{\mu}_j^{-1} = \exp\{\tilde{\lambda}^T(\tilde{\mathbf{q}}_i - \tilde{\mathbf{q}}_j)\}$; $\tilde{\mu}_i = \tilde{\mu}(t_i)$; $\tilde{\mu}_j = \tilde{\mu}(t_j)$; $\tilde{\mathbf{q}}_i = \tilde{\mathbf{q}}(t_i)$; $\tilde{\mathbf{q}}_j = \tilde{\mathbf{q}}(t_j)$. С другой стороны, величину H_{ij} можно получить из геометрических соображений, применяя теорему синусов для треугольника ИЦ_iОИЦ_j (см. рис. 1, б): $r_i \sin^{-1}(\pi - \xi_j) = r_j \sin^{-1} \xi_i$. Отсюда $H_{ij} = r_i r_j^{-1} = \sin \xi_j \cdot \sin^{-1} \xi_i$. Так как $\xi_i = \pi - (\psi_i + \gamma)$, $\xi_j = \pi - (\psi_j + \gamma)$, то

$$H_{ij} = \frac{\sin \xi_j}{\sin \xi_i} = \frac{\sin(\psi_j + \gamma)}{\sin(\psi_i + \gamma)} = \frac{\sin \psi_j + \cos \psi_j \cdot \operatorname{tg} \gamma}{\sin \psi_i + \cos \psi_i \cdot \operatorname{tg} \gamma}, \quad (2)$$

т. е. для нахождения H_{ij} необходимо знать угол γ между направлением полёта и осью OX' . Для определения данного угла примем, что с учётом модели прямолинейного равномерного движения ИЦ в плоскости $X'OY'$ ($x = a_0 + a_1 t$ и $y = b_0 + b_1 t$, где a_0, a_1, b_0, b_1 — неизвестные коэффициенты) справедливы соотношения (по аналогии с [8])

$$y x^{-1} = \operatorname{tg} \psi, \quad b_0 + b_1 t = (a_0 + a_1 t) \operatorname{tg} \psi,$$

$$(t \sin \psi) a_{10} - \cos \psi b_{00} - (t \cos \psi) b_{10} = -\sin \psi,$$

где $a_{10} = a_1 a_0^{-1}$, $b_{00} = b_0 a_0^{-1}$, $b_{10} = b_1 a_0^{-1}$, $a_0 \neq 0$ — нормированные коэффициенты. Записав последнее уравнение для j моментов времени, получим СЛАУ относительно координат вектора $\boldsymbol{\eta} = [a_{10}, b_{00}, b_{10}]^T$: $\mathbf{B} \boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\theta}$, где \mathbf{B} — матрица размера $(j+1) \times 3$, состоящая из строк $(t_i \sin \psi_i, -\cos \psi_i, -t_i \cos \psi_i)$, $i = \overline{0, j}$, $\boldsymbol{\theta} = [-\sin \psi_i, i = \overline{0, j}]^T$. Полагая, что $j+1 \geq 3$, найдём нормированные коэффициенты модели движения ИЦ. Если число строк СЛАУ больше трёх, то строятся сглаженные оценки этих коэффициентов с использованием псевдоматрицы. Искомый угол γ может быть вычислен из соотношения $\operatorname{tg} \gamma = b_1 a_1^{-1} = b_{10} a_{10}^{-1}$. Таким образом, только по угловым измерениям $\psi = \psi(t)$ можно найти сглаженную оценку для γ и аналогичную оценку для величины H . Следует отметить, что формула (2) справедлива и для случая, когда ИЦ летит параллельно плоскости XOY .

Для оценивания $\tilde{\mu}(t)$ с учётом (2) воспользуемся следующим очевидным соотношением: $\exp\{\tilde{\lambda}^T(\tilde{\mathbf{q}}_i - \tilde{\mathbf{q}}_j)\} E_{ji} = \sin(\psi_j + \gamma) \sin^{-1}(\psi_i + \gamma)$. Логарифмируя его левую и правую части, получим линейное уравнение относительно вектора $\tilde{\lambda}^T$:

$$\tilde{\lambda}^T(\tilde{\mathbf{q}}_i - \tilde{\mathbf{q}}_j) = \ln[E_{ij} \sin(\psi_j + \gamma) \cdot \sin^{-1}(\psi_i + \gamma)].$$

Именно принятая экспоненциальная форма для математической модели ОКР обеспечила возможность построения линейного уравнения для нахождения искомых коэффициентов. Данное скалярное уравнение является базовым для построения сглаженной оценки вектора $\tilde{\lambda}$. При сглаживании можно использовать произвольную временную сетку t_{i_l} , $l = \overline{1, L}$, где $i_l \in \overline{0, j-1}$, $L = L(j)$, $i_l > i_{l-1}$, $t_{i_l} > t_{i_{l-1}}$, $t_{i_L} < t_j$. Соответствующая СЛАУ имеет вид

$$\tilde{\lambda}^T(\tilde{\mathbf{q}}_{i_l} - \tilde{\mathbf{q}}_j) = \varphi_{i_l j}, \quad l = \overline{1, L}, \quad L \geq K, \quad j > i_L, \quad (3)$$

где $\varphi_{i_l j} = \ln[E_{i_l j} \sin(\psi_j + \gamma) \cdot \sin^{-1}(\psi_{i_l} + \gamma)] = \ln[E_{i_l j} r_{i_l} r_j^{-1}]$. Величины $\varphi_{i_l j}$ можно рассматривать как косвенно измеряемые параметры $\varphi_{i_l j} = \varphi_{i_l j}(\psi_{i_l}, \psi_j, E_{i_l}, E_j)$. Полагая t_j

текущим моментом времени ($t_j \in [0, T]$), можно сформировать расширенный вектор косвенных измерений $\Phi_j = [\varphi_{i_l j}, l = \overline{1, L}]^T$, $i_l \in \overline{0, j-1}$, корреляционная матрица ошибок измерений координат которого находится стандартным способом [13]: $\mathbf{K}_{\Phi_j} = \mathbf{F}_j \mathbf{K}_{\mathbf{D}_j} \mathbf{F}_j^T$, $j \in \overline{K, N}$, где K — размерность вектора $\tilde{\lambda}$, $\mathbf{K}_{\mathbf{D}_j}$ — корреляционная матрица ошибок измерений координат вектора $\mathbf{D}_j = [d_{mj}, m = \overline{1, 2(L+1)}]^T = [\psi_j^T, \mathbf{E}_j^T]$, $\psi_j = [\psi_{i_l}, l = \overline{1, L+1}]^T$, $\mathbf{E}_j = [E_{i_l}, l = \overline{1, L+1}]^T$, $\psi_{i_{L+1}} = \psi_j$, $E_{i_{L+1}} = E_j$, $\mathbf{F}_j = [\partial \Phi_j / \partial \mathbf{D}_j^T]$ — матрица частных производных размером $L \times 2(L+1)$. Сформируем невязку: $\delta_j = \hat{\Phi}_j - \Phi_j = \hat{\Phi}_j - \mathbf{Q}_j \tilde{\lambda}$, где $\delta_j = [\delta_{i_l}, l = \overline{1, L}]^T$; $\hat{\Phi}_j$ — вектор косвенных измерений с учётом ошибок пеленгования и определения амплитуды принятого сигнала; $\mathbf{Q}_j = [q_k(t_{i_l}) - q_k(t_j), l = \overline{1, L}, k = \overline{1, K}]$ — матрица разностей отсчётов базисных функций. Из условия минимума квадратичной формы $J_j(\tilde{\lambda}) = \delta_j^T \mathbf{K}_{\Phi_j}^{-1} \delta_j$ получим оценку

$$\tilde{\lambda}^* = (\mathbf{Q}_j^T \mathbf{K}_{\Phi_j}^{-1} \mathbf{Q}_j)^{-1} (\mathbf{Q}_j^T \mathbf{K}_{\Phi_j}^{-1} \hat{\Phi}_j). \quad (4)$$

Формула (4) соответствует модифицированной МНК-оценке для случая косвенных измерений $\hat{\Phi}_j = \Phi_j + \Delta \Phi_j$ [13]. Обратная матрица $\mathbf{K}_{\Phi_j}^{-1}$ в (4) задаёт соответствующие веса косвенных измерений. Для корреляционной матрицы ошибок оценивания вектора $\tilde{\lambda}$ справедлива формула

$$\mathbf{K}_{\tilde{\lambda}} = (\mathbf{Q}_j^T \mathbf{K}_{\Phi_j}^{-1} \mathbf{Q}_j)^{-1}.$$

Зная $\tilde{\lambda}^*$, можно сформировать оценку для $\tilde{\mu}(t)$: $\tilde{\mu}^*(t) = (\tilde{\lambda}^*)^T \tilde{\mathbf{q}}(t)$. Таким образом, по результатам угловых и амплитудных измерений удаётся идентифицировать ОКР $\mu(t) = \tilde{\lambda}_0 \tilde{\mu}(t) = \exp\{\lambda_0\} \tilde{\mu}(t)$ с точностью до постоянной $\tilde{\lambda}_0$.

Возможны два варианта нахождения дальности:

$$r_j = \nu \Delta t_{ij} C_{ij}^{-1} = \nu \Delta t_{ij} (H_{ij}^2 - 2H_{ij} \cos \Delta \psi_{ij} + 1)^{-1/2} \quad (5)$$

(здесь $\Delta t_{ij} = |t_j - t_i|$, $\Delta \psi_{ij} = |\psi_j - \psi_i|$, $C_{ij} = (H_{ij}^2 - 2H_{ij} \cos \Delta \psi_{ij} + 1)^{1/2}$) и

$$r_j = \mu_j E_j^{-1} = \tilde{\lambda}_0 \exp\{(\tilde{\lambda})^T \tilde{\mathbf{q}}_j\} E_j^{-1}, \quad (6)$$

однако в (6) множитель $\tilde{\lambda}_0$ неизвестен. Из (5) и (6) следует формула для вычисления λ_0 :

$$\lambda_0 = \ln\{\nu \Delta t_{ij} E_j C_{ij}^{-1}\} - (\tilde{\lambda})^T \tilde{\mathbf{q}}_j. \quad (7)$$

Таким образом, с учётом (3) и (7) можно построить оценку ОКР:

$$\mu^*(t) = \exp\{\lambda_0^*\} \tilde{\mu}^*(t) = \nu \Delta t_{ij} E_j C_{ij}^{-1} \exp\{(\tilde{\lambda}^*)^T (\tilde{\mathbf{q}}(t) - \tilde{\mathbf{q}}_j)\}. \quad (8)$$

Реализация рассмотренного УЭМ (1)–(8) для нестационарного случая возможна в рамках как одноэтапного, так и двухэтапного алгоритма. Одноэтапный алгоритм может применяться в пассивных системах, к которым не предъявляются жёсткие требования к

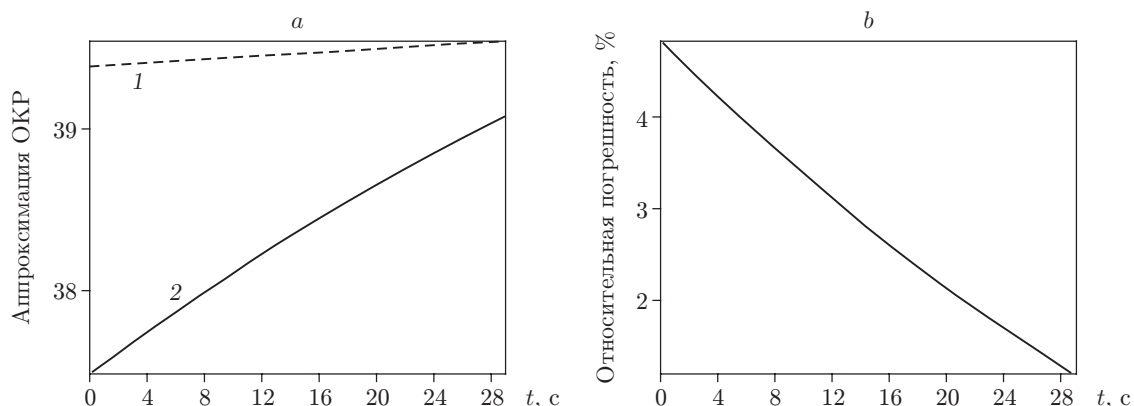


Рис. 3. Результаты сглаживания ОКР: аппроксимация ОКР (а), относительная погрешность аппроксимации ОКР (б)

оперативности функционирования. В этом случае формирование оценок для ОКР $\mu(t)$ и дальности $r(t)$ осуществляется сразу же на сглаженных данных по выборке нарастающего объёма. Во втором случае на первом этапе по накапливающимся амплитудно-угловым измерениям вычисляются сглаженные оценки γ^* , $\tilde{\mu}^*(t)$, $\mu^*(t)$ и $H^*(t)$ для временного интервала $[0, T_s] \subset [0, T]$. На втором этапе оценки $\mu^*(t)$ и $H^*(t)$ экстраполируются на интервал $[T_s, T] \subset [0, T]$ и затем находятся дальности до ИЦ по формулам (5) и (6).

Численный эксперимент. Пусть ИЦ движется в пространстве параллельно плоскости XOY равномерно прямолинейно из точки с координатами $x_0 = -80$ км, $y_0 = 1$ км, $z_0 = 5$ км. Скорость ИЦ $\nu = 200$ м/с (считается известной с погрешностью $\delta\nu = 5\%$); угол между вектором скорости и осью OX составляет 5° . Главный луч антенны ИЦ имеет ширину $2,5^\circ$ и сканирует область, в которой находится пеленгатор. Пеленгатор осуществляет измерения азимута и угла места ИЦ по главному лучу с погрешностями $\sigma_\alpha = \sigma_\beta = 30''$, а также амплитуды сигнала с погрешностью 5% . Погрешности измерений моделировались с использованием датчика случайных чисел. Период съёма информации, соответствующий скорости сканирования, равен $\Delta t = 1$ с. С учётом принятых исходных данных сформирована оценка $\gamma^* = 0,46^\circ$ угла γ (реально $\gamma = 0^\circ$). Предварительно угловые измерения были сглажены многочленами второй степени, амплитудные — линейной функцией. Обобщённый коэффициент радиолокации сглажен функцией $\mu(t) = \exp(\lambda_0 + \lambda_1 t + \lambda_2 t^2)$ (рис. 3). На рис. 3, а кривая 1 соответствует реальному ОКР, кривая 2 — приближённому. Максимальная погрешность оценивания дальности с учётом оценки ОКР составляет $3,178\%$ (рис. 4). Обозначения кривых на рис. 4 аналогичны обозначениям на рис. 3, а. Для оцени-

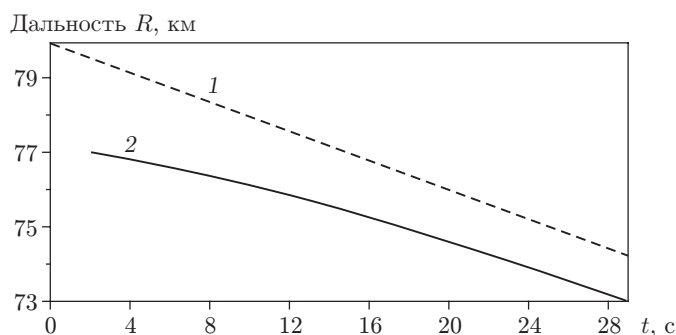


Рис. 4. Результаты расчёта дальности с учётом ОКР

вания дальности без учёта нестационарности ОКР (когда $\tilde{\mu}_{ij} = 1$) имеем максимальную погрешность 40,594 %.

Заключение. На основе развитого УЭМ и известных методов пассивной дальнометрии можно строить комбинированные алгоритмы оценивания, в максимальной степени учитывающие требования, предъявляемые к рассматриваемой радиотехнической системе. Метод наиболее целесообразно применять в условиях нестационарности радиоканала с использованием не только регулярной, но и случайной составляющей ОКР. Влияние первой из них учитывается подбором соответствующих базисных функций, например гармонического характера, для описания интерференционных явлений; второй составляющей — сглаживанием косвенных измерений в рамках модифицированного МНК, при этом возможно также применение известных методов линейной и нелинейной фильтрации.

Результаты численного эксперимента наглядно показывают необходимость учёта нестационарности ОКР при решении задачи пассивной локации ИЦ на основе угловых и амплитудных измерений. Полученные характеристики точности подтверждают возможность практического применения развитого УЭМ в пассивных системах гражданского и военного назначения.

По аналогии с известными методами [9–12] использование энергетических измерений наиболее эффективно в тех случаях, когда полезный сигнал ИЦ формируется с помощью частотной или фазовой модуляции при постоянной огибающей, что позволяет в полной мере воспользоваться базовым соотношением (1).

Для учёта возможности появления в измерительных каналах динамических помех наблюдения необходимо первичные данные пеленгатора подвергнуть процедуре обобщённого сглаживания с применением методов, изложенных в работах [13–15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Основы** маневрирования кораблей /Под ред. М. Скворцова. М.: Воениздат, 1966. 270 с.
2. **Хвоц В. А.** Тактика подводных лодок. М.: Воениздат, 1989. 264 с.
3. **Макухина Т. П., Миленский А. В., Натальченко О. С. и др.** Оценка текущих координат движущегося объекта по данным пеленгования // Вопросы радиоэлектроники. Сер. АСУПР. 1992. Вып. 2. С. 3–7.
4. **Булычев Ю. Г., Бурлай И. В.** Пеленгация в условиях априорной неопределенности // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2002. № 5. С. 46–51.
5. **Мельников Ю. П., Попов С. В.** Радиотехническая разведка. Методы оценки эффективности местоопределения источников излучения. М.: Радитехника, 2008. 432 с.
6. **Булычев Ю. Г., Шухардин А. Н.** Идентификация параметров траектории цели на базе одноканального подвижного пеленгатора // Радиотехника. 2004. № 8. С. 3–7.
7. **Булычев Ю. Г., Булычев В. Ю., Ивакина С. С., Николас П. И.** Идентификация модели при пеленговании цели с частично известными параметрами движения // Радиотехника. 2013. № 5. С. 10–15.
8. **Булычев В. Ю., Булычев Ю. Г., Ивакина С. С., Мозоль А. А.** Оценивание параметров движения объекта на базе стационарного квазиавтономного пеленгатора // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2013. № 5. С. 92–99.
9. **Сытенский В. Д.** Пассивная локация на основе амплитудных измерений // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2011. Вып. 1. С. 69–75.
10. **Евдокимов Ю. Ф., Медведев В. П.** Амплитудная система определения местоположения источников излучения с использованием метода наименьших квадратов и исследование ее точности // Телекоммуникации. 2003. № 11. С. 34–37.

11. **Уфаев В. А., Афанасьев В. И., Разиньков С. П.** Оценка координат источника радиоизлучения на основе измерений амплитуды электромагнитного поля // Радиотехника. 2003. № 10. С. 71–73.
12. **Булычев В. Ю., Булычев Ю. Г., Ивакина С. С.** Пассивная локация на основе угловых и мощностных измерений системы пеленгаторов // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2014. № 1. С. 65–73.
13. **Мудров В. И., Кушко В. П.** Методы обработки измерений: квазиправдоподобные оценки. М.: Радио и связь, 1983. 304 с.
14. **Булычев Ю. Г., Елисеев А. В.** Обработка измерений в условиях мультиструктурных помех // Автометрия. 2007. **43**, № 5. С. 26–38.
15. **Булычев Ю. Г., Бородин Л. И., Головской В. А. и др.** Обработка данных измерений при случайной смене структур динамических помех // Автометрия. 2009. **45**, № 2. С. 14–21.

Поступила в редакцию 12 декабря 2014 г.
