

УДК 621.391.1

ПЕЛЕНГАЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД КООРДИНАТОМЕТРИИ С УЧЁТОМ КРИВИЗНЫ ЗЕМЛИ И ЯВЛЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

Ю. Г. Булычев¹, А. А. Мозоль²

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

²Северо-Кавказский филиал Московского технического университета связи и информатики,
344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Серафимовича, 62
E-mail: profbulych@yandex.ru
amozol@bk.ru

Предложен метод определения пространственных координат движущегося источника излучения на базе двухпозиционной системы по измерениям одного пеленга и относительным энергетическим измерениям принимаемого сигнала с учётом влияния его отражения от поверхности Земли. Задача пассивной локации решается для малых углов места с учётом кривизны Земли, при этом используется полиномиальная модель движения источника. Построен алгоритм параметрической идентификации данной модели по выборке измерений нарастающего объёма в регуляризованной постановке, проведён анализ точностных характеристик метода.

Ключевые слова: источник излучения, пассивная локация, интерференция, регуляризация, угловые измерения, энергетические измерения, полиномиальная модель движения.

DOI: 10.15372/AUT20170106

Введение. В последнее время уделяется повышенное внимание пеленгационно-энергетическим методам пассивной локации стационарных и подвижных источников излучения (ИИ) на основе угловых и энергетических [1–7] или только энергетических [8] измерений. При этом реализация методов возможна на базе одно-, двух- и многопозиционных систем пассивной локации. К недостаткам данных методов относятся следующие: не учитывается движение ИИ либо применяется модель прямолинейного равномерного движения ИИ с частично известными параметрами (например, величиной скорости); не принимается во внимание кривизна Земли, что не позволяет осуществлять координатометрию ИИ, находящегося на большом удалении; не рассматривается возможность регуляризованного оценивания параметров движения ИИ по выборке измерений нарастающего объёма с учётом вычислительной некорректности задачи пассивной локации.

Известно [9], что для обнаружения и сопровождения ИИ при малых углах места требуется увеличивать высоту размещения приёмных антенн относительно поверхности Земли. В этом случае должны учитываться интерференционные эффекты, обусловленные появлением прямой и отражённой волн на раскрывах данных антенн [9]. Однако указанные выше методы пеленгационно-энергетической координатометрии ориентированы на простейший случай свободного распространения электромагнитных волн от ИИ до приёмных антенн и, как следствие, применимы только для идеализированных (гладких) диаграмм направленности антенн (ДНА). При этом реальные практические задачи могут быть связаны с пассивной локацией низколетящих ИИ на малых дальностях или высоколетящих ИИ на

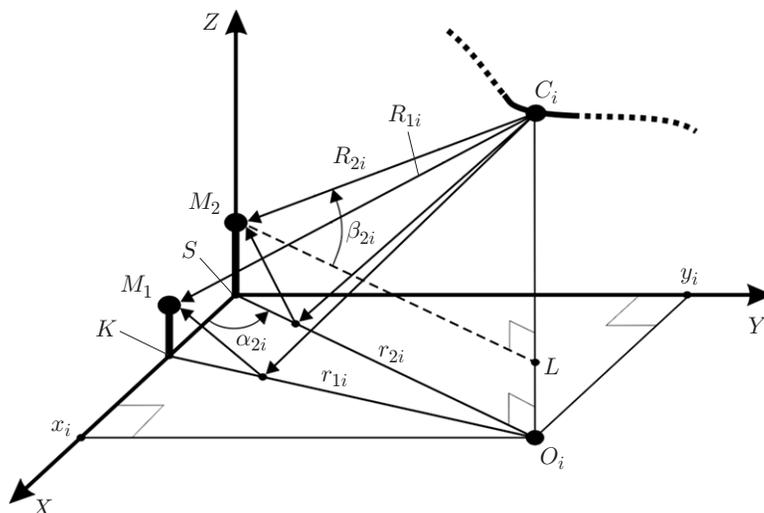


Рис. 1

больших дальностях, что соответствует малым углам места. В первом случае необходимо использовать модель плоской Земли, а во втором — принимать во внимание её сферичность [10]. Известно [11], что при малых углах места следует учитывать влияние Земли даже для диапазонов сантиметровых и миллиметровых длин волн.

Отсюда представляется актуальной разработка альтернативного пеленгационно-энергетического метода пассивной локации движущегося ИИ при малых углах места, который устраняет отмеченные недостатки методов [1–8], ориентированных на применение угловых и (или) энергетических измерений.

Постановка задачи. Рассмотрим геометрию задачи (рис. 1). Предположим, что в декартовой базовой системе координат (БСК), совмещённой с пассивной двухпозиционной измерительной системой, движется некоторый ИИ (на рисунке положение ИИ в момент времени $t_i \in [0, T]$ обозначено $C_i = C(t_i)$) и наблюдается на временном интервале $[0, T]$ с приёмных пунктов M_n ($n \in \{1, 2\}$) под малыми углами места. Вследствие этого для любых поляризации и длины волны излучения выполняется критерий Рэлея гладкости участка земной поверхности ($4\pi\sigma\psi\lambda^{-1} < 0,1$, где σ — стандартное отклонение неровностей поверхности от её средней высоты; ψ — угол скольжения в радианах относительно горизонтали ($\psi \approx \beta$); λ — длина волны). В точках расположения антенн приёмных пунктов возникает интерференция прямой и отражённой компонент волны [10, 11]. Значимым при отражении будем считать участок в пределах первой зоны Френеля [10], ограниченный значением радиуса $r_f \approx 23h_n\lambda^{-1}$, где h_n — аппликата антенны пункта M_n .

Пусть движение ИИ в БСК на интервале $[0, T]$ описывается полиномиальной в общем случае криволинейной моделью, широко используемой на практике, особенно в условиях манёвра ИИ или отсутствия информации о действующих на него силах [12]:

$$\boldsymbol{\eta}(t) = \mathbf{Q}(t)\mathbf{G}, \quad t \in [0, T]. \quad (1)$$

Здесь $\boldsymbol{\eta}(t) = \boldsymbol{\eta} = [x, y, z]^T$ — вектор пространственных координат ИИ; $\mathbf{Q}(t)$ — матрица размера $3 \times 3(K+1)$:

$$\mathbf{Q}(t) = \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^T & \mathbf{0}^T & \mathbf{0}^T \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{Q}^T & \mathbf{0}^T \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{0}^T & \mathbf{Q}^T \end{bmatrix},$$

$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}(t) = [q_k(t), k = \overline{0, K}]^T$ — вектор заданных базисных функций размером $3(K+1)$, $\mathbf{0}$ — нулевой вектор-столбец размером $K+1$; $\mathbf{G} = [g_k, k = \overline{1, 3(K+1)}]^T = [\mathbf{A}^T, \mathbf{B}^T, \mathbf{C}^T]^T$ — объединённый вектор неизвестных коэффициентов: $\mathbf{A} = [a_k, k = \overline{0, K}]^T$, $\mathbf{B} = [b_k, k = \overline{0, K}]^T$, $\mathbf{C} = [c_k, k = \overline{0, K}]^T$.

В моменты времени t_i (где $t_i \in [0, T]$, $i = \overline{1, I}$, $\{t_i\}_{i=1}^I$ — произвольная временная сетка) на приёмных пунктах M_1 и M_2 фиксируются энергетические уровни излучения $p_{1i} = p_1(t_i)$ и $p_{2i} = p_2(t_i)$ соответственно. Будем полагать, что ДНА приёмных пунктов известны. Кроме того, на втором пункте M_2 измеряются азимут $\alpha_{2i} = \alpha_2(t_i)$ и угол места $\beta_{2i} = \beta_2(t_i)$ наблюдаемого ИИ (далее будем считать, что начало БСК связано с поверхностью Земли и совпадает с абсциссой и ординатой пункта M_2). При этом выполняются условия [10] $h_n, z_i \ll R_{ni}$ и $h_n, z_i \gg \lambda$ (где $z_i = z(t_i)$ — аппликата положения ИИ в БСК, R_{ni} — наклонная дальность от пункта M_n до ИИ), обеспечивающие адекватность предположения, что на существенный при отражении участок поверхности падает однородная локально плоская электромагнитная волна и применимо понятие коэффициентов отражения от плоской поверхности.

Требуется разработать пеленгационно-энергетический метод оценивания значений пространственных координат $x_i = x(t_i)$, $y_i = y(t_i)$, $z_i = z(t_i)$ по результатам единичных измерений энергетического уровня излучения $p_{ni} = p_n(t_i)$ на приёмных пунктах M_1 , M_2 и угловых координат $\alpha_{2i} = \alpha_2(t_i)$, $\beta_{2i} = \beta_2(t_i)$ на пункте M_2 с учётом влияния подстилающей поверхности (Земли) на результаты энергетических измерений. Атмосфера считается однородной непоглощающей средой с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 1$ и удельной проводимостью среды $\sigma = 0$, поверхность Земли — гладкой и однородной. Необходимо построить алгоритм регуляризованного оценивания коэффициентов полиномиальной модели движения ИИ (параметрическая идентификация модели) по выборке угловых и энергетических измерений нарастающего объёма, а также провести анализ условий наблюдаемости задачи пеленгационно-энергетической координатометрии, применимости и точностных характеристик метода.

Решение задачи (основные соотношения метода). Рассмотрим четырёхугольник $C_i O_i K M_1$ (см. рис. 1), из которого для момента времени $t_i \in [0, T]$ следует

$$R_{1i}^2 = R_1^2(t_i) = r_{1i}^2 + (z_i - h_1)^2, \quad (2)$$

где $R_{1i} = R_1(t_i)$ и $r_{1i} = r_1(t_i)$ — наклонная и горизонтальная дальности от ИИ до пункта M_1 ; $z_i = z(t_i)$ — аппликата ИИ в БСК; h_1 — аппликата антенны пункта M_1 в БСК (здесь и далее индекс i означает, что речь идёт о моменте времени t_i).

Из треугольника $O_i K S$ можно найти

$$r_{1i}^2 = r_{2i}^2 + b^2 - 2r_{2i}b \cos \alpha_{2i}, \quad (3)$$

где $r_{2i} = r_2(t_i)$ — горизонтальная дальность от ИИ до пункта M_2 ; b — известная величина базы двухпозиционной системы ($b = x_1$).

Из треугольника $C_i L M_2$ при выполнении условий $h_1 \approx h_2$ или $h_1, h_2 \ll z_i$ для второго слагаемого в формуле (2) следует

$$(z_i - h_1)^2 \approx (z_i - h_2)^2 = R_{2i}^2 \sin^2 \beta_{2i} \quad (4)$$

(h_2 — аппликата пункта M_2 в БСК; $R_{2i} = R_2(t_i)$ — наклонная дальность для пункта M_2).

Подставляя (3) и (4) в (2), получим выражение

$$R_{1i}^2 \approx r_{2i}^2 + b^2 - 2r_{2i}b \cos \alpha_{2i} + R_{2i}^2 \sin^2 \beta_{2i}. \quad (5)$$

Из треугольника C_iLM_2 следует соотношение $r_{2i}^2 = R_{2i}^2 \cos^2 \beta_{2i}$. Полагая, что $\cos^2 \beta_{2i} = 1 - \sin^2 \beta_{2i}$ и $\sin^2 \beta_{2i} \approx \beta_{2i}^2$, для постановки задачи можно записать

$$r_{2i}^2 \approx R_{2i}^2(1 - \beta_{2i}^2) \approx R_{2i}^2. \quad (6)$$

С учётом (6) и допущением $(1 + \beta_{2i}^2) \approx 1$ выражение (5) примет вид

$$R_{1i}^2 \approx R_{2i}^2 - 2R_{2i}b \cos \alpha_{2i} + b^2. \quad (7)$$

Результирующая мощность сигнала на входе приёмного устройства определяется двумя составляющими: регулярной и случайной [4]. Регулярная составляющая соответствует прямому и зеркально-отражённому сигналам, а случайная — диффузному отражению (рассеянию). Поскольку по условию задачи выполняется критерий гладкости участка земной поверхности, диффузным рассеянием можно пренебречь. Ввиду этого указанная мощность описывается выражением [4]

$$p_{ni} = \lambda^2 P G_n \chi_i G_i^* \Phi_i^2 16^{-1} \pi^{-2} R_{ni}^{-2}, \quad (8)$$

где P — мощность излучения; G_n и $G_i^* = G^*(t_i)$ — коэффициенты усиления антенн пункта M_n и ИИ соответственно; χ_i — коэффициент потерь; $\Phi_i = \Phi(t_i)$ — интерференционный множитель (множитель влияния Земли), учитывающий наличие отражённого от Земли сигнала. При малых углах места (когда выполняется условие $2\pi\lambda^{-1}h_n \sin \beta_{ni} < \pi/9$) и в случае слабонаправленных антенн справедлива формула [10]

$$|\Phi_i| \approx 4\pi h_n z_i \lambda^{-1} r_{ni}^{-1}. \quad (9)$$

Далее, вводя относительные энергетические коэффициенты

$$\begin{cases} q_{1i} = p_{1i}^{1/2} p_{2i}^{-1/2}, \\ q_{2i} = p_{2i}^{1/2} p_{1i}^{-1/2}, \end{cases}$$

допуская выполнение условий $h_1 \approx h_2$ и $G_1 \approx G_2$, с учётом (8) и (9) получим

$$R_{1i}^2 = q_{2i} R_{2i}^2. \quad (10)$$

В выражении (10) зависимость параметра q_{2i} от второй степени дальности объясняется тем, что поле, создаваемое ИИ и распространяющееся в горизонтальном направлении к пунктам M_1 и M_2 , компенсируется за счёт интерференционных явлений полем зеркального ИИ, у которого ток в антенне почти равен по амплитуде току в антенне истинного ИИ и противоположен по фазе [10].

С учётом (10) перепишем выражение (7) в виде

$$q_{2i} R_{2i}^2 \approx R_{2i}^2 - 2R_{2i}b \cos \alpha_{2i} + b^2. \quad (11)$$

Преобразовав (11), получим квадратное уравнение относительно R_{2i} вида

$$R_{2i}^2 + R_{2i}\mu_i + \eta_i \approx 0,$$

где $\mu_i = -2b \cos \alpha_{2i} (1 - q_{2i})^{-1}$ и $\eta_i = b^2 (1 - q_{2i})^{-1}$. Решая это уравнение, находим действительный корень

$$R_{2i} = b[\cos \alpha_{2i} + (q_{2i} - \sin^2 \alpha_{2i})^{1/2}](1 - q_{2i})^{-1}. \quad (12)$$

Другой корень уравнения не соответствует геометрии задачи и может не учитываться.

По аналогии с (12) запишем общее выражение для наклонной дальности

$$R_{ni} = b[\cos \alpha_{ni} + (q_{ni} - \sin^2 \alpha_{ni})^{1/2}](1 - q_{ni})^{-1}, \quad n \in \{1, 2\}, \quad (13)$$

где α_{ni} — азимут ИИ, измеренный от пункта M_n .

Выражение (13) позволяет определить наклонную дальность от ИИ до пункта M_n в момент времени t_i по известным значениям базы b между пунктами M_1 и M_2 , азимута α_{ni} и относительного энергетического коэффициента q_{ni} , который характеризует уровень излучения, регистрируемого на указанных приёмных пунктах.

По найденной дальности R_{ni} , известным пеленгам α_{ni}, β_{ni} и в предположении $r_{ni} \approx R_{ni}$ можно оценить пространственные координаты ИИ в БСК следующим образом:

$$\begin{cases} x_i = R_{ni} \cos \alpha_{ni} = b[\cos \alpha_{ni} + (q_{ni} - \sin^2 \alpha_{ni})^{1/2}](1 - q_{ni})^{-1} \cos \alpha_{ni}, \\ y_i = R_{ni} \sin \alpha_{ni} = b[\cos \alpha_{ni} + (q_{ni} - \sin^2 \alpha_{ni})^{1/2}](1 - q_{ni})^{-1} \sin \alpha_{ni}, \\ z_i = R_{ni} \sin \beta_{ni} + h_n = b[\cos \alpha_{ni} + (q_{ni} - \sin^2 \alpha_{ni})^{1/2}](1 - q_{ni})^{-1} \sin \beta_{ni} + h_n. \end{cases} \quad (14)$$

При учёте сферичности Земли (когда $0,2R'_{ni} < R_{ni} < 0,8R'_{ni}$) [10] высота ИИ над поверхностью Земли вычисляется по формуле [11]

$$z'_i \approx z_i + R_{ni}^2(2R_e)^{-1}, \quad (15)$$

где $R'_{ni} = [(R_e + z_i)^2 - R_e^2]^{1/2} + [(R_e + h_n)^2 - R_e^2]^{1/2}$ — расстояние прямой видимости между пунктом M_n и положением ИИ в БСК; R_e — радиус Земли.

Формулы (2)–(15) составляют математическую основу развиваемого метода оценивания местоположения ИИ по единичным (соответствующим одному моменту времени) пеленгационно-энергетическим измерениям. Далее будет рассмотрен вопрос параметрической идентификации полиномиальной модели (1) движения ИИ в регуляризованной постановке с учётом выборки измерений нарастающего объёма.

Анализ точностных характеристик и наблюдаемости метода. Введём вектор случайных параметров $\gamma_{ni} = [\gamma_{nij}, j = \overline{1, 3}]^T = [\alpha_{ni}, \beta_{ni}, q_{ni}]^T$, который характеризуется математическим ожиданием $\mathbf{m}_{\gamma_{ni}}$ и корреляционной матрицей $\mathbf{K}_{\gamma_{ni}}$. Перепишем уравнения (14) в виде

$$v_{il} = f_l(\gamma_{ni}), \quad l = \overline{1, 3}, \quad (16)$$

где $v_{i1} = x_i, v_{i2} = y_i, v_{i3} = z_i$.

Применяя к выражению (16) известный принцип линеаризации (по аналогии с [7]), получим выражение для дисперсии ошибок оценивания местоположения ИИ на базе (14):

$$\sigma_{v_{il}}^2 \approx \sum_{j=1}^3 \left(\frac{\partial f_l}{\partial \gamma_{nij}} \Big|_{\mathbf{m}_{\gamma_{ni}}} \right)^2 \sigma_{\gamma_{nij}}^2 + 2 \sum_{j=1}^3 \sum_{\substack{k=1 \\ j < k}}^3 \left(\frac{\partial f_l}{\partial \gamma_{nij}} \Big|_{\mathbf{m}_{\gamma_{ni}}} \right) \left(\frac{\partial f_l}{\partial \gamma_{nik}} \Big|_{\mathbf{m}_{\gamma_{ni}}} \right) \mathbf{K}_{\gamma_{ni}}, \quad (17)$$

где $\sigma_{\gamma_{nij}}^2$ — диагональные элементы матрицы $\mathbf{K}_{\gamma_{ni}}$.

Примем допущение, что ошибки измерений параметров α_{ni} , β_{ni} и q_{ni} являются некоррелированными случайными величинами с нулевым математическим ожиданием и соответствующими дисперсиями $\sigma_{\alpha_n}^2$, $\sigma_{\beta_n}^2$ и $\sigma_{q_n}^2$, т. е. матрица $\mathbf{K}_{\gamma_{ni}}$ диагональная. Тогда выражение (17) применительно к (14) будет иметь вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{x_i}^2 = 0,25b^2(q_{ni} - 1)^{-2}\Omega_i^{-1}[(0,5 \sin 4\alpha_{ni} + \sin 2\alpha_{ni}(q_{ni} + \Omega_i^{1/2} \cos \alpha_{ni}))^2 \cos^{-2} \alpha_{ni} \sigma_{\alpha_n}^2 + \\ + (\cos \alpha_{ni}(q_{ni} - 2 \sin^2 \alpha_{ni} + 1 + 2\Omega_i^{1/2} \cos \alpha_{ni}))^2(q_{ni} - 1)^{-2} \sigma_{q_n}^2], \\ \sigma_{y_i}^2 = b^2(1 - q_{ni})^{-2}\Omega_i^{-1}[(\Omega_i^{1/2} \cos 2\alpha_{ni} + q_{ni} \cos \alpha_{ni} - \sin \alpha_{ni} \cdot \sin 2\alpha_{ni})^2 \sigma_{\alpha_n}^2 + \\ + (\Omega_i^{1/2} \sin 2\alpha_{ni} + \sin 2\alpha_{ni}(1 + q_{ni} - 2 \sin^2 \alpha_{ni}))^2 0,25(1 - q_{ni})^{-2} \sigma_{q_n}^2], \\ \sigma_{z_i}^2 = b^2(1 - q_{ni})^{-2}[(0,5\Omega_i^{-1/2} \sin \beta_{ni}(2\Omega_i^{1/2} \sin \alpha_{ni} + \sin 2\alpha_{ni}))^2 \sigma_{\alpha_n}^2 + \\ + (\cos \beta_{ni}(\cos \alpha_{ni} + \Omega_i^{1/2}))^2 \sigma_{\beta_n}^2 + \\ + (\sin \beta_{ni}(2\Omega_i^{1/2} \cos \alpha_{ni} + 1 + q_{ni} - 2 \sin^2 \alpha_{ni}))^2 0,25(1 - q_{ni})^{-2} \Omega_i^{-1} \sigma_{q_n}^2], \end{array} \right. \quad (18)$$

где $\Omega_i = q_{ni} - \sin^2 \alpha_{ni}$.

Выражения (16)–(18) позволяют в первом приближении оценить степень влияния погрешностей измерений параметров α_{ni} , β_{ni} и q_{ni} на точность вычисления координат ИИ.

Вопрос наблюдаемости задачи оценивания наклонной дальности в рамках развиваемого метода пассивной локации решается на базе формулы (13), из которой следует, что для обеспечения наблюдаемости требуется выполнение системы условий

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{ni}^{1/2} p_{mi}^{-1/2} - \sin^2 \alpha_{ni} \geq 0, \\ 1 - p_{ni}^{1/2} p_{mi}^{-1/2} \neq 0, \\ p_{ni} p_{mi}^{-1} \geq 0, \\ p_{mi} \neq 0, \end{array} \right. \quad n, m \in \{1, 2\}, \quad n \neq m. \quad (19)$$

Первое условие (19) накладывает ограничения на геометрию задачи и другие факторы, связанные с отражением излучения от Земли. При этом необходимо, чтобы $p_{ni} \neq 0$. Второе условие реализуется, когда $p_{ni} \neq p_{mi}$. С учётом влияния Земли на интенсивность отражённых компонент излучения и недостижимую на практике идентичность условий отражения можно считать, что второе условие почти всегда осуществимо. Третье и четвёртое условия соблюдаются для $p_{mi} \neq 0$, т. е. система (19) выполняется всегда при наличии ненулевых результатов энергетических измерений.

Идентификация модели движения по выборке измерений нарастающего объёма. Модель движения (1) для момента времени t_i ($t_i \in [0, T]$) запишем в виде «невозмущённой» системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ): $\mathbf{Q}_i \mathbf{G} = \boldsymbol{\eta}_i$, $i \in \{1, 2, \dots, I\}$, где $\boldsymbol{\eta}_i = \boldsymbol{\eta}(t_i) = [x_i, y_i, z_i]^T$ — вектор координат ИИ, вычисленный с использованием формулы (14), $\mathbf{Q}_i = \mathbf{Q}(t_i)$. С учётом всех моментов времени $\{t_1, t_2, \dots, t_I\}$ можно сформировать объединённую невозмущённую СЛАУ: $\boldsymbol{\Psi} \mathbf{G} = \mathbf{H}$, где $\boldsymbol{\Psi} = [\mathbf{Q}_i, i = \overline{1, I}]^T$ — матрица размера $3I \times 3(K + 1)$, $\mathbf{H} = [\boldsymbol{\eta}_i, i = \overline{1, I}]^T$ — вектор размером $3I$. Тогда при наличии ошибок оценивания координат ИИ, обусловленных погрешностями измерения угловых

координат и относительных энергетических коэффициентов, можно получить «возмущённую» СЛАУ: $\hat{\Psi}\hat{\mathbf{G}} = \hat{\mathbf{H}}$, где $\hat{\Psi} = \Psi + \Delta\Psi$, $\hat{\mathbf{G}} = \mathbf{G} + \Delta\mathbf{G}$, $\hat{\mathbf{H}} = \mathbf{H} + \Delta\mathbf{H}$. Вводя ограничения на указанные погрешности измерений и применяя известные свойства векторно-матричных норм, получим границы сверху (по аналогии с [13]): $\|\Delta\Psi\| \leq \delta_\Psi$, $\delta_\Psi \geq 0$, $\|\Delta\mathbf{H}\| \leq \delta_{\mathbf{H}}$, $\delta_{\mathbf{H}} \geq 0$. Тогда регуляризованная оценка $\hat{\mathbf{G}}$ вектора \mathbf{G} на базе возмущённой СЛАУ, соответствующей выборке измерений нарастающего объёма, достигается путём минимизации сглаживающего функционала [13]:

$$J^\alpha[\mathbf{G}, \hat{\mathbf{H}}, \hat{\Psi}] = \rho_{\mathbf{H}}^2(\hat{\Psi}, \mathbf{G}, \hat{\mathbf{H}}) + \mu[(\alpha_{\Psi\mathbf{H}} - \delta_\Psi^2)\Omega[\mathbf{G}] + 2\delta_{\mathbf{H}}\delta_\Psi(\Omega[\mathbf{G}])^{1/2}], \quad (20)$$

где параметр регуляризации $\alpha_{\Psi\mathbf{H}}$ находится из условия

$$\rho_{\mathbf{H}}(\hat{\Psi}, \mathbf{G}, \hat{\mathbf{H}}) - \delta_\Psi(\Omega[\mathbf{G}])^{1/2} = \delta_{\mathbf{H}}. \quad (21)$$

В формулах (20) и (21) введены следующие обозначения: $\rho_{\mathbf{H}}(\cdot)$ — метрика, $\Omega[\mathbf{G}]$ — непрерывный неотрицательный функционал (стабилизатор), $\mu = 0$ для нерегуляризованной постановки задачи и $\mu = 1$ в противном случае.

Если принять $\rho_{\mathbf{H}}(\hat{\Psi}, \mathbf{G}, \hat{\mathbf{H}}) = \|\hat{\Psi}\hat{\mathbf{G}} - \hat{\mathbf{H}}\|^2$, $\Omega[\mathbf{G}] = \|\mathbf{G} - \omega\mathbf{G}'_{(0)}\|^2$, то вместо (20), (21) получим следующий регуляризованный алгоритм оценивания:

$$J^\alpha[\mathbf{G}, \hat{\mathbf{H}}, \hat{\Psi}] = \|\hat{\Psi}\hat{\mathbf{G}} - \hat{\mathbf{H}}\|^2 + \mu[(\alpha_{\Psi\mathbf{H}} - \delta_\Psi^2)\|\mathbf{G} - \omega\mathbf{G}'_{(0)}\|^2 + 2\delta_{\mathbf{H}}\delta_\Psi\|\mathbf{G} - \omega\mathbf{G}'_{(0)}\|], \quad (22)$$

$$\|\hat{\Psi}\hat{\mathbf{G}} - \hat{\mathbf{H}}\| - \delta_\Psi\|\mathbf{G} - \omega\mathbf{G}'_{(0)}\| = \delta_{\mathbf{H}}, \quad (23)$$

где $\mathbf{G}'_{(0)}$ — априорное значение вектора \mathbf{G} (если таковое имеется), при отсутствии априорной информации о $\mathbf{G}'_{(0)}$ полагаем $\omega = 0$.

Для случая $\mu = 0$ алгоритм (22), (23) вырождается в известную оценку метода наименьших квадратов [12]: $\hat{\mathbf{B}} = \hat{\Psi}^T\mathbf{W}\hat{\Psi}$, $\hat{\mathbf{C}} = \hat{\Psi}^T\mathbf{W}\hat{\mathbf{H}}$ (\mathbf{W} — весовая матрица).

Иллюстративный пример. В рассматриваемом примере расстояния задаются в метрах, время — в секундах, а углы — в градусах. Предположим, что ИИ с ненаправленной ДНА совершает полёт над поверхностью Земли на высоте $h = 1,08 \cdot 10^4 \approx 1,1 \cdot 10^4$ на интервале наблюдения $[0, T] = [0, 10^2]$. Воспользуемся равномерной (с шагом $\Delta t = 1$) временной сеткой t_i ($i = \overline{1, 101}$, $t_1 = 0$). Система пассивной локации состоит из двух пунктов $M_1(5 \cdot 10^4, 0, 10^2)$ и $M_2(0, 0, 10^2)$, осуществляющих с требуемой точностью энергетические измерения, кроме того, второй пункт выполняет и угловые измерения. Для имитации случайных погрешностей измерений параметров q_{1i} , q_{2i} и α_{2i} , β_{2i} использовались псевдослучайные числа с нормальным законом распределения, нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическими отклонениями $\sigma_{q_1} = \sigma_{q_2} \approx 8 \cdot 10^{-1}$ и $\sigma_{\alpha_2} = \sigma_{\beta_2} = 0,02$. При этом потребовалось $N = 10^4$ псевдослучайных последовательностей.

С учётом (1), полагая $K = 2$, $q_k(t) = t^k$, $k \in \{0, 1, 2\}$, воспользуемся следующей полиномиальной моделью движения ИИ: $x = 2,5 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^2 t + t^2$, $y = 2,5 \cdot 10^5 - 10^2 t - 2t^2$, $z = 10^3 + 10t + 2t^2$. Значение $z_1 = z(t_1 = 0) = 10^3$ для $t_1 = 0$ было получено из выражения (14), где $z'_1 = h \approx 1,1 \cdot 10^4$, $R_{21} = (x_{21}^2 + y_{21}^2 + z_{21}^2)^{1/2} \approx 353,55 \cdot 10^3$.

На рис. 2, a, b показаны соответственно зависимости относительных погрешностей определения наклонной дальности R_2 (кривая 1 — расчёт без шума, 2 — расчёт с шумом) и координат x (кривая 1 — расчёт без шума, 2 — расчёт с шумом), z (кривая 3 — расчёт без шума, 4 — расчёт с шумом) от времени (погрешность по координате y практически совпадает с погрешностью по координате x , поэтому на рисунке не приводится).

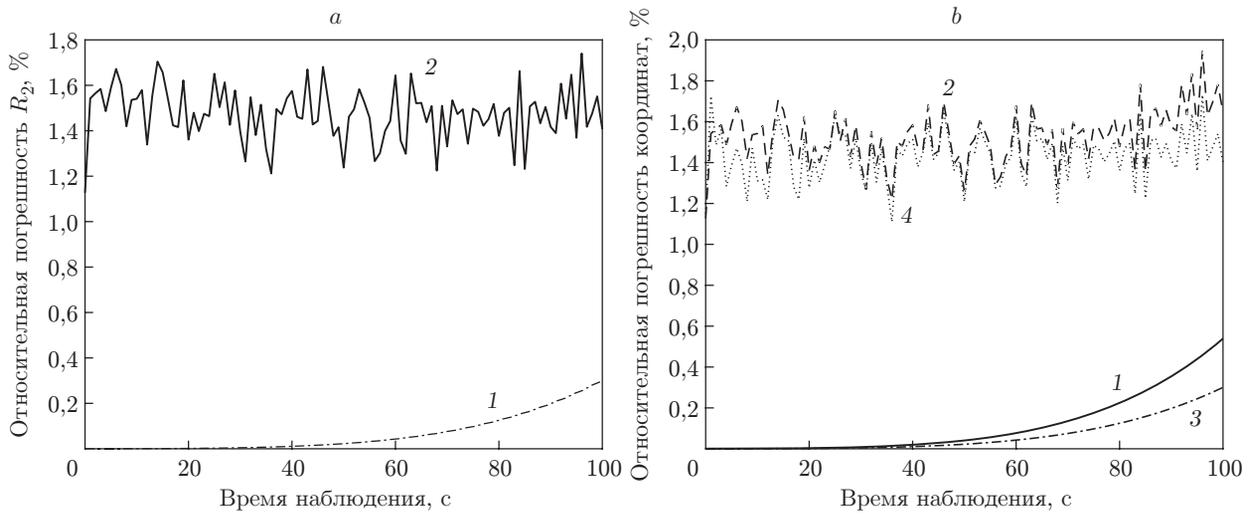


Рис. 2

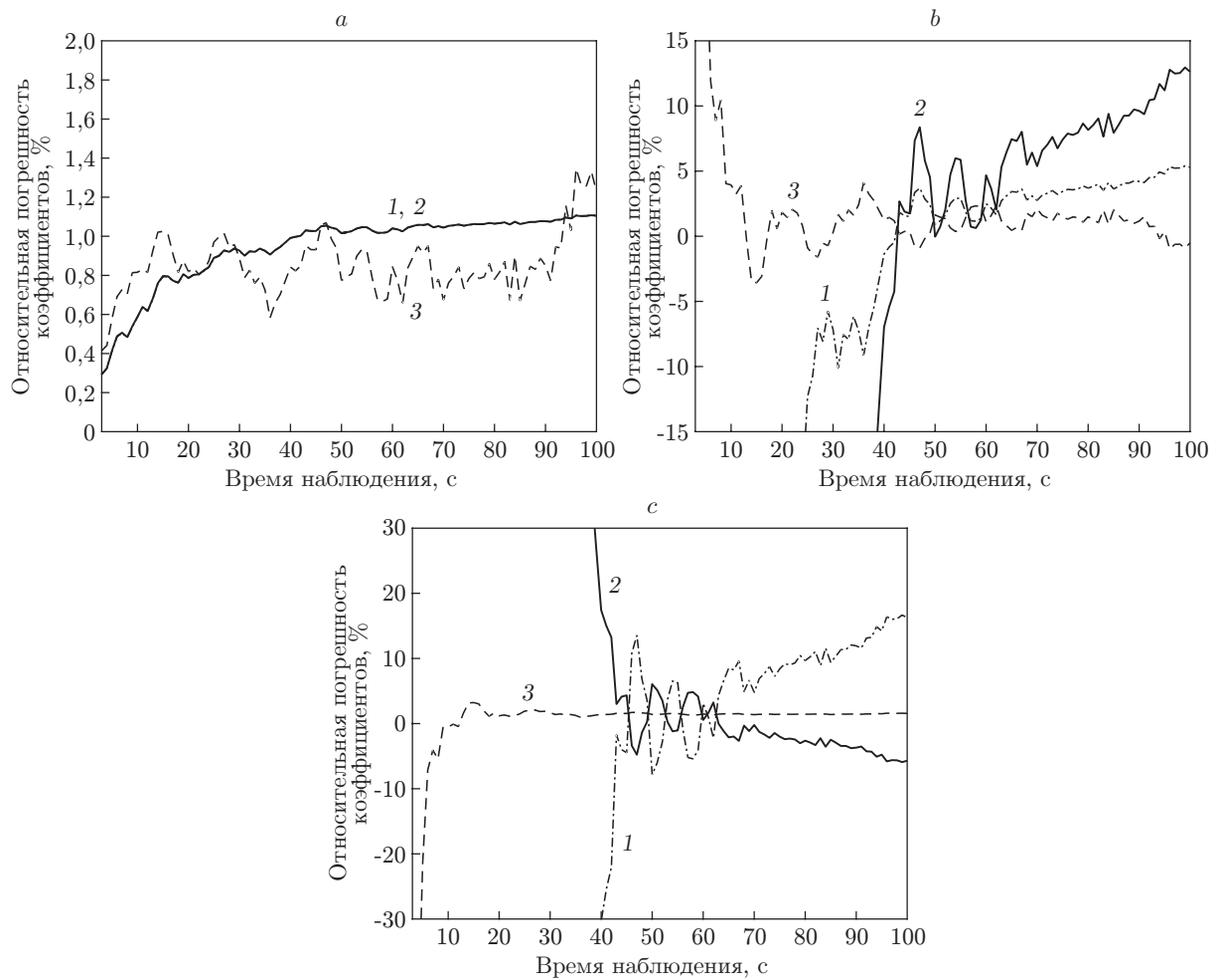


Рис. 3

Из рис. 2, *a, b* видно, что даже при отсутствии случайных ошибок измерений метод даёт незначительную погрешность, обусловленную допущением (6) при малых значениях угла места. С увеличением интервала наблюдения методическая погрешность возрастает. Это связано с принятой для расчёта моделью движения ИИ, обеспечивающей увеличение угла места ИИ с течением времени и, как следствие, ухудшение условий выполнения допущения (6).

На рис. 3, *a—c* представлены относительные погрешности оценивания коэффициентов модели движения ИИ по выборке измерений нарастающего объёма (кривые 1 — a_0, a_1, a_2 , 2 — b_0, b_1, b_2 , 3 — c_0, c_1, c_2). На рис. 3, *a* погрешности оценивания коэффициентов a_0 и b_0 модели движения ИИ практически совпадают. Из рис. 3 видно, что точность оценивания всех коэффициентов в начальные моменты измерений самая низкая, а с течением времени наблюдения повышается. Это объясняется реализацией алгоритма оценивания коэффициентов принятой модели движения по выборке измерений нарастающего объёма. После момента времени $t \approx 80$ точность оценивания ухудшается из-за возникновения методической погрешности, обусловленной допущением о равенстве наклонной и горизонтальной дальностей. На интервале времени $t \in [45, 85]$ относительная погрешность оценивания коэффициентов a_1, b_1, c_1 не превышает 10 % (см. рис. 3, *b*), а коэффициентов a_2, b_2, c_2 — 15 % (см. рис. 3, *c*). Можно заметить, что точность оценивания коэффициентов, стоящих в соответствующих моделях движения при старших степенях аргумента t , хуже, чем для коэффициентов при младших степенях данного аргумента. Это следует из соизмеримости величины абсолютного значения коэффициента со случайными погрешностями.

Как видно из результатов моделирования, относительные погрешности оценивания координат ИИ не превышают 2 %, что свидетельствует о достаточно высокой точности рассматриваемого метода, для достижения которой необходимо в первую очередь ориентироваться на высокоточные измерители энергетических параметров излучения.

Заключение. Таким образом, для развития теории пассивной локации в данной работе предлагается пеленгационно-энергетический метод координатометрии с учётом явления интерференции и кривизны Земли в предположении, что движение ИИ описывается полиномиальной моделью с неизвестными коэффициентами. Этот метод реализуется на базе несложной двухпозиционной пассивной измерительной системы и может быть легко внедрён в любую многопозиционную систему. Новизна метода состоит в том, что он позволяет на базе двухпозиционной пассивной системы по двум энергетическим измерениям и одному пеленгу оценивать пространственные координаты ИИ без привлечения информации о частично известных параметрах движения (например, величине скорости для модели равномерного прямолинейного движения ИИ), учитывать влияние отражающих свойств Земли на результаты измерений, а также проводить регуляризованную параметрическую идентификацию полиномиальной модели движения ИИ по выборке угломерно-энергетических измерений нарастающего объёма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уфаев В. А., Афанасьев В. И., Разиньков С. П. Оценка координат источника радиолучения на основе измерений амплитуды электромагнитного поля // Радиотехника. 2003. № 10. С. 71–73.
2. 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.
3. Сытенький В. Д. Пассивная локация на основе амплитудных измерений // Изв. вузов России. Сер. Радиоэлектроника. 2011. Вып. 1. С. 69–75.

4. Мельников Ю. П., Попов С. В. Радиотехническая разведка. Методы оценки эффективности местоопределения источников излучения. М.: Радиотехника, 2008. 432 с.
5. Булычев Ю. Г., Мозоль А. А., Вернигора В. Н. Оперативный метод определения дальности при пеленговании цели с частично известными параметрами // Изв. вузов. Авиационная техника. 2010. № 1. С. 24–26.
6. 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.
7. 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.
8. Булычев Ю. Г., Ивакина С. С., Мозоль А. А., Насенков И. Г. Анализ модификации энергетического метода пассивной дальнометрии // Автометрия. 2016. 52, № 1. С. 37–44.
9. Теоретические основы радиолокации /Под ред. В. Е. Дулевича. М.: Сов. радио, 1978. 608 с.
10. Петров Б. М. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Радио и связь, 2000. 559 с.
11. Теоретические основы радиолокации /Под ред. Я. Д. Ширмана. М.: Сов. радио, 1970. 561 с.
12. Жданюк Б. Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. М.: Сов. радио, 1978. 384 с.
13. Булычев Ю. Г., Головской В. А. Обработка измерений угломерных систем в условиях априорной неопределённости в регуляризованной постановке // Радиотехника и электроника. 2010. 55, № 1. С. 71–77.

Поступила в редакцию 1 июля 2016 г.
