

УДК 621.391

КВАЗИОПТИМАЛЬНЫЙ МЕТОД МНОГОПОЗИЦИОННОЙ ПАССИВНОЙ КООРДИНАТОМЕТРИИ С УЧЕТОМ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

Ю. Г. Булычев¹, А. А. Мозоль², А. Г. Кондрашов³, А. В. Ячменев⁴,
П. Ю. Раду¹, А. С. Браславцев⁵,

¹АО «ВНИИ «Градиент», 344000, г. Ростов-на-Дону, пр. Соколова, 96

²Северо-Кавказский филиал ордена Трудового Красного Знамени ФГБОУ ВО
«Московский технический университет связи и информатики»,
344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Серафимовича, 62

³АО «Научно-производственное объединение «Квант»,
173000, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, 73

⁴Служба РЭБ ВМФ РФ,
190000, г. Санкт-Петербург, Адмиралтейский проспект, 1

⁵Краснодарское высшее военное училище,
350090, г. Краснодар, ул. Красина, 4

Статья поступила в редакцию 30 декабря 2018 г., после доработки – 30 января 2019 г.

Аннотация. В статье предложен квазиоптимальный метод определения пространственных координат движущегося источника радиоизлучения на базе многопозиционной системы по измерениям одного пеленга и относительным энергетическим (мощностным) измерениям принимаемого сигнала с учетом влияния его отражений от поверхности Земли. Задача решается для малых углов места с учетом кривизны Земли. При этом используется полиномиальная модель движения источника излучения, атмосфера считается однородной непоглощающей средой, а поверхность Земли – гладкой и однородной. Квазиоптимальность метода обуславливается выбором из многопозиционной системы такой двухпозиционной измерительной структуры, для которой наилучшим образом выполняются принятые допущения и на которую в меньшей степени оказывают влияние случайные погрешности пеленгационно-энергетических измерений. Предложенный метод может быть реализован на измерениях различной физической природы, у которых уровень измеряемого сигнала зависит от дальности.

Ключевые слова: квазиоптимальный метод, пеленгационно-энергетические измерения, интерференция, многопозиционная измерительная система,

оптимальная измерительная структура.

Abstract. The article proposes a quasi-optimal method for determining the spatial coordinates of a moving radio source based on a multi-position system based on measurements of one bearing and relative energy (power) measurements of the received signal taking into account the effect of its reflections from the Earth's surface. The problem is solved for small elevation angles, taking into account the curvature of the Earth. It uses a polynomial model of the motion of the radiation source, the atmosphere is considered to be a homogeneous non-absorbing medium, and the surface of the Earth is smooth and homogeneous. The quasi-optimality of the method is determined by the choice of a two-position measuring structure from the multi-position system, for which the accepted assumptions are best performed and which are less affected by random errors of the direction-finding measurements. The proposed method can be implemented on measurements of various physical nature, in which the level of the measured signal depends on the distance.

Key words: quasi-optimal method, direction-finding measurements, interference, multiposition measurement system, optimal measurement structure.

Введение

В последнее время особую актуальность приобрели методы пассивной локации стационарных или подвижных источников радиоизлучения (ИРИ), основанные на использовании угловых и энергетических (амплитудных, мощностных) [1-7] или только энергетических измерений [8]. Указанные методы реализуются на базе однопозиционных, двухпозиционных и многопозиционных систем пассивной локации. Основные недостатки данных методов заключаются в следующем: не учитывается движение ИРИ, либо применяется модель прямолинейного равномерного движения ИРИ с частично известными параметрами; не учитывается кривизна Земли, что не позволяет осуществлять координатометрию ИРИ, находящегося на большом удалении; отсутствует адаптивный механизм управления точностью формируемых оценок

вследствие изменения взаимного пространственного расположения ИРИ и приемных антенн системы пассивной локации.

Известно [9, 10], что для обнаружения ИРИ на малых углах места необходимо увеличивать высоту размещения приемных антенн относительно поверхности Земли. В этом случае должны учитываться интерференционные явления, обусловленные появлением прямой и отраженной радиоволны на раскрывах данных антенн. Однако указанные выше методы [1-8] пеленгационно-энергетической координатометрии ориентированы на простейший случай свободного распространения электромагнитных волн от ИРИ до приемных 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 ИРИ на малых дальностях или высоколетящих ИРИ на больших дальностях, что соответствует малым углам места. В первом случае необходимо использовать модель плоской Земли, а во втором – учитывать сферичность Земли [11]. При этом известно [12], что для малых углов места необходимо учитывать влияние Земли даже для сантиметровых и миллиметровых длин волн.

В работе [9] приведен метод пассивной локации движущегося ИРИ с учетом кривизны Земли и явления интерференции на базе двухпозиционной измерительной системы (ДИС). Для реализации указанного метода используются измерения одного пеленга и относительные энергетические (мощностные) измерения принимаемого радиосигнала с учетом влияния его отражений от поверхности Земли. Данный метод основан на допущении о равенстве высот h_1 и h_2 приемных антенн ДИС. Кроме того, для вычисления оценок координат ИРИ на интервале наблюдения $[0, T]$ предполагается равенство $R_i \approx r_i$ наклонной $R_i = R(t_i)$ ($i = \overline{0, I}$, $t_i \in [0, T]$) и горизонтальной $r_i = r(t_i)$ дальностей до ИРИ, что выполняется лишь на малых интервалах наблюдения ИРИ, находящегося на больших дальностях (т.е. для малых углов

места β), и нарушается по мере приближения ИРИ к ДИС. При этом точность оценивания наклонной дальности существенно зависит от степени выполнения допущения $h_1 \approx h_2$, а точность оценивания пространственных координат ИРИ – от степени выполнения допущения $R_i \approx r_i$. В случае реализации указанного метода на базе пассивной ДИС его недостатком является жесткое требование к степени выполнения принятого допущения $h_1 \approx h_2$, в случае реализации указанного метода на базе пассивной многопозиционной измерительной системы (МИС) – отсутствие адаптивного механизма учета степени выполнения допущения $R_i \approx r_i$ и влияния случайных погрешностей пеленгационно-энергетических измерений на точность оценивания координат ИРИ. Далее в статье будет идти речь только о пассивных ДИС и МИС.

Вследствие указанного представляется актуальной разработка квазиоптимального пеленгационно-энергетического метода пассивной координатометрии движущегося по произвольной траектории ИРИ и наблюдаемого с приемных пунктов пассивной измерительной системы под малыми углами места, который устраняет отмеченные выше недостатки известных методов [1-9]. Для учета степени выполнения допущения $R_i \approx r_i$ разрабатываемый метод должен быть ориентирован в общем случае на МИС.

Постановка задачи

Рассмотрим геометрию задачи, представленную на рис. 1.

Предположим, что в декартовой базовой системе координат (БСК), совмещенной с МИС, движется по произвольной траектории некоторый ИРИ (на рис. 1 положение ИРИ в момент времени $t_i \in [0, T]$ обозначено буквой $C_i = C(t_i)$) и наблюдается на временном интервале $[0, T]$ с приемных пунктов M_n ($n \in \{1, \dots, N\}$) под малыми углами места. Вследствие этого для любой поляризации и длины волны радиоизлучения выполняется критерий гладкости участка земной поверхности ($4\pi\sigma\psi\lambda^{-1} < 0.1$, где σ – стандартное отклонение неровностей поверхности от средней высоты поверхности; ψ – угол

скольжения в радианах относительно горизонтали (в нашем случае $\psi \approx \beta$); λ – длина волны), существенного при отражении (критерий Релея).

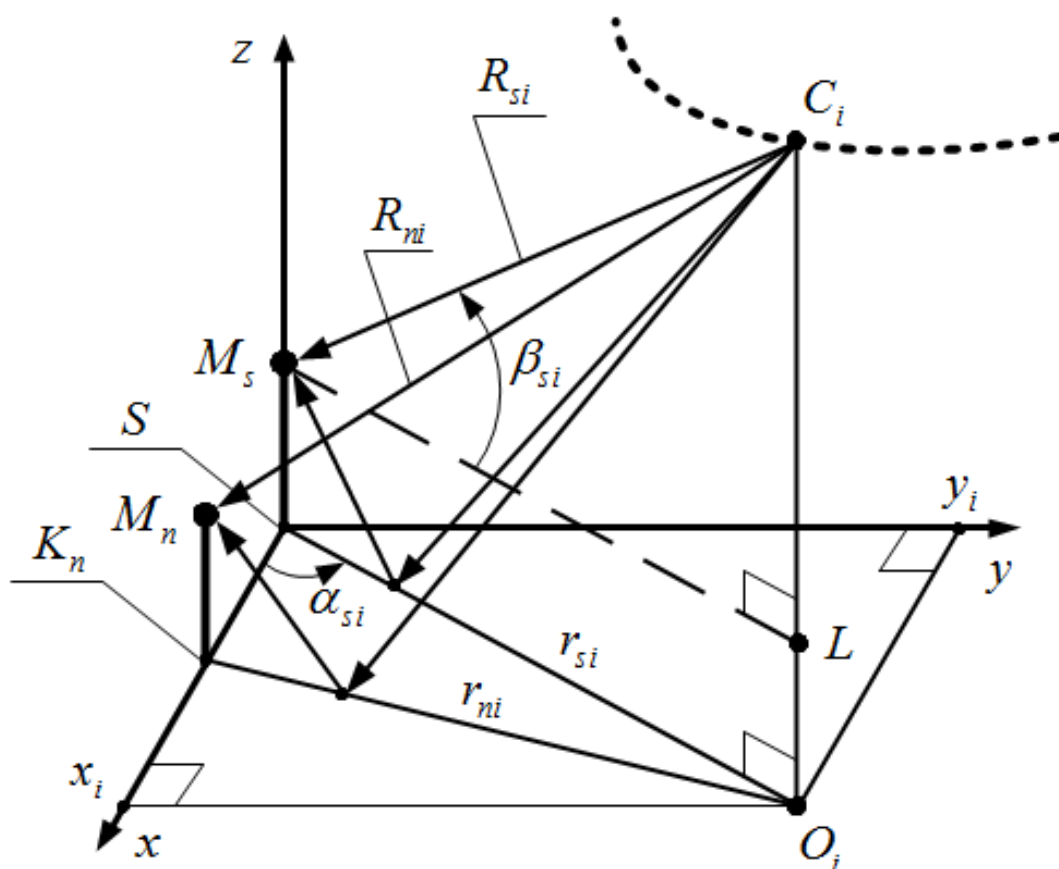


Рис. 1 – Геометрия задачи

В антеннах приемных пунктов M_n возникает интерференция прямой и отраженной компонент радиоволны [11-12]. Существенным при отражении будем считать участок в пределах первой зоны Френеля [11], ограниченный значением радиуса $r_f \approx 23h_n \lambda^{-1}$, где h_n – высота антенны приемного пункта M_n в БСК.

Наиболее полно учесть влияние среды распространения излучения можно путем определения мгновенных значений напряженности электрического поля, создаваемого сигналом ИРИ. При этом для строгого определения значений множителя влияния среды, имеющего смысл коэффициента передачи эквивалентного пространству четырехполюсника, необходимо решать

граничную задачу дифракции электромагнитного поля на неоднородном импедансном шаре (Земле), покрытом неоднородной атмосферой. Строгого решения такой задачи из-за ее сложности не получено. Поэтому в инженерных расчетах применяют модели радиотрасс с гладкой поверхностью раздела сред при усредненных по трассе постоянных параметрах среды.

Допустим, что движение ИРИ в БСК на интервале $[0, T]$ описывается полиномиальной, в общем случае, криволинейной моделью, широко используемой на практике, особенно в условиях маневра ИРИ или отсутствия информации о действующих на него силах [13]. Все вопросы, связанные с планированием и проведением эксперимента, а именно: с объемом выборки, с шагом временной сетки измерений, с учетом ошибок измерений, с выбором вида базисных функций и их количества, а также с учетом и оцениванием динамической ошибки измерений подробно изложены в [13, 14].

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

где $\boldsymbol{\eta}(t) = \boldsymbol{\eta} = [x, y, z]^T$ – вектор пространственных координат ИРИ; $\mathbf{Q}(t)$ –

матрица размером $3 \times 3(K + 1)$; $\mathbf{Q}(t) = \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^T & \mathbf{0}^T & \mathbf{0}^T \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{Q}^T & \mathbf{0}^T \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{0}^T & \mathbf{Q}^T \end{bmatrix}$;

$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}(t) = [q_k(t), k = \overline{0, K}]^T$ – вектор заданных базисных функций размером $3(K + 1)$; $\mathbf{0}$ – нулевой вектор-столбец размером $K + 1$;

$\mathbf{G} = [g_k, k = \overline{1, 3(K + 1)}]^T = [\mathbf{A}^T, \mathbf{B}^T, \mathbf{C}^T]^T$ – объединенный 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 $t_i \in [0, T]$, $i = \overline{1, I}$, (где $\{t_i\}_{i=1}^I$ – произвольная временная сетка) на приемных пунктах M_n фиксируются энергетические уровни излучения (мощность принимаемого сигнала) $p_{ni} = p_n(t_i)$. При этом полагается, что ДНА приемных пунктов M_n известны. Кроме того, на

некотором пункте M_s ($s \in \{1, \dots, N\}$) измеряются азимут $\alpha_{si} = \alpha_s(t_i)$ и угол места $\beta_{si} = \beta_s(t_i)$ наблюдаемого ИРИ (для упрощения промежуточных выкладок будем считать, что начало БСК связано с поверхностью Земли и совпадает с абсциссой и ординатой пункта M_s). При этом выполняются условия [11]: $h_n, z_i \ll R_{ni}$ и $h_n, z_i \gg \lambda$ (где $z_i = z(t_i)$ – аппликата положения ИРИ в БСК; R_{ni} – наклонная дальность от пункта M_n до ИРИ; λ – длина волны радиоизлучения), обеспечивающие адекватность предположения о том, что на существенный при отражении участок земной поверхности падает однородная локально плоская электромагнитная (радио-) волна, и применимо понятие коэффициентов отражения от однородной плоской поверхности.

Требуется для многопозиционной ПИС разработать квазиоптимальный пеленгационно-энергетический метод оценивания значений пространственных координат ИРИ $x_i = x(t_i)$, $y_i = y(t_i)$, $z_i = z(t_i)$ по результатам единичных измерений энергетического уровня излучения (мощности) $p_{ni} = p_n(t_i)$ на приемных пунктах M_n и угловых координат $\alpha_{si} = \alpha_s(t_i)$, $\beta_{si} = \beta_s(t_i)$ на пункте M_s . Квазиоптимальность метода состоит в выборе из МИС наиболее точной ДИС, для которой в данный i -й момент времени ($i = \overline{0, I}$, $t_i \in [0, T]$) наилучшим образом выполняются допущения $h_n \approx h_s$ ($n, s \in \{1, \dots, N\}$), $R_i \approx r_i$ и (или) для которой влияние случайных погрешностей измерений на точность оценивания координат ИРИ минимально по всем возможным ДИС. При этом необходимо учесть влияние подстилающей поверхности (Земли) на результаты энергетических (мощностных) измерений. Кроме того необходимо учесть зависимость степени выполнения принятых в [9] допущений $h_1 \approx h_2$ и $R_i \approx r_i$ от времени и, как следствие, динамику выбора квазиоптимальной структуры вследствие движения ИРИ, а также провести анализ условий наблюдаемости задачи пеленгационно-энергетической координатометрии на базе ДИС.

В качестве допущения примем, что атмосфера считается однородной непоглощающей средой с относительной диэлектрической проницаемостью

$\varepsilon = 1$ и удельной проводимостью среды $\sigma = 0$; поверхность Земли – гладкой и однородной.

При решении задачи примем следующее ограничение: влияние вида излучаемого ИРИ сигнала на эффективность разрабатываемого метода проводится не будет;

Решение задачи: разработка метода дальнометрии для произвольной ДИС

Для синтеза пеленгационно-энергетического метода пассивной дальнометрии на базе ДИС, входящей в состав МИС, рассмотрим произвольный четырехугольник $C_i O_i K_n M_n$ (см. рис. 1, где $C_i = (x_i, y_i, z_i)$ и $M_n = (X_n, Y_n, Z_n)$ – координаты ИРИ в момент времени $t_i \in [0, T]$ и координаты n -го приемного пункта в БСК соответственно, O_i и K_n – проекции на плоскость XOY точек C_i и M_n соответственно), из которого для момента времени $t_i \in [0, T]$ следует

$$R_{ni}^2 = R_n^2(t_i) = r_{ni}^2 + (z_i - h_n)^2, \quad (2)$$

где $R_{ni} = R_n(t_i)$ и $r_{ni} = r_n(t_i)$ – наклонная и горизонтальная дальности от ИРИ до пункта M_n ; $z_i = z(t_i)$ – аппликата ИРИ в БСК; $h_n = Z_n$ – аппликата антенны пункта M_n в БСК.

Далее в статье появление нижнего индекса i означает, что речь идет о моменте времени $t_i \in [0, T]$.

Из треугольника $O_i K_n S$ (лежащего в плоскости XOY) можно найти

$$r_{ni}^2 = r_{si}^2 + b_n^2 - 2 r_{si} b_n \cos \alpha_{si}, \quad (3)$$

где $r_{si} = r_s(t_i)$ – горизонтальная дальность от ИРИ до пункта M_s ; b_n – известная величина базы ДИС $M_s M_n$, $b_n = \sqrt{X_n^2 + Y_n^2}$.

Из треугольника $C_i L M_s$, при выполнении условий $h_s \approx h_n$ или $h_s, h_n \ll z_i$, для второго слагаемого в формуле (2) следует

$$(z_i - h_n)^2 \approx (z_i - h_s)^2 = R_{si}^2 \sin^2 \beta_{si}, \quad (4)$$

где h_s – аппликата пункта M_s в БСК; $R_{si} = R_s(t_i)$ – наклонная дальность для пункта M_s .

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

$$R_{ni}^2 \approx r_{si}^2 + b_n^2 - 2 r_{si} b_n \cos \alpha_{si} + R_{si}^2 \sin^2 \beta_{si}. \quad (5)$$

Из треугольника C_iLM_s следует соотношение $r_{si}^2 = R_{si}^2 \cos^2 \beta_{si}$. Учитывая, что $\cos^2 \beta_{si} = 1 - \sin^2 \beta_{si}$ и $\sin^2 \beta_{si} \approx \beta_{si}^2$ (для нашей постановки задачи), можно записать

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

С учетом (6) и допуская, что $(1 + \beta_{si}^2) \approx 1$, выражение (5) примет вид

$$R_{ni}^2 \approx R_{si}^2 - 2 R_{si} b_n \cos \alpha_{si} + b_n^2. \quad (7)$$

Известно [4], что результирующая мощность радиосигнала на входе приемного устройства определяется регулярной и случайной составляющими. Регулярная составляющая соответствует прямому и зеркально-отраженному радиосигналам, а случайная – диффузному отражению (рассеянию). Вследствие того, что по условию задачи (для малых углов места, под которыми наблюдается ИРИ) выполняется критерий гладкости участка земной поверхности, диффузным рассеянием можно пренебречь. Ввиду этого указанная мощность описывается выражением [4]

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

где P – мощность радиоизлучения; G_n и $G_i^* = G^*(t_i)$ – коэффициенты усиления (КУ) антенн пункта M_n и ИРИ соответственно; χ – коэффициент потерь; $\Phi_i = \Phi(t_i)$ – интерференционный множитель (множитель влияния Земли), учитывающий влияние отраженного от Земли радиосигнала. Для малых углов места (когда выполняется условие $2\pi \lambda^{-1} h_n \sin \beta_{ni} < \pi/9$) и в случае слабонаправленных антенн справедлива формула [11]

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

Далее, вводя относительные энергетические коэффициенты $q_{nsi} = p_{ni}^{1/2} p_{si}^{-1/2}$, $q_{sni} = p_{si}^{1/2} p_{ni}^{-1/2}$ и допуская выполнение условий $h_n \approx h_s$ и $G_n \approx G_s$, с учетом (6), (8), (9) получим

$$R_{ni}^2 = q_{sni} R_{si}^2. \quad (10)$$

В выражении (10) зависимость параметра q_{si} от второй степени дальности объясняется тем, что электромагнитное поле, создаваемое ИРИ и распространяющееся в горизонтальном направлении к пунктам M_n и M_s , компенсируется за счет интерференционных явлений полем зеркального ИРИ, у которого ток в антенне почти равен по амплитуде току в антенне истинного ИРИ, а по фазе – противоположен [11].

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

$$q_{sni} R_{si}^2 \approx R_{si}^2 - 2 R_{si} b_n \cos \alpha_{si} + b_n^2. \quad (11)$$

Преобразуя (11), получим приведенное квадратное уравнение относительно R_{si} вида $R_{si}^2 + R_{si} \mu_i + \eta_i \approx 0$, где $\mu_{ni} = -2b_n \cos \alpha_{si} (1 - q_{sni})^{-1}$ и $\eta_{nsi} = b_n^2 (1 - q_{si})^{-1}$. Решая уравнение, находим нужный корень

$$R_{si} = b_n \left[\cos \alpha_{si} + \left(q_{sni} - \sin^2 \alpha_{si} \right)^{1/2} \right] (1 - q_{sni})^{-1}. \quad (12)$$

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

По аналогии с (12) можно записать выражение для наклонной дальности

$$R_{ni} = b_n \left[\cos \alpha_{ni} + \left(q_{nsi} - \sin^2 \alpha_{ni} \right)^{1/2} \right] (1 - q_{nsi})^{-1}, \quad n \in \{1, \dots, N\}, \quad (13)$$

где α_{ni} – азимут ИРИ, измеренный с пункта M_n .

Выражение (13) позволяет определять наклонную дальность от ИРИ до пункта M_n в момент времени t_i по известным значениям базы (b_n) между пунктами M_s и M_n , азимута (α_{ni}), полученного с пункта M_n , и относительного энергетического коэффициента (q_{nsi}), характеризующего уровень радиоизлучения, регистрируемого на указанных приемных пунктах.

Решение задачи координатометрии для произвольной ДИС

Аналогично [9], по найденной дальности R_{ni} , известным пеленгам α_{ni}, β_{ni} и в предположении $r_{ni} \approx R_{ni}$, можно оценить пространственные координаты ИРИ в БСК следующим образом:

$$\begin{cases} x_i = X_n + R_{ni} \cos \alpha_{ni} = X_n + b_n \left[\cos \alpha_{ni} + (q_{nsi} - \sin^2 \alpha_{ni})^{1/2} \right] (1 - q_{nsi})^{-1} \cos \alpha_{ni}, \\ y_i = Y_n + R_{ni} \sin \alpha_{ni} = Y_n + b_n \left[\cos \alpha_{ni} + (q_{nsi} - \sin^2 \alpha_{ni})^{1/2} \right] (1 - q_{nsi})^{-1} \sin \alpha_{ni}, \\ z_i = Z_n + R_{ni} \sin \beta_{ni} = Z_n + b_n \left[\cos \alpha_{ni} + (q_{nsi} - \sin^2 \alpha_{ni})^{1/2} \right] (1 - q_{nsi})^{-1} \sin \beta_{ni}. \end{cases} \quad (14)$$

Для второй модели радиотрассы, учитывающей сферичность Земли (когда $0.2R'_{ni} < R_{ni} < 0.8R'_{ni}$) [11], высота ИРИ над поверхностью Земли вычисляется по формуле [12]

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

где $R'_{ni} = \left[(R_e + z_i)^2 - R_e^2 \right]^{1/2} + \left[(R_e + Z_n)^2 - R_e^2 \right]^{1/2}$ – расстояние прямой видимости между пунктом M_n и положением ИРИ в БСК; R_e – радиус Земли.

Формулы (2)-(15) составляют математическую основу развиваемого метода оценивания местоположения ИРИ по единичным (соответствующим одному моменту времени) пеленгационно-энергетическим (пеленгационно-мощностным) измерениям.

Предложенный в статье метод использует относительные значения уровня мощности принимаемого сигнала и может быть реализован на измерениях различной физической природы (например, на радиоизмерениях, на фотооптических измерениях и т.д.) при соблюдении одного требования – зависимости уровня измеряемого сигнала от дальности (например, огибающей радиосигнала). В случае радиоизмерений такое требование не является жестким и выполняется для сигналов с частотной и фазовой модуляцией (например, для ЛЧМ-сигнала, используемого в бортовых радиолокационных станциях). При

этом возможны различные варианты радиоконтакта бортовой и наземной радиолокационных станций. В этом случае можно использовать гипотезно-кластерный подход к селекции радиоконтактов, изложенный авторами в [15].

Выбор оптимальной измерительной структуры

Рассмотрим далее механизм выбора оптимальной ДИС \mathfrak{S}_i^{opt} из МИС, т.е. такой ДИС, для которой в момент времени t_i выполняется следующее условие:

$$\mathfrak{S}_i^{opt} \rightarrow \min_{h_n, h_s, R_{ni}, r_{ni}, \alpha_{ni}, \beta_{ni}, q_{ni}} \left\{ \sqrt{(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2 + (z_i - \hat{z}_i)^2} \right\}, \quad (16)$$

где $\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i$ – оценки текущих координат x_i, y_i, z_i ИРИ.

Минимизация невязки (16) за счет соблюдения допущений $h_n \approx h_s$ ($n, s \in \{1, \dots, N\}$) и $R_{ni} \approx r_{ni}$ ($\sin \beta_i \approx \beta_i, i = \overline{0, I}$) обеспечивается из условия

$$\mathfrak{S}_i^{opt_1} \rightarrow \min_{h_n, h_s, R_{ni}, r_{ni}} \left[\frac{|h_n - h_s|}{\max\{h_n, h_s\}} + \frac{|R_{ni} - r_{ni}|}{\max\{R_{ni}, r_{ni}\}} \right], \quad (17)$$

где $|\cdot|$ – знак модуля, а с учетом случайных погрешностей $\Delta\alpha_{ni}, \Delta\beta_{ni}, \Delta q_{ni}$ измерений параметров $\alpha_{ni}, \beta_{ni}, q_{ni}$, соответственно, из условия

$$\mathfrak{S}_i^{opt_2} \rightarrow \min_{\alpha_{ni}, \beta_{ni}, q_{ni}} \left\{ \sqrt{\sigma_{x_i}^2 + \sigma_{y_i}^2 + \sigma_{z_i}^2} \right\}, \quad (18)$$

где $\sigma_{x_i}^2, \sigma_{y_i}^2, \sigma_{z_i}^2$ – дисперсии оценок $\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i$ координат ИРИ x_i, y_i, z_i соответственно.

Обобщенный критерий оптимальности, учитывающий влияние случайных погрешностей пеленгационно-энергетических измерений на точность оценивания координат ИРИ и влияние степени выполнения допущений $h_s \approx h_n, R_{ni} \approx r_{ni}$ на точность оценивания координат ИРИ, может быть представлен выражением

$$\mathfrak{S}_i^{opt} \rightarrow \Phi \left[\mathfrak{S}_i^{opt_1}, \mathfrak{S}_i^{opt_2} \right], \quad (19)$$

где Φ – обобщенный оператор, определяющий порядок комбинации параметров $\mathfrak{Z}_i^{opt_1}$ и $\mathfrak{Z}_i^{opt_2}$ в зависимости от требований к характеристикам решения задачи (когда требуется минимизировать влияние случайных погрешностей измерений приоритетным следует считать параметр $\mathfrak{Z}_i^{opt_2}$).

Для вычисления значений дисперсий $\sigma_{x_i}^2, \sigma_{y_i}^2, \sigma_{z_i}^2$ введем 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 общем виде

$$v_{il} = f_l(\gamma_{ni}), \quad l = \overline{1,3}, \quad (20)$$

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

Применяя к выражению (20) известный принцип линеаризации (по аналогии с [7]), получим в общем виде выражение для дисперсии ошибок оценивания местоположения ИРИ на базе формулы (14):

$$\sigma_{v_{il}}^2 \approx \sum_{j=1}^3 \left(\frac{\partial f_l}{\partial \gamma_{nij}} \Big|_{\mathbf{m}_{\gamma_{ni}}} \right)^2 \sigma_{\gamma_{nij}}^2 + 2 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1, k \neq j}^3 \left(\frac{\partial f_l}{\partial \gamma_{nij}} \Big|_{\mathbf{m}_{\gamma_{ni}}} \right) \left(\frac{\partial f_l}{\partial \gamma_{nik}} \Big|_{\mathbf{m}_{\gamma_{ni}}} \right) \mathbf{K}_{\gamma_{ni}}, \quad (21)$$

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

Примем допущение о том, что ошибки измерений параметров α_{ni}, β_{ni} и q_{ni} являются некоррелированными случайными величинами с нулевыми математическими ожиданиями и соответствующими дисперсиями $\sigma_{\alpha_n}^2, \sigma_{\beta_n}^2$ и $\sigma_{q_n}^2$, т.е. матрица $\mathbf{K}_{\gamma_{ni}}$ является диагональной. Тогда выражение (21) применительно к (14) будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{x_i}^2 &= 0.25b_n^2 (q_{nsi} - 1)^{-2} \Omega_{ni}^{-1} \left[\left(0.5 \sin 4\alpha_{ni} + \sin 2\alpha_{ni} \left(q_{nsi} + \Omega_{ni}^{1/2} \cos \alpha_{ni} \right) \right)^2 \cos^{-2} \alpha_{ni} \sigma_{\alpha_n}^2 + \right. \\ &\quad \left. + \left(\cos \alpha_{ni} \left(q_{nsi} - 2 \sin^2 \alpha_{ni} + 1 + 2\Omega_{ni}^{1/2} \cos \alpha_{ni} \right) \right)^2 (q_{nsi} - 1)^{-2} \sigma_{q_n}^2 \right], \\ \sigma_{y_i}^2 &= b_n^2 (1 - q_{nsi})^{-2} \Omega_{ni}^{-1} \left[\left(\Omega_{ni}^{1/2} \cos 2\alpha_{ni} + q_{nsi} \cos \alpha_{ni} - \sin \alpha_{ni} \sin 2\alpha_{ni} \right)^2 \sigma_{\alpha_n}^2 + \right. \\ &\quad \left. + \left(\Omega_{ni}^{1/2} \sin 2\alpha_{ni} + \sin 2\alpha_{ni} \left(1 + q_{nsi} - 2 \sin^2 \alpha_{ni} \right) \right)^2 0.25(1 - q_{nsi})^{-2} \sigma_{q_n}^2 \right], \\ \sigma_{z_i}^2 &= b_n^2 (1 - q_{nsi})^{-2} \left[\left(0.5\Omega_{ni}^{-1/2} \sin \beta_{ni} \left(2\Omega_{ni}^{1/2} \sin \alpha_{ni} + \sin 2\alpha_{ni} \right) \right)^2 \sigma_{\alpha_n}^2 + \right. \\ &\quad \left. + \left(\cos \beta_{ni} \left(\cos \alpha_{ni} + \Omega_{ni}^{1/2} \right) \right)^2 \sigma_{\beta_n}^2 + \right. \\ &\quad \left. + \left(\sin \beta_{ni} \left(2\Omega_{ni}^{1/2} \cos \alpha_{ni} + 1 + q_{nsi} - 2 \sin^2 \alpha_{ni} \right) \right)^2 0.25(1 - q_{nsi})^{-2} \Omega_{ni}^{-1} \sigma_{q_n}^2 \right], \end{aligned} \right. \quad (22)$$

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

Выражение (22) позволяет в первом приближении оценить степень влияния случайных погрешностей пеленгационно-мощностных измерений (параметров α_{ni} , β_{ni} и q_{nsi}) на точность вычисления координат ИРИ. В этом выражении дисперсии оценок координат являются функциями от результатов пеленгационно-мощностных измерений, от значения базы между двумя измерительными пунктами многопозиционной системы и от инструментальных погрешностей измерительных средств. Это позволяет выбрать после проведения пеленгационно-энергетических измерений наиболее точную ДИС (наименее чувствительную к влиянию случайных погрешностей измерений) в соответствии с правилом (18).

Следует отметить, что оптимальная структура $\mathfrak{Z}_i^{opt} = \mathfrak{Z}^{opt}(t_i)$ для момента времени $t_i \in [0, T]$ определяется по пеленгационно-энергетическим измерениям α_{ni} , β_{ni} , q_{nsi} , значениям дисперсий $\sigma_{\alpha_n}^2$, $\sigma_{\beta_n}^2$, $\sigma_{q_n}^2$ и исходным данным относительно координат измерительных пунктов МИС $(h_s, h_n, b_n$ ($s, n \in \{1, \dots, N\}$, $s \neq n$)). Далее для всего интервала наблюдения $[0, T]$

необходимо решить задачу аппроксимации значений $\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i$. Для этого можно использовать широко используемый метод наименьших квадратов [13].

Наблюдаемость задачи пассивной локации

Вопрос наблюдаемости задачи пассивной локации в рамках развиваемого метода решается на базе формулы (13). Из данной формулы следует, что для обеспечения наблюдаемости необходимо выполнение системы условий

$$\begin{cases} p_{ni}^{1/2} p_{si}^{-1/2} - \sin^2 \alpha_{ni} \geq 0, \\ 1 - p_{ni}^{1/2} p_{si}^{-1/2} \neq 0, \\ p_{ni} p_{si}^{-1} \geq 0, \\ p_{si} \neq 0, \end{cases} \quad n, s \in \{1, \dots, N\}, n \neq s. \quad (23)$$

Первое условие системы (23) накладывает ограничения на геометрию задачи и другие факторы, связанные с отражением радиоизлучения от Земли. При этом необходимо, чтобы для регистрируемого уровня мощности p_{ni} выполнялось условие $p_{ni} \neq 0$. Второе условие выполняется, когда $p_{ni} \neq p_{si}$. С учетом влияния Земли на интенсивность отраженных компонент радиоизлучения и недостижимую на практике идентичность условий отражения, можно считать, что второе условие почти всегда выполнимо. Третье и четвертое условия выполняются для $p_{si} \neq 0$, т.е. система условий (23) выполняется всегда при наличии ненулевых результатов энергетических (мощностных) измерений.

Заключение

Таким образом, в развитие альтернативных методов пассивной локации в статье предлагается квазиоптимальный метод многопозиционной координатометрии ИРИ с учетом явления интерференции и в предположении, что движение ИРИ описывается полиномиальной моделью с неизвестными коэффициентами. Предлагаемый метод может быть легко внедрен в любую радио- или фотооптическую многопозиционную систему, измеряющую угловые координаты ИРИ и снабженную измерителем мощности принимаемого сигнала. Новизна метода состоит в том, что он позволяет выбирать из

многопозиционной системы такую двухпозиционную измерительную структуру, для которой наилучшим образом выполняются принятые допущения и на которую в меньшей степени оказывают влияние случайные погрешности измерений пеленгационно-энергетических параметров. Оптимальная в смысле предложенного критерия ДИС позволяет, в свою очередь, по двум энергетическим (мощностным) измерениям и одному пеленгу оценивать пространственные координаты ИРИ без привлечения информации о частично известных параметрах движения (например, о величине скорости для модели равномерного прямолинейного движения ИРИ), учитывать влияние Земли на результаты измерений и ее кривизну.

Литература

1. 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.
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 // Известия ВУЗов России. Радиоэлектроника. 2011. № 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 учетом 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. Булычев Ю.Г., Мозоль А.А. Пеленгационно-энергетический метод координатометрии с учётом кривизны Земли и явления интерференции // Автометрия. 2017. № 1. С. 43–52.
10. Коростелев А.А., Ключев Н.Ф., Мельник Ю.А. и др. Теоретические основы радиолокации / под ред. В.Е. Дулевича. 2-е изд. М.: Сов. радио, 1978. 608 с.
11. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн: учебник для вузов. М.: Радио и связь, 2000. 559 с.
12. Теоретические основы радиолокации / под ред. Я. Ширмана. М.: Сов. радио, 1970. 561 с.
13. Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. М.: Сов. радио, 1978. 384 с.
14. Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Сов. радио, 1974. 432 с.
15. Ю. Г. Булычев, А. А. Мозоль, А. Г. Кондрашов, А. В. Ячменев, А. С. Жук. Энергетический метод квазиоптимальной однопозиционной локации и навигации движущегося источника излучения с учетом априорной информации. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec18/15/text.pdf>.

Для цитирования:

Ю. Г. Булычев, А. А. Мозоль, А. Г. Кондрашов, А. В. Ячменев, П. Ю. Раду, А. С. Браславцев. Квазиоптимальный метод многопозиционной пассивной координатометрии с учетом интерференции. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb19/2/text.pdf>
 DOI 10.30898/1684-1719.2019.2.2