УДК 621.391.1

АМПЛИТУДНО-ГИПЕРБОЛИЧЕСКИЙ МЕТОД ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ

Ю. Г. Булычев[1], И. Г. Насенков[2], А. В. Ячменёв

[1]*АО «Всероссийский научно-исследовательский институт "Градиент"»,*
344000, г. Ростов-на-Дону, просп. Соколова, 96
[2]*АО «Технодинамика»,*
105318, Москва, ул. Ибрагимова, 29/31А
E-mail: ProfBulychev@yandex.ru

Применительно к двухпозиционной системе, регистрирующей амплитуду и разность моментов времени прихода волны на приёмные позиции, предлагается новый метод определения дальности и местоположения источника излучения. Приводятся формулы, позволяющие исследовать методическую погрешность и точностные характеристики метода для различных условий наблюдения и результаты вычислительного эксперимента. Даны рекомендации по применению метода.

Ключевые слова: угломерно-энергетический метод, энергетический метод, амплитудно-гиперболический метод, двухпозиционная амплитудно-гиперболическая система, амплитуда волны, временна́я задержка волны.

DOI: 10.15372/AUT20180406

Введение. Автономность, экономичность и надёжность, а также ряд других свойств заставляют исследователей постоянно заниматься проблемами совершенствования существующих и разработкой принципиально новых однопозиционных, двухпозиционных и многопозиционных систем пассивной локации [1–12]. В последние годы для таких систем стали развиваться альтернативные методы определения дальности и местоположения источника излучения (ИИ), ориентированные на минимальное число приёмных позиций (в частности, одно- и двухпозиционные системы). К ним можно отнести энергетические методы (ЭМ) [4, 5, 7, 9] и угломерно-энергетические методы (УЭМ) [6, 8, 10], которые учитывают возможность использования дополнительной измерительной информации в виде уровня (амплитуды) принимаемой волны (сейсмической, акустической или электромагнитной). Актуальность данного направления обусловлена возросшим качеством амплитудных измерений и способов их обработки.

К недостаткам известного интерференционного ЭМ (для однопозиционного варианта [4]) можно отнести сложность формирования стабильной интерференционной кривой и выделения её точек экстремума в условиях двухлучевого распространения волны, а также необходимость применения модели прямолинейного равномерного движения ИИ с известной величиной скорости. Кроме того, указанный ЭМ ограничивается лишь решением задачи определения дальности.

Другой ЭМ [5], получивший название радиально-базового, ориентирован на двух-, трёх- и четырёхпозиционный варианты. В первом случае использование амплитудных измерений позволяет определить только дальность до ИИ, а во втором и третьем — как дальность, так и местоположение. Однако введение третьей и тем более четвёртой приёмных позиций приводит к существенным технико-экономическим затратам. Кроме того, как показывает опыт, оперируя только амплитудами волны, нельзя достичь приемлемой точности расчётов.

К основному недостатку УЭМ (для однопозиционного [6, 8] и двухпозиционного [10] вариантов) можно отнести необходимость использования громоздких и дорогостоящих направленных антенн (датчиков) с узкими лучами, обеспечивающими требуемые законы сканирования пространства и высокую точность пеленгования ИИ. При однопозиционном варианте также применяется предположение о прямолинейном равномерном движении ИИ с известной величиной скорости.

Далее нами развивается амплитудно-гиперболический метод (АГМ) пассивной локации ИИ применительно к двухпозиционной амплитудно-гиперболической системе (ДАГС), регистрирующей два параметра: амплитуды и разность моментов времени прихода волны (сейсмической, акустической или электромагнитной) на приёмные позиции. Показано, что АГМ позволяет устранить отмеченные выше недостатки ЭМ и УЭМ, при этом ориентирован не только на определение дальности, но и на решение задачи определения местоположения ИИ.

Постановка задачи. Рассмотрим ДАГС, состоящую из идентичных (по техническим характеристикам) приёмных позиций (Π_1 и Π_2), осуществляющих наблюдение за ИИ. Если антенны (датчики), применяемые на позициях, являются направленными, то полагаем, что их главные лучи ориентированы на ИИ. Введём прямоугольную декартову систему координат xOy, в которой позиции Π_1 и Π_2 имеют координаты $(-D/2, 0)$ и $(0, D/2)$ соответственно (D — база ДАГС), а ИИ — координаты (x, y). На Π_1 и Π_2 измеряются временна́я задержка волны (τ) и её амплитуды (E_1 и E_2). Не ограничивая общности, будем считать, что ошибки измерений $\Delta\tau$ и ΔE_i (где $i \in \{1, 2\}$) являются независимыми нормально распределёнными случайными величинами с нулевым математическим ожиданием и соответствующими дисперсиями σ_τ^2 и $\sigma_{E_1}^2 = \sigma_{E_2}^2 = \sigma_E^2$. Положение ИИ по отношению к Π_1 и Π_2 характеризуется дальностями R_1 и R_2, а по отношению к началу координат — дальностью $R = [2^{-1}(R_1^2 + R_2^2) - (2^{-1}D)^2]^{1/2}$ и углом $\varphi \in [0, \pi]$, отсчитываемым от положительного направления оси Ox.

Для представления E_1 и E_2 воспользуемся известным соотношением [1] $E_i = \mu_i/R_i$, $i \in \{1, 2\}$, где μ_i — константа, характеризующая условия контакта пары ИИ—Π_i. Полагаем, что выполняется условие стационарности (по аналогии с [5, 6]): $\mu_1 = \mu_2 = \mu$. Очевидно, что данное условие осуществляется с той или иной степенью точности в зависимости от того, где находится ИИ по отношению к ДАГС. Так, если ИИ располагается на базовой линии или вблизи неё, то условие стационарности принципиально выполняется. При отклонении от этой линии может возникнуть некоторая невязка $|\Delta_\mu| = |\mu_1 - \mu_2| \leq \varepsilon_\mu$, где $\varepsilon_\mu > 0$ — константа, устанавливающая допустимый уровень методической погрешности. Следует заметить, что условие $\mu_1 \approx \mu_2$ будет также справедливо при $R/D \gg 1$ для любых направлений на ИИ.

Предлагаемый в данной работе метод назовём амплитудно-гиперболическим, поскольку задержке τ соответствуют две ветви гиперболы [2]. Решение сформулированных во введении задач даётся для верхней полуплоскости системы координат xOy. Для того чтобы определить квадрант верхней полуплоскости, где находится ИИ, достаточно проверить выполнение условий: если $\tau > 0$, то ИИ находится в правом квадранте, если $\tau < 0$, то — в левом, если $\tau = 0$, то — на оси Oy. По аналогии можно также воспользоваться проверкой выполнения условий $E_1 < E_2$ (для правого квадранта), $E_1 > E_2$ (для левого квадранта) и $E_1 = E_2$ (для оси Oy).

Решение задачи определения дальности. Измеряемый параметр $\tau = c^{-1}(R_1 - R_2) = c^{-1}\Delta_R$, где $\Delta_R = R_1 - R_2 \in [-D, D]$, $\tau \in [-D/c, D/c]$, c — скорость света. С учётом этого

$$\tau = c^{-1}(R_1 - E_1 R_1/E_2) = c^{-1} R_1 (E_2 - E_1)/E_2. \tag{1}$$

Непосредственно из (1) вытекает формула для определения дальности:

$$R_1 = \tau c \frac{E_2}{(E_2 - E_1)} = \Delta_R \frac{E_2}{(E_2 - E_1)} = \frac{\Delta_R Q}{Q - 1}. \quad (2)$$

Здесь $Q = E_2/E_1 > 0$, при этом $Q > 1$ для правого квадранта и $Q < 1$ для левого, $Q = 1$ для оси Oy.

По аналогии с (1) и (2) имеем

$$R_2 = \tau c \frac{E_1}{(E_2 - E_1)} = \Delta_R \frac{E_1}{(E_2 - E_1)} = \frac{\Delta_R}{Q - 1}. \quad (3)$$

Если отсчитывать дальность от центра базы ДАГС, то

$$R = \frac{1}{\sqrt{2}} \Big[\Delta_R^2 \frac{(Q^2 + 1)}{(Q - 1)^2} - \frac{D^2}{2} \Big]^{1/2}. \quad (4)$$

Формулы (2)–(4) дают решение задачи определения дальности в рамках АГМ. Из них видно, что в случае нахождения ИИ на прямой, перпендикулярной центру базы, возникает неопределённость типа 0/0, поскольку $\tau \to 0$, $\Delta_R \to 0$ и $|E_2 - E_1| \to 0$. Если раскрыть эту неопределённость, то получим верный результат (по отношению к задаче определения дальности), однако применение этих формул для такого случая на практике (с учётом погрешностей измерений) может привести к недопустимо большим ошибкам в определении дальности до ИИ. Таким образом, для предлагаемого АГМ есть некоторые ограничения условий наблюдения. Забегая вперёд, отметим, что наиболее благоприятная геометрия задачи соответствует случаю, когда ИИ находится вблизи базовой линии, например эта линия представляет собой взлётно-посадочную полосу.

Из анализа формул (2)–(4) следует одно важное свойство АГМ: любое пропорциональное изменение амплитуды принимаемых волн (λE_1 и λE_2, где $\lambda > 0$ — произвольный множитель) не влияет на результаты расчёта дальностей R_1, R_2 и R. Данное свойство инвариантности необходимо в случаях, когда параметры линии контакта ИИ — ДАГС меняются случайным образом и задача определения дальности решается в условиях априорной неопределённости.

Решение задачи определения местоположения источника излучения. Для нахождения координаты x воспользуемся теоремой косинусов $R_2^2 = R_1^2 + D^2 - 2R_1 D \cos\alpha_1$, где α_1 — угол между направлением на ИИ (относительно Π_1) и положительным направлением оси Ox. Выразим отсюда величину $\cos\alpha_1$ и подставим её в формулу $x = R_1 \cos\alpha_1 - D/2$. В итоге получим

$$x = \frac{(c\tau)^2}{2D} \Big(\frac{E_1 + E_2}{E_2 - E_1} \Big) = \frac{(c\tau)^2}{2D} \Big(\frac{1 + Q}{Q - 1} \Big). \quad (5)$$

В частном случае ($\Delta_R = D = c\tau$) имеем $x = (D/2)(1 + Q)/(Q - 1)$.

Анализ (5) показывает, что при $0 \le \varphi < \pi/2$ выполняется условие $E_2 > E_1$ и, следовательно, $x > 0$. Соответственно при $\pi/2 < \varphi \le \pi$ имеем $E_1 > E_2$ и $x < 0$. Для случая $\varphi = \pi/2$ (точка $(x = 0, y = 0)$ исключается из рассмотрения), когда $E_1 = E_2$, также возникает устранимая неопределённость типа 0/0, что не позволяет использовать формулу (5) при нахождении ИИ на оси Oy или в некоторой её окрестности.

Применительно к верхней полуплоскости для определения координаты y воспользуемся очевидными соотношениями, вытекающими из геометрии задачи:

$$y = R_1 \sin\alpha_1 = R_1 (1 - \cos^2\alpha_1)^{1/2}, \quad \cos^2\alpha_1 = (2R_1 D)^{-2} (R_1^2 - R_2^2 + D^2)^2 \le 1.$$

Отсюда

$$y = R_1[1 - (2R_1D)^{-2}(R_1^2 - R_2^2 + D^2)^2]^{1/2}, \quad y \geq 0, \tag{6}$$

где R_1 и R_2 рассчитываются по формулам (2) и (3) соответственно. Из (6) следует, что для $\varphi = \pi/2$ ($\tau = 0$) также возникает указанная выше некорректность.

Таким образом, формулы (5) и (6) дают решение задачи определения местоположения ИИ в рамках АГМ, при этом для расчётов необходимо знать величину базы D, временну́ю задержку волны τ, скорость света c и амплитуды волны E_1 и E_2 с точностью до произвольного множителя λ.

Кривые положения и их параметры. Будем рассматривать только правый квадрант верхней полуплоскости. Обобщение полученных результатов на всю плоскость xOy осуществляется по принципу зеркального отображения относительно осей Ox и Oy.

Измеряемой временно́й задержке τ соответствует кривая положения ИИ в виде гиперболы (г) [2]:

$$\tau = c^{-1}\{[(x + D/2)^2 + y^2]^{1/2} - [(x - D/2)^2 + y^2]^{1/2}\}.$$

Вершина гиперболы есть точка с координатами ($x_{\text{г}}, y_{\text{г}} = 0$), где $x_{\text{г}} = c\tau/2$. При этом $x_{\text{г}} \to 0$, когда $\tau \to 0$ (т. е. $R_1 \to R_2$), и $x_{\text{г}} \to D/2$, когда $\varphi \to 0$ (т. е. $R_1 - R_2 \to D$).

Покажем, что кривой положения ИИ, соответствующей амплитудам E_1 и E_2, отвечает некоторая окружность. С учётом $R_1 = QR_2$, $R_1 = [(x + D/2)^2 + y^2]^{1/2}$ и $R_2 = [(x - D/2)^2 + y^2]^{1/2}$ запишем уравнение $(x + D/2)^2 + y^2 = [(x - D/2)^2 + y^2]Q^2$, которое можно привести к виду

$$y^2 + x^2 - Ax + C = 0, \tag{7}$$

где $A = D(Q^2 + 1)(Q^2 - 1)$, $Q > 1$; $C = D^2/4$. Путём несложных, но громоздких преобразований показано, что кривая (7) есть окружность (окр) с центром в точке ($x_{\text{окр}} = A/2$, $y_{\text{окр}} = 0$) и радиусом $R_{\text{окр}} = 2^{-1}\sqrt{A^2 - D^2} = DQ/(Q^2 - 1)$. Левая точка пересечения окружности с осью Ox (первый корень) имеет координату $x'_{\text{окр}} = 2^{-1}D|(Q - 1)/(Q + 1)|$, а правая (второй корень) — $x''_{\text{окр}} = 2^{-1}D|(Q + 1)/(Q - 1)|$. Во всех случаях $x'_{\text{окр}} < D/2$ и $x''_{\text{окр}} > D/2$, кроме того, $x'_{\text{окр}} < x_{\text{г}}$, т. е. первый корень окружности находится между началом координат и вершиной гиперболы, а второй — справа от вершины. Это означает, что окружность и гипербола, соответствующие временно́й задержке и амплитудным измерениям, для любой геометрии задачи (кроме указанного ранее некорректного случая) имеют общую и единственную точку пересечения с координатами (x, y), характеризующими местоположение ИИ (см. (5) и (6)).

Дисперсии ошибок расчётов. По аналогии с [8–10] для определения ошибок расчётов, обусловленных наличием случайных погрешностей измерений, воспользуемся широко распространённым на практике принципом линеаризации [13]. Найдём квадраты частных производных:

$$(\partial R_1/\partial\tau)^2 = (cE_2)^2/(E_2 - E_1)^2,$$

$$(\partial R_1/E_1)^2 = (c\tau E_2)^2/(E_2 - E_1)^4, \quad (\partial R_1/\partial E_2)^2 = (c\tau E_1)^2/(E_2 - E_1)^4.$$

Следует отметить, что данные производные вычисляются из математических ожиданий соответствующих случайных величин. Используя эти результаты, можно найти дисперсии ошибок вычисления первой дальности R_1:

$$\sigma_{R_1}^2 = \frac{c^2}{(E_2 - E_1)^2}\Big[E_2^2\sigma_\tau^2 + \frac{\tau^2\sigma_E^2}{(E_2 - E_1)^2}(E_1^2 + E_2^2)\Big], \tag{8}$$

и второй дальности R_2:

$$\sigma^2_{R_2} = \frac{c^2}{(E_2 - E_1)^2}\Big[E_1^2\sigma^2_\tau + \frac{\tau^2\sigma^2_E}{(E_2 - E_1)^2}\,(E_1^2 + E_2^2)\Big]. \tag{9}$$

Анализ формул (8) и (9) показывает, что при любых фиксированных значениях D и R наблюдается монотонное уменьшение значений дисперсий $\sigma^2_{R_1}$ и $\sigma^2_{R_2}$ с изменением угла φ от $\pi/2$ до 0. Минимальное значение этих величин достигается при $\varphi = 0$, когда ИИ находится на базовой линии. Кроме того, с ростом базового размера D также наблюдается уменьшение дисперсий $\sigma^2_{R_1}$ и $\sigma^2_{R_2}$, что связано с увеличением значения знаменателя $(E_2 - E_1)^2$ в формулах (8) и (9).

Используя принцип линеаризации, находим дисперсии ошибок вычисления координат местоположения ИИ:

$$\sigma^2_x = \Big(\frac{\tau c^2}{D}\Big)^2\Big\{\Big(\frac{E_1 + E_2}{E_2 - E_1}\Big)^2\sigma^2_\tau + \tau^2\Big[\frac{E_1^2 + E_2^2}{(E_2 - E_1)^4}\Big]\sigma^2_E\Big\}, \tag{10}$$

$$\sigma^2_y = [R_1^2 - (x + D/2)^2]^{-1}[R_1^2\sigma^2_{R_1} + (x + D/2)^2\sigma^2_x]. \tag{11}$$

При расчётах дисперсий по (10) и (11) необходимо привлекать выражения (2), (5) и (8). Соотношения (8)–(11) несложно обобщить на случай коррелированных измерений, если согласно принципу линеаризации [13] использовать смешанные частные производные (по τ, E_1 и E_2) и единую корреляционную матрицу ошибок измерений $\Delta\tau$, ΔE_1 и ΔE_2.

Рабочая зона метода. Для построения рабочей зоны (РЗ) воспользуемся следующими обозначениями: $\sigma^2_R = \sigma^2_R(R,\varphi)$, $\Lambda = \Lambda(R) = R^2 + D^2/4$, $\Psi_+ = \Psi_+(R,\varphi) = R^2 + D^2/4 + DR\cos\varphi$, $\Psi_- = \Psi_-(R,\varphi) = R^2 + D^2/4 - DR\cos\varphi$, $\varsigma = \varsigma(R,\varphi) = DR\cos\varphi$, $\Theta = \Theta(R,\varphi) = \Lambda - [\Lambda^2 - \varsigma^2]^{1/2}$. Легко проверить, что $\Psi_+ = R_1^2$, $\Psi_- = R_2^2$ и $\Psi_+ + \Psi_- = 2\Lambda$, $\tau^2 = 2c^{-2}\Theta$.

С учётом (8) и (9), а также принятых обозначений была получена формула дисперсии

$$\sigma^2_R = \frac{c^2}{8R^2\Theta}\,[\sigma^2_\tau(\Psi_+^2 + \Psi_-^2) + 2c^{-2}\Psi_-^2\Lambda\sigma^2_Q], \tag{12}$$

где $\sigma^2_Q = \delta^2_{E_1}(1 + \Psi_+/\Psi_-)$, $\delta^2_{E_1} = \sigma^2_E/E_1^2$ — относительная ошибка амплитудных измерений.

Если ограничить σ^2_R максимально допустимой величиной ε^2_R, то выражение (12) будет представлять собой некоторое уравнение, описывающее границу РЗ АГМ. При заданных параметрах ε^2_R, D и $\delta^2_{E_1}$ решение данного уравнения $R(\varphi)$ соответствует указанной границе. Для всех положений ИИ, отвечающих области $\sigma^2_R \le \varepsilon^2_R$, АГМ обеспечит требуемую точность определения дальности.

Методическая погрешность. Пусть $\mu_2 = \mu_1 + \Delta\mu$ и $\Delta\mu \ne 0$, т. е. принятое ранее условие стационарности не выполняется. Для дальностей до ИИ (относительно Π_1 и Π_2) используем обозначения $R_{1\mu}$ и $R_{2\mu}$. Теперь $R_{1\mu} = \mu_1/E_1$, $R_{2\mu} = (\mu_1 + \Delta\mu)/E_2$ и $R_{1\mu} = \tau c\mu_1 Q/[\mu_1(Q-1) - \Delta\mu Q]$. Применяя относительную невязку $\delta\mu = \Delta\mu/\mu_1$, воспользуемся представлением $R_{1\mu}^{-1} = (\tau c\mu_1 Q)^{-1}[Q - (1 + \delta\mu)]$. Соответственно при выполнении условия стационарности $(\Delta\mu = 0)$ имеем $R_1^{-1} = (\tau cQ)^{-1}(Q - 1)$.

Поскольку $\Delta R_{1\mu} = R_{1\mu} - R_1$ есть методическая погрешность, обусловленная несоблюдением условия стационарности, с учётом $R_{1\mu}^{-1} - R_1^{-1} = -(\tau c Q)^{-1}\delta\mu$ можно записать

$$\Delta R_{1\mu} = \frac{R_1^2 \delta\mu}{\tau c Q - R_1 \delta\mu}. \tag{13}$$

Аналогично получим формулу для оценки методической погрешности применительно ко второй дальности:

$$\Delta R_{2\mu} = \frac{R_2^2 Q}{\tau c(1 + \delta\mu^{-1}) - R_2 Q}. \tag{14}$$

Из (13) и (14) следует, что при $\delta\mu \to 0$ методические погрешности определения дальности на основе АГМ также стремятся к нулю. По аналогии с (13) и (14) несложно получить выражения для методических погрешностей определения декартовых координат ИИ.

Вычислительный эксперимент. Рассмотрим ДАГС с базой $D \in \{2 \cdot 10^2, 5 \cdot 10^3\}$ и сектором возможных направлений $0 \le \varphi \le 15$, в которых может появиться ИИ. Амплитудно-временные измерения осуществляются с точностью $\sigma_\tau = 2 \cdot 10^{-8}$ и $\sigma_Q \in$ $\in \{10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}\}$, а максимально допустимая ошибка определения дальности $\varepsilon_R \in$ $\in \{50, 100, 200\}$. Здесь и далее величины D, ε_R и R выражены в метрах, угол φ — в градусах, σ_τ — в секундах, σ_Q — безразмерная величина. Используя выражение (12) для расчёта границы РЗ, убеждаемся, что в заданном секторе углов ($0 \le \varphi \le 15$) граница хорошо аппроксимируется частью окружности с центром, значительно смещённым относительно Π_2 в положительном направлении оси Ox.

В зависимости от требуемой точности ε_R дальность R от начала координат до границы РЗ изменяется в следующих пределах (при базе $D = 2 \cdot 10^2$): $2 \cdot 10^3 \le R \le 2{,}3 \cdot 10^3$ для $\varepsilon_R = 50$ и $\sigma_Q = 10^{-3}$; $3{,}8 \cdot 10^3 \le R \le 4 \cdot 10^3$ для $\varepsilon_R = 100$ и $\sigma_Q = 10^{-3}$. Соответственно при базе $D = 5 \cdot 10^3$ имеем: $2{,}8 \cdot 10^4 \le R \le 2{,}9 \cdot 10^4$ для $\varepsilon_R = 100$ и $\sigma_Q = 10^{-3}$; $3{,}9 \cdot 10^4 \le R \le 4 \cdot 10^4$ для $\varepsilon_R = 200$ и $\sigma_Q = 10^{-3}$; $6 \cdot 10^3 \le R \le 6{,}1 \cdot 10^3$ для $\varepsilon_R = 200$ и $\sigma_Q = 10^{-1}$; $13{,}3 \cdot 10^3 \le R \le 14{,}1 \cdot 10^3$ для $\varepsilon_R = 200$ и $\sigma_Q = 10^{-2}$. Анализ показывает, что для увеличения РЗ АГМ необходимо в первую очередь добиваться повышения качества амплитудных измерений и по возможности увеличивать размер базы ДАГС. Нет необходимости применять сверхточные измерители задержки τ. Так, в нашем случае использование менее точного измерителя ($\sigma_\tau = 5 \cdot 10^{-8}$) незначительно (не более 3 %) влияет на размер РЗ. Максимальная дальность R до границы РЗ достигается при $\varphi = 0$, т. е. когда ИИ находится на базовой линии.

Пусть $\varphi = 0$, $\varepsilon_R = 200$ и $\sigma_Q = 10^{-1}$, а параметр $\delta\mu = \Delta\mu/\mu_1$, характеризующий степень нарушения условия стационарности, может принимать значения из интервала 10^{-3}–10^{-2}. Тогда с учётом (13) и (14) максимально возможная методическая погрешность определения дальности R находится в пределах от 7 до 70 метров.

Практические рекомендации. Поскольку предлагаемый АГМ можно рассматривать как симбиоз двух методов, то ему в определённой мере характерны достоинства и недостатки как гиперболического, так и амплитудного методов. Первый метод предполагает наличие высокоточных измерений задержки τ, а второй — амплитуд E_1, E_2. В последние годы вопросы, связанные с повышением качества амплитудных измерений, являются наиболее актуальными. Для их решения привлекаются различные правила стробирования, гипотезный подход (с учётом различных условий контакта пары ИИ — измеритель), кластерно-вариационный метод и т. д. [8–11], а также новые технические средства, реализующие различные физические принципы и способы амплитудных измерений.

Так, для исключения аномальных измерений может быть использовано простое правило стробирования, учитывающее максимально возможное приращение амплитуды волны: $|\Delta E| = |E_1 - E_2| \leq E_1 D/R_2$. Если это неравенство не выполняется, то велика вероятность того, что хотя бы одно из измерений (E_1, E_2) является аномальным. Для повышения точностных характеристик АГМ можно использовать эффективные процедуры усреднения формируемого массива единичных оценок дальности и местоположения ИИ с учётом избыточных амплитудно-временных измерений.

Амплитудно-гиперболический метод может применяться как самостоятельно, так и в пассивных многопозиционных системах. В первом случае необходимо использовать любую априорную информацию о направлении на ИИ (например, в случае заданной взлётно-посадочной полосы). Это даёт возможность ориентировать базовую линию ДАГС на ИИ, что позволит достичь максимального эффекта от применения АГМ. Во втором случае используется несколько пар идентичных (по характеристикам) приёмных позиций с равными базами. Для каждой такой пары реализуется АГМ. Если пара содержит направленные антенны (датчики), то их главные лучи должны быть ориентированы в одном (базовом) направлении. Число таких пар выбирается из условия прикрытия соответствующего сектора обзора. В качестве приоритетных выбираются те пары, для которых временнáя задержка близка к максимально возможному значению D/c. Точечные оценки определения дальности и местоположения ИИ, полученные для этих пар, далее могут использоваться для построения соответствующих результирующих оценок (с весовым усреднением).

Применение АГМ возможно для всех типов антенн (датчиков), но с такими техническими характеристиками и режимами работы, при которых соблюдается сформулированное ранее условие стационарности.

Заключение. Предлагаемый АГМ в отличие от известных методов пассивной локации [1–12] позволяет решать задачи определения дальности и местоположения ИИ без привлечения какой-либо дополнительной априорной информации (например, о типе траектории и скорости движения ИИ) на базе ДАГС. При этом для его практической реализации не требуются дорогостоящие и громоздкие антенны (датчики), поскольку при решении широкого круга прикладных задач достаточно воспользоваться лишь ненаправленными либо слабонаправленными (для достижения требуемого энергетического потенциала) антеннами (датчиками). В случае оптимальной ориентации ДАГС по отношению к ИИ (а именно по линии базы) достигается инвариантность результатов определения дальности и местоположения ИИ к синхронному случайному изменению амплитуд волны, регистрируемых на приёмных позициях.

Полученные зависимости оценки методической погрешности и расчёта дисперсий могут послужить эффективным математическим инструментом при обосновании возможности применения АГМ для решения конкретных прикладных задач и условий наблюдения ИИ. Амплитудно-гиперболический метод можно комбинировать с другими известными методами пассивной локации, например триангуляционным и разностно-дальномерным [1, 2, 12]. Для решения задач определения дальности и местоположения ИИ в пространстве с большей точностью необходимо реализовывать АГМ для набора пар приёмных позиций, что приведёт к появлению избыточных измерений и необходимости их весовой обработки. Этот метод несложно обобщить на случай перемещающегося ИИ, для чего достаточно задаться соответствующей моделью движения (например, полиномиальной) и временнóй сеткой измерений амплитуд и задержек принимаемой волны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Теоретические** основы радиолокации /Под ред. Я. Ширмана. М.: Сов. радио, 1970. 561 с.
2. **Черняк В. С.** Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993. 416 с.

3. **Кондратьев В. С., Котов А. Ф., Марков Л. Н.** Многопозиционные радиотехнические системы. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
4. **Мельников Ю. П., Попов С. В.** Радиотехническая разведка. Методы оценки эффективности местоопределения источников излучения. М.: Радиотехника, 2008. 432 с.
5. **Сытенький В. Д.** Пассивная локация на основе амплитудных измерений // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2011. Вып. 1. С. 69–75.
6. **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.
7. **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.
8. **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.
9. **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.
10. **Булычев Ю. Г., Мозоль А. А.** Пеленгационно-энергетический метод координатометрии с учётом кривизны Земли и явления интерференции // Автометрия. 2017. **53**, № 1. С. 43–52.
11. **Булычев Ю. Г., Чепель Е. Н.** Квазиоптимальный метод решения задачи триангуляции в условиях априорной неопределённости // Автометрия. 2017. **53**, № 6. С. 83–91.
12. **Sturgess B. N., Carey F. T.** Trilateration // The Surveying Handbook /Eds. R. C. Brinker, R. Minnick. N. Y.: Chapman & Hall, 1995. Ch. 12. P. 234–270.
13. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей. М.: Высш. шк., 1999. 576 с.

Поступила в редакцию 15 марта 2018 г.