

17. MBI-P. Tekhnicheskoe opisaniye i instruksiya po ekspluatatsii BIVR.411172.001TO [MBI-P. Technical description and operating instructions BIVR. 411172. 001 TO], 71 p.
18. Ferex 4.032. Technical description. Foerster Institute Dr.Foerster. Edition 09/2000, 16 p.
19. Modul'nyy UXO-detektor-komplekt dlya primeneniya v skvazhinakh i pod vodoy [Modular UXO detector-kit for use in wells and under water]. Available at: <https://www.vallon.de/ru/magnetometer>.
20. Sokolov N.A. Mnogokanal'naya magnitometricheskaya sistema dlya razminirovaniya bol'shikh territoriy [Multichannel magnetometric system for mine clearance of large territories], *Sb. materialov XV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya» i XI molodezhnoy shkoly seminara «Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh»* [Collection of materials of the XV All-Russian Scientific and practical Conference "Perspective Systems and Management Tasks" and the XI Youth School Seminar "Management and Information Processing in Technical Systems"]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2020, pp. 214-220.
21. Alekseev E.R., Chesnokova O.V. Reshenie zadach vychislitel'noy matematiki v paketakh Mathcad 12, MATLAB 7, Maple 9 [Solving problems of computational mathematics in packages Mathcad 12, MATLAB 7, Maple 9]. Moscow: NT Press, 2006.
22. Zvezhinskiy S.S., Parfentsev I.V. Metod magnitometricheskogo obnaruzheniya vzryvoopasnykh predmetov [Method of magnetometric detection of explosive objects], *Spetsial'naya tekhnika* [Special technique], 2008, No. 2, pp. 8-17.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.С. Звездинский.

**Соколов Николай Александрович** – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский испытательный институт инженерных войск» Минобороны России; e-mail: [cniii\\_iv@mail.ru](mailto:cniii_iv@mail.ru); 143432, Московская обл., Нахабино, Россия; тел.: 89163658920.

**Рычков Андрей Владимирович** – Военный учебно-научный центр Сухопутных войск «Общевойсковая ордена Жукова академия Вооруженных Сил Российской Федерации»; e-mail: [cniii\\_iv@mail.ru](mailto:cniii_iv@mail.ru); г. Москва, Россия; тел.: 84997665759; д.т.н.; доцент.

**Sokolov Nikolay Aleksandrovich** – Federal State Budgetary Institution "Central Research and Testing Institute of Engineering Troops" of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail: [cniii\\_iv@mail.ru](mailto:cniii_iv@mail.ru); Nakhabino, Moscow Region, Russia; phone: +79163658920.

**Rychkov Andrey Vladimirovich** – Military Training and Research Center of the Land Forces "Combined Arms Order of Zhukov Academy of the Armed Forces of the Russian Federation"; e-mail: [cniii\\_iv@mail.ru](mailto:cniii_iv@mail.ru); Moscow, Russia; phone: +74997665759; dr. of eng. sc.; associate professor.

УДК 681.883

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-72-81

**В.Д. Сытенький, И.И. Маркович, Е.Е. Завтур**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПАССИВНЫХ РЛС АМПЛИТУДНЫМ МЕТОДОМ**

*Рассматривается амплитудный метод определения координат источников излучения в пассивной радиолокации. Синтезирован алгоритм вычисления координат источников излучения в пассивном режиме радиолокационных станций, основанный на приёме закономерно затухающих в пространстве электромагнитных колебаний антеннами в коллинеарном расположении. Необходимые для определения координат цели математические соотношения получены путем решения соответствующих треугольников, образованных базами антенн и целью. Это позволило определить местоположение источника излучения (цели) точкой пересечения гипербол с фокусами в местах расположения приёмных антенн. Приведены аналитические выражения для определения координат целей в декартовых и полярных системах координатах. Анализ погрешности предлагаемого алгоритма осуществлён с*

учётом методики косвенных измерений. Исследуется случай равномерного распределения помех по пространству, аддитивно связанных с сигналом и некоррелированных с ним. Получена формула для среднеквадратичного отклонения дальности до цели. Приведены результаты расчетов оценок абсолютных погрешностей определения местоположения источника излучения, зависящие от его расположения на плоскости и показывающие, что абсолютная погрешность определения местоположения источника излучения минимальна вблизи начала координат и возрастает при удалении от нее. Синтезированный и исследованный алгоритм ввиду простоты аппаратной реализации может применяться в пассивных локационных системах как самостоятельно, так и в дополнении к широко распространенному на практике разностно-дальномерному методу, основанному на измерении взаимных временных задержек принятых сигналов.

*Определение координат; источник излучения; разностно-дальномерный метод; среднеквадратическое отклонение.*

**V.D. Sytenky, I.I. Markovich, E.E. Zavtur**

### **DETERMINATION OF THE COORDINATES OF RADIATION SOURCES IN PASSIVE RADARS BY THE AMPLITUDE METHOD**

*An amplitude method for determining the radiation sources coordinates in passive radar is considered. An algorithm for calculating the coordinates of radiation sources in the passive mode of radar stations based on the reception of electromagnetic oscillations regularly damped in space by antennas in a collinear arrangement is synthesized. The mathematical relationships necessary to determine the coordinates of the target are obtained by solving the corresponding triangles formed by the antenna bases and the target. This made it possible to determine the location of the radiation source (target) by the point of intersection of the hyperbolas with the foci at the locations of the receiving antennas. Analytical expressions are given for determining the coordinates of targets in Cartesian and polar coordinate systems. The error analysis of the proposed algorithm was carried out taking into account the method of indirect measurements. The case of uniform distribution of noise over space, additively related to the signal and uncorrelated with it, is investigated. The formula for the root-mean-square deviation of the target range is obtained. The results of calculations of estimates of the absolute errors in determining the location of the radiation source, which depend on its location on the plane and show that the absolute error in determining the location of the radiation source, is minimal near the origin and increases with distance from it, are presented. Synthesized and investigated algorithm, due to the simplicity of the hardware implementation, can be used in passive location systems both independently and in addition to the widely used differential rangefinder method based on measuring the mutual time delays of the received signals.*

*Determination of coordinates; radiation source; differential-range finder method; standard deviation.*

**Введение.** В пассивной радиолокации широкое распространение получили методы, основанные на прямолинейности распространения электромагнитных волн в пространстве, а также на постоянстве их скорости. Это триангуляционный и разностно-дальномерный методы [1–11]. В последнее время разрабатывается метод, основанный на закономерном затухании колебаний в пространстве – радиально-базовый [12].

Триангуляционный метод использует антенную базу из двух разнесенных антенн и позволяет вычислить дальность до источника излучения (ИИ) и его координаты по задержке принятого сигнала одной антенны относительно другой и по полученному пеленгу на ИИ любой антенны [5, 6]. Однако точность данного метода существенно зависит от точности определения направления на ИИ и требует применения направленных антенн.

Разностно-дальномерный метод (РДМ), основанный на измерении кривизны волнового фронта сигнала, использует коллинеарно расположенные антенны и по полученным трем задержкам сигналов относительно друг друга позволяет опреде-

лить дальность до цели и ее координаты. РДМ использует три антенны, расположенные коллинеарно и не требует определения пеленга на цель [1, 10]. Авторами разработан также алгоритм определения координат целей РДМ с учетом неточностей установки приемных антенн [11].

Радиально-базовый метод относится к амплитудным и основан на измерении напряженности поля сигнала, либо его мощности приёмными устройствами. Используется, как минимум два приёмных устройства, расположенных на известном базовом расстоянии друг от друга и направленном на источник излучения [13]. Данный метод предпочтительно использовать для определения местоположения цели в дальней зоне [14]. Точность метода зависит от характеристик измерителей амплитуды и мощности.

Представляет научный интерес рассмотреть возможности амплитудного метода, основанного на закономерном затухании колебаний в пространстве и предназначенного для работы в ближней зоне при неизвестном направлении на источник излучения.

#### Синтез алгоритма определения координат источника излучения.

На рис.1 показано типовое расположение антенн при использовании амплитудного метода. Здесь обозначено:  $A_1$ ,  $A_2$ , и  $A_3$  – коллинеарно расположенные антенны; Ц – цель (ИИ);  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  – дальности до цели от соответствующей антенны;  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  – направления на цель;  $L_1$  и  $L_2$  – известные базовые расстояния между антеннами. Сумма базовых расстояний может быть соизмерима с дальностью до цели. Начало координат соответствует точке расположения  $A_2$ ,  $(x, y)$  – искомые координаты источника излучения.

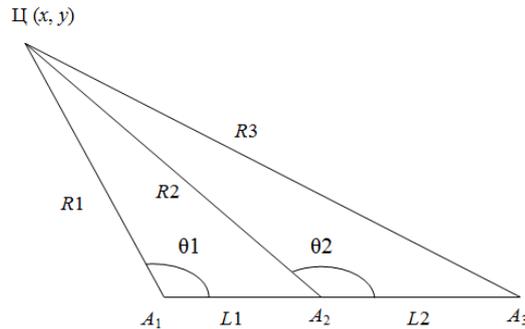


Рис. 1. Геометрия амплитудного метода

Необходимые соотношения для определения координат цели можно получить, используя теорему косинусов для треугольников  $A_1 A_2 Ц$  и  $A_1 A_3 Ц$  относительно угла  $\theta_1$  [12–14]:

$$\cos(\theta_1) = \frac{R_1^2 + L_1^2 - R_2^2}{2R_1L_1}. \quad (1)$$

$$\cos(\theta_1) = \frac{R_1^2 + (L_1 + L_2)^2 - R_3^2}{2R_1(L_1 + L_2)}. \quad (2)$$

Поделив числители на знаменатели в (1) и (2) выражениях, получим

$$\cos(\theta_1) = \frac{R_1}{2L_1} + \frac{L_1}{2R_1} - \frac{R_2^2}{2L_1R_1}, \quad (3)$$

$$\cos(\theta_1) = \frac{R_1}{2(L_1 + L_2)} + \frac{(L_1 + L_2)}{2R_1} - \frac{R_3^2}{2(L_1 + L_2)R_1}. \quad (4)$$

Принимая во внимание, что амплитуда  $A1$  электромагнитных колебаний [5, 6] в первом приемнике определяется как  $A1 = \frac{\sqrt{W}}{4\pi R1}$ , во втором –  $A2 = \frac{\sqrt{W}}{4\pi R2}$ , в третьем –  $A3 = \frac{\sqrt{W}}{4\pi R3}$ , где  $W$  – мощность ИИ, и учитывая соотношения  $\frac{R2}{R1} = \frac{A1}{A2}$ ,  $\frac{R3}{R1} = \frac{A1}{A3}$ , а также, что  $R2 = R1 \frac{A1}{A2}$  и  $R3 = R1 \frac{A1}{A3}$ , перепишем (3) и (4) в виде

$$\cos(\theta1) = \frac{R1}{2L1} + \frac{L1}{2R1} - \frac{R1A1^2}{2L1A2^2}, \quad (5)$$

$$\cos(\theta1) = \frac{R1}{2(L1+L2)} + \frac{(L1+L2)}{2R1} - \frac{R1A1^2}{2(L1+L2)A3^2}. \quad (6)$$

Приравняв правые части (5) и (6), получаем

$$\frac{R1}{2L1} + \frac{L1}{2R1} - \frac{R1A1^2}{2L1A2^2} = \frac{R1}{2(L1+L2)} + \frac{(L1+L2)}{2R1} - \frac{R1A1^2}{2(L1+L2)A3^2}. \quad (7)$$

Решая (7) относительно  $R1$ , получаем выражение для вычисления  $R1$

$$R1 = \sqrt{\frac{L2}{\left[\frac{1}{L1}\left(1-\frac{A1^2}{A2^2}\right) - \frac{1}{L1+L2}\left(1-\frac{A1^2}{A3^2}\right)\right]}}. \quad (8)$$

Учитывая, что  $R2 = R1 \frac{A1}{A2}$ , получаем выражение для вычисления  $R2$

$$R2 = \sqrt{\frac{A1^2L2}{\left[\frac{1}{L1}\left(1-\frac{A1^2}{A2^2}\right) - \frac{1}{L1+L2}\left(1-\frac{A1^2}{A3^2}\right)\right]A2^2}}. \quad (9)$$

Если базовые расстояния равны, т.е.  $L1 = L2 = L$ , то выражение (8) несколько упрощается, т.е.

$$R1 = \sqrt{\frac{L^2}{\left[\frac{1}{2}\frac{A1^2}{A2^2} + \frac{A1^2}{2A3^2}\right]}}. \quad (10)$$

Аналогично и для (9) при  $L1 = L2 = L$ , выражение (9) тоже упрощается, т.е.

$$R2 = \sqrt{\frac{A1^2L^2}{\left[\frac{1}{2}\frac{A1^2}{A2^2} + \frac{A1^2}{2A3^2}\right]A2^2}}. \quad (11)$$

Направление на источник излучения может быть определено также с помощью теоремы косинусов. Найдём угол  $\theta2$  (рис. 1). Для этого возьмём треугольник  $A2, A3, Ц$  и запишем выражение

$$\cos(\theta2) = \frac{R2^2+L^2-R3^2}{2R2L} = \frac{R2}{2L} + \frac{L}{2R2} - \frac{R3A2}{2LA3}. \quad (12)$$

Выразив  $R3$  в (12) через  $R2$  и соотношения амплитуд,

$$\cos(\theta2) = \frac{R2}{2L} + \frac{L}{2R2} - \frac{R2A2^2}{2LA3^2} \quad (13)$$

получим направление на источник излучения

$$\theta2 = 180^0 - \arccos \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{R2}{L} + \frac{L}{R2} - \frac{R2A2^2}{LA3^2} \right) \right]. \quad (14)$$

Координаты источника излучения определяются из найденных величин  $R2$  и  $\theta2$ , т.е.

$$x = R2\cos(\theta2); y = R2\sin(\theta2). \quad (15)$$

**Анализ погрешностей алгоритма определения координат источника излучения.** При измерении значений амплитуд  $A_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) возникают погрешности, как в силу неточности измерений, так и вследствие наличия помех, поэтому встает вопрос о точности измерения искомым параметров  $R_2$  и  $\theta_2$ . Эту точность можно получить, зная абсолютную погрешность измерения дальности, для определения которой воспользуемся методикой расчета при косвенных измерениях [18–20]. При косвенных измерениях результаты, полученные прямыми измерениями (в данном случае измерение амплитуд электромагнитных колебаний в приёмных антеннах) являются исходными данными для дальнейших вычислений. Погрешности прямых измерений амплитуд вследствие наличия внешних помех и аппаратных воздействий, приводят к тому, что окончательный результат расчета дальностей  $R_1$ ,  $R_2$  и угла  $\theta_2$  будет иметь погрешность.

Выражение для расчёта абсолютной погрешности дальности  $\sigma_{R_2}$ , т.е. среднеквадратического отклонения величины  $R_2$ , имеет следующий вид:

$$\sigma_{R_2} = \sqrt{\left[\frac{\partial R_2}{\partial A_1}\right]^2 \sigma_{A_1}^2 + \left[\frac{\partial R_2}{\partial A_2}\right]^2 \sigma_{A_2}^2 + \left[\frac{\partial R_2}{\partial A_3}\right]^2 \sigma_{A_3}^2}, \quad (16)$$

где  $R_2 = \sqrt{\frac{A_1^2 L_2}{\left[\frac{1}{L_1} \left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2}\right) - \frac{1}{L_1 + L_2} \left(1 - \frac{A_1^2}{A_3^2}\right)\right] A_2^2}}$  – анализируемая функция (9);

$\sigma_{A_1}$ ,  $\sigma_{A_2}$  и  $\sigma_{A_3}$  – среднеквадратические отклонения измеряемых величин  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$ , учитывающие действие аппаратуры и помех.

Получим аналитическое выражение для вычисления абсолютной погрешности дальности  $\sigma_{R_2}$ , т.е. среднеквадратического отклонения величины  $R_2$ . В выражении (16) необходимо вычислить три частных производные по соответствующим аргументам  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ . Осуществим это в такой же последовательности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_2}{\partial A_1} &= \left( \sqrt{\frac{A_1^2 L_2}{\left[\frac{1}{L_1} \left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2}\right) - \frac{1}{L_1 + L_2} \left(1 - \frac{A_1^2}{A_3^2}\right)\right] A_2^2}} \right)'_{A_1} = \\ &= \frac{\sqrt{L_2}}{A_2} \left[ A_1 (L_1^{-1} A_2^{-2} (A_2^2 - A_1^2) - (L_1 + L_2)^{-1} A_3^{-2} (A_3^2 - A_1^2))^{-\frac{1}{2}} \right]'_{A_1}. \end{aligned}$$

Для упрощения дальнейших вычислений введем обозначение:

$$Y_2 = (L_1^{-1} A_2^{-2} (A_2^2 - A_1^2) - (L_1 + L_2)^{-1} A_3^{-2} (A_3^2 - A_1^2)).$$

Тогда

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_2}{\partial A_1} &= \frac{\sqrt{L_2}}{A_2} \left[ A_1 Y_2^{-\frac{1}{2}} \right]'_{A_1} = \frac{\sqrt{L_2}}{A_2} \left[ A_1' Y_2^{-\frac{1}{2}} + A_1 \left( Y_2^{-\frac{1}{2}} \right)'_{A_1} \right] = \\ &= \frac{\sqrt{L_2}}{A_2} \left[ Y_2^{-\frac{1}{2}} + A_1 \left( -\frac{1}{2} Y_2^{-\frac{3}{2}} Y_2'_{A_1} \right) \right] = \\ &= \frac{\sqrt{L_2}}{A_2} \left[ Y_2^{-\frac{1}{2}} - \frac{A_1}{2} Y_2^{-\frac{3}{2}} (-2A_1 (L_1^{-1} A_2^{-2} - (L_1 + L_2)^{-1} A_3^{-2})) \right] = \\ &= \frac{\sqrt{L_2}}{A_2} \left[ \frac{1}{(Y_2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{A_1^2}{(Y_2)^{\frac{3}{2}}} \left( \frac{1}{L_1 A_2^2} - \frac{1}{(L_1 + L_2) A_3^2} \right) \right] = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\sqrt{L2}}{A2} \left[ \frac{1}{(Y2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{A1^2}{L1A2^2(Y2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{A1^2}{(L1+L2)A3^2(Y2)^{\frac{3}{2}}} \right] = \\
 &= \frac{\sqrt{L2}}{(Y2)^{\frac{1}{2}}} \left[ \frac{1}{A2} + \frac{A1^2}{L1A2^3Y2} - \frac{A1^2}{(L1+L2)A2A3^2Y2} \right] \\
 \frac{\partial R2}{\partial A2} &= \left( \frac{\sqrt{\frac{A1^2L2}{\left[ \frac{1}{L1} \left( 1 - \frac{A1^2}{A2^2} \right) - \frac{1}{L1+L2} \left( 1 - \frac{A1^2}{A3^2} \right) \right] A2^2}}}{A2} \right)'_{A2} = \\
 &= \sqrt{L2}A1 \left[ A2^{-1}(L1^{-1}A2^{-2}(A2^2 - A1^2) - (L1+L2)^{-1}A3^{-2}(A3^2 - A1^2))^{-\frac{1}{2}} \right]'_{A2} = \\
 &= A1\sqrt{L2} \left[ A2^{-1}Y2^{-\frac{1}{2}} \right]'_{A2} = A1\sqrt{L2} \left[ -A2^{-2}Y2^{-\frac{1}{2}} + A2^{-1} \left( Y2^{-\frac{1}{2}} \right)'_{A2} \right] = \\
 &= A1\sqrt{L2} \left[ -A2^{-2}Y2^{-\frac{1}{2}} + A2^{-1} \left( -\frac{1}{2} Y2^{-\frac{3}{2}} Y2'_{A2} \right) \right] = \\
 &= A1\sqrt{L2} \left[ -A2^{-2}Y2^{-\frac{1}{2}} + A2^{-1} \left( -\frac{1}{2} Y2^{-\frac{3}{2}} (2L1^{-1}A1^2A2^{-3}) \right) \right] = \\
 &= \frac{A1\sqrt{L2}}{(Y2)^{\frac{1}{2}}} \left[ \frac{-1}{A2^2} - \frac{A1^2}{L1A2^4Y2} \right], \\
 \frac{\partial R2}{\partial A3} &= \left( \frac{\sqrt{\frac{A1^2L2}{\left[ \frac{1}{L1} \left( 1 - \frac{A1^2}{A2^2} \right) - \frac{1}{L1+L2} \left( 1 - \frac{A1^2}{A3^2} \right) \right] A2^2}}}{A3} \right)'_{A3} = \\
 &= \sqrt{L2} \frac{A1}{A2} \left[ (L1^{-1}A2^{-2}(A2^2 - A1^2) - (L1+L2)^{-1}A3^{-2}(A3^2 - A1^2))^{-\frac{1}{2}} \right]'_{A3} = \\
 &= \sqrt{L2} \frac{A1}{A2} \left[ \left( -\frac{1}{2} \right) \left( Y2^{-\frac{3}{2}} \right) \frac{-2A1^2}{(L1+L2)A3^3} \right] = \sqrt{L2} \frac{A1}{A2} \left[ \frac{A1^2}{(Y2)^{\frac{3}{2}}(L1+L2)A3^3} \right].
 \end{aligned}$$

Подставляя в (16) полученные выражения частных производных и осуществляя соответствующие преобразования, получаем формулу расчета абсолютной погрешности измеряемого расстояния R2 до цели:

$$\sigma_{R2} = \frac{\sqrt{L2}}{\sqrt{Y2}} \sqrt{\left[ \frac{1}{A2} + \frac{A1^2}{A2Y2} Z1 \right]^2 \frac{A1^2}{q_1^2} + \left[ \frac{-A1}{A2^2} - \frac{A1^3}{A2^4L1Y2} \right]^2 \frac{A2^2}{q_2^2} + [Z2]^2 \frac{A3^2}{q_3^2}}, \quad (17)$$

где  $Z1 = \frac{1}{L1A2^2} - \frac{1}{A3^2(L1+L2)}$ ;

$$Z2 = \frac{A1^3}{A2A3^3Y2(L1+L2)};$$

$q_1 = \frac{A1}{\sigma_{A1}}, q_2 = \frac{A2}{\sigma_{A2}}, q_3 = \frac{A3}{\sigma_{A3}}$  – отношения сигнал/помеха в соответствующих антеннах.

В выражении (12) присутствует отношение сигнал/помеха в соответствующих антеннах. Анализ алгоритма определения местоположения источника излучения в таком виде предполагает, что отношения сигнал/помеха во всех приёмных антеннах равны друг другу. В реальных условиях это отношение может зависеть от местоположения источника излучения относительно приёмных антенн пассивного локатора и от расположения источника помех в пространстве.

Рассмотрим случай равномерного распределения помех по пространству, аддитивно связанных с сигналом и некоррелированных с ним, что позволит при вычислении среднеквадратического значения погрешности координат ИИ учесть изменение отношения сигнал/помеха.

Так в (17)  $q_1 = \frac{A_1}{\sigma_{A_1}}, q_2 = \frac{A_2}{\sigma_{A_2}}, q_3 = \frac{A_3}{\sigma_{A_3}}$  – отношения сигнал/помеха в соответствующих антеннах. При принятых условиях  $\sigma_{A_1} = \sigma_{A_2} = \sigma_{A_3}$  и при условии, что эти значения постоянны, отношения сигнал/помеха зависят от амплитуд колебаний в антеннах. Для учёта этого изменения амплитуд необходимо ввести коэффициенты, учитывающие расположение ИИ относительно приёмных антенн. Так как значение амплитуды принимаемых колебаний зависит от расстояния до ИИ и учитывая, что начало координат соответствует точке расположения  $A_2$  (см. рис. 1), коэффициент  $K_1 = R_2/R_1$ , коэффициент  $K_2 = R_2/R_2 = 1$ , а коэффициент  $K_3 = R_2/R_3$ . Умножение коэффициентов на соответствующие значения отношения сигнал/помеха, т.е.  $q_1 \cdot K_1$  и  $q_3 \cdot K_3$  в выражении (17) позволяют учесть изменение амплитуд колебаний в приёмных антеннах от пространственного расположения ИИ.

Произведём вычисление значений абсолютной погрешности измерения координат ИИ при следующих параметрах:  $L_1 = L_2 = 3000$  м, расстояния до ИИ  $R_2 = 5000$  м,  $4000$  м,  $3000$  м,  $2000$  м,  $1000$  м, отношение сигнал/помеха  $q = 100$  (40 дБ). Результаты вычислений для разных положений ИИ приведены на рис. 2.

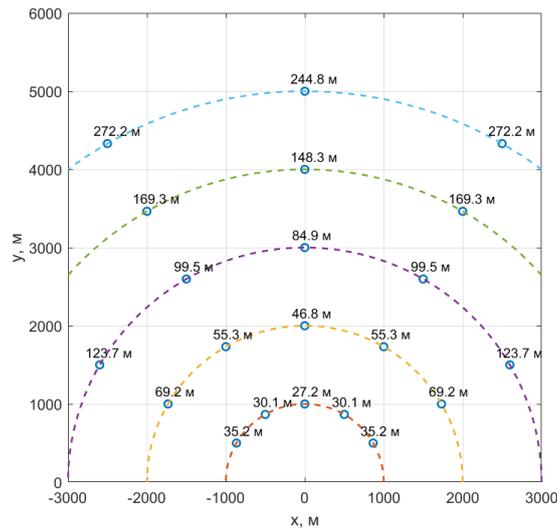


Рис. 2. Абсолютная погрешность определения местоположения источника излучения от его расположения на плоскости

Представленные на рис. 2 графики показывают, что абсолютная погрешность определения местоположения источника излучения минимальна вблизи начала координат, расположенного в точке  $A_2$ , и возрастает при удалении от нее. На одинаковых расстояниях наименьших значений абсолютная погрешность достигает на нормали (к антенной базе), проходящей через начало координат, и увеличивается при отклонении от нее. При нахождении ИИ на значительном расстоянии (более 4 км), измерение его дальности выполняется с большой погрешностью (более 148 м).

**Заключение.** На основе аналитических выражений синтезирован алгоритм определения координат источника излучения в двумерном пространстве при коллинеарном расположении антенн, использующий закономерное затухание колеба-

ний в пространстве. Абсолютная погрешность измерения дальности рассчитана по методике косвенных вычислений. Приведенный алгоритм ввиду простоты аппаратной реализации может применяться в пассивных локационных системах как самостоятельно, так и в дополнение к широко известному РДМ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В.* Корабельная гидроакустическая техника: Состояние и актуальные проблемы. – СПб.: Наука, 2004. – 410 с.
2. *Carter G.C.* Passive Ranging Errors due to Receiving Hydrophone Position Uncertainty // *J. Acoust. Soc. Amer.* – 1979. – Vol. 65, No. 2. – P. 528-530.
3. *Картер Дж. К.* Обработка сигналов в пассивной гидролокации // Подводная акустика и обработка сигналов. – М.: Мир, 1985. – С. 415-421.
4. *Ширман Я.Д., Манжос В.Н.* Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
5. Теоретические основы радиолокации: учеб. пособие для вузов / под ред. Ширмана Я.Д. – М., Советское радио, 1970. – 560 с.
6. *Бакулев П.А.* Радиолокационные системы: учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.
7. *Караваев В.В., Сазонов В.В.* Статистическая теория пассивной локации. – М.: Радио и связь, 1987. – 240 с.
8. *Черняк В.С.* Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
9. *Беляевский Л.С., Новиков В.С., Олянюк П.В.* Основы радионавигации: учебник для вузов гражд. авиации. – М.: Транспорт, 1982. – 288 с.
10. *Марьев А.А., Маркович И.И., Завтур Е.Е.* Исследование погрешностей разностно-дальномерного метода пассивной локации // Излучение и рассеяние электромагнитных волн: Тр. Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-2015. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 391-395.
11. *Маркович И.И., Завтур Е.Е.* Алгоритм определения координат целей разностно-дальномерным методом с учетом неточностей установки приемных гидроакустических антенн // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 8. – С. 162-171.
12. *Сытенький В.Д.* Пассивная локация на основе амплитудных измерений // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2011. – Вып. 1. – С. 69-76.
13. *Сытенький В.Д., Бакаев А.В.* Определение координат объекта по известным параметрам источников излучения // Вестник воздушно-космической обороны. – 2018. – № 3 (19). – С. 94-101.
14. *Сытенький В.Д.* Определение местоположения источника излучения в космическом пространстве // Матер. Всероссийской научно-технической конференции «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении» КомТех-2019. – Таганрог: ИРТСУ ЮФУ, 2019. – С. 250-256.
15. *Понарин Я.П.* Элементарная геометрия: В 2 т. Т. 1: Планиметрия, преобразования плоскости. – М.: МЦНМО, 2004. – 312 с.
16. *Корн Г.А., Корн Т.М.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
17. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – 13-е изд. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
18. *Мирский Г.Я.* Радиоэлектронные измерения. – М.: Энергия, 1975. – 265 с.
19. Поиск, обнаружение и измерение параметров сигналов в радионавигационных системах / под ред. *Ю.М. Казаринова.* – М.: Сов. радио, 1975. – 296 с.
20. Электрорадиоизмерения: учеб. пособие для вузов / под ред. В.И. Винокурова. – М.: Высшая школа, 1976. – 264 с.

#### REFERANCES

1. *Koryakin Yu.A., Smirnov S.A., Yakovlev G.V.* Korabel'naya gidroakusticheskaya tekhnika: Sostoyanie i aktual'nye problem [Shipboard hydroacoustic equipment: Current state and current problems]. Saint Petersburg: Nauka, 2004, 410 p.
2. *Carter G.C.* Passive Ranging Errors due to Receiving Hydrophone Position Uncertainty, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1979, Vol. 65, No. 2, pp. 528-530.

3. *Karter Dzh.K.* Obrabotka signalov v passivnoy gidrolokatsii [Signal processing in passive sonar], *Podvodnaya akustika i obrabotka signalov* [Underwater acoustics and signal processing]. M.: Mir, 1985, pp. 415-421.
4. *Shirman Ya.D., Manzhos V.N.* Teoriya i tekhnika obrabotki radiolokatsionnoy informatsii na fone pomekh [Theory and technique of processing radar information against the background of interference]. Moscow: Radio i svyaz', 1981, 416 p.
5. Teoreticheskie osnovy radiolokatsii: ucheb. posobie dlya vuzov [Theoretical foundations of radar: a textbook for universities], ed. by Shirmana Ya.D. Moscow: Sovetskoe radio, 1970, 560 p.
6. *Bakulev P.A.* Radiolokatsionnye sistemy: uchebnyk dlya vuzov [Radar systems: textbook for universities]. Moscow: Radiotekhnika, 2004, 320 p.
7. *Karavaev V.V., Sazonov V.V.* Statisticheskaya teoriya passivnoy lokatsii [Statistical theory of passive location]. Moscow: Radio i svyaz', 1987, 240 p.
8. *Chernyak V.S.* Mnogopozitsionnaya radiolokatsiya [Multi-position radar]. Moscow: Radio i svyaz', 1993, 416 p.
9. *Belyaevskiy L.S., Novikov V.S., Olyanyuk P.V.* Osnovy radionavigatsii: uchebnyk dlya vuzov grazhd. Aviatsii [Fundamentals of radio navigation: a textbook for higher education institutions of the Russian Federation. Aviation]. Moscow: Transport, 1982, 288 p.
10. *Mar'ev A.A., Markovich I.I., Zavtur E.E.* Issledovanie pogreshnostey raznostno-dal'nomernogo metoda passivnoy lokatsii [Research of errors of the difference-range-measuring method of passive location], *Izlučenje i rasseyaniye elektromagnitnykh voln: Tr. Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Izlučenje i rasseyaniye elektromagnitnykh voln» IREMV-2015* [Radiation and scattering of electromagnetic waves: Proceedings of the International Scientific Conference "Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves" IREMV-2015]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 391-395.
11. *Markovich I.I., Zavtur E.E.* Algoritm opredeleniya koordinat tseley raznostno-dal'nomernym metodom s uchedom netochnostey ustanovki priemnykh gidroakusticheskikh antenn [Algorithm for determining the coordinates of targets by the difference-range-measuring method, taking into account the inaccuracies of the installation of receiving hydroacoustic antennas], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 8, pp. 162-171.
12. *Syten'kiy V.D.* Passivnaya lokatsiya na osnove amplitudnykh izmereniy [Passive location based on amplitude measurements], *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika* [Izvestiya vuzov Rossii. Radio electronics], 2011, Issue 1, pp. 69-76.
13. *Syten'kiy V.D., Bakaev A.V.* Opredelenie koordinat ob"ekta po izvestnym parametram istochnikov izlucheniya [Determining the coordinates of an object based on known parameters of radiation sources], *Vestnik vozdushno-kosmicheskoy oborony* [Bulletin of Aerospace Defense], 2018, No. 3 (19), pp. 94-101.
14. *Syten'kiy V.D.* Opredelenie mestopolozheniya istochnika izlucheniya v kosmicheskom prostranstve [Determining the location of a radiation source in outer space], *Mater. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii» KomTekh-2019* [Materials of the All-Russian scientific and Technical conference "Computer and Information Technologies in Science, engineering and Management" Komtech-2019]. Taganrog: IRTSU YuFU, 2019, pp. 250-256.
15. *Ponarin Ya.P.* Elementarnaya geometriya: V 2 t. T. 1: Planimetriya, preobrazovaniya ploskosti [Elementary geometry: In 2 vol. Vol. 1: Planimetry, plane transformations]. Moscow: MTSNMO, 2004, 312 p.
16. *Korn G.A., Korn T.M.* Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Handbook of mathematics for researchers and engineers]. Moscow: Nauka, 1974, 832 p.
17. *Bronshhteyn I.N., Semendyaev K.A.* Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov [Handbook of mathematics for engineers and students of higher education institutions]. 13 ed. Moscow: Nauka, 1986, 544 p.
18. *Mirskiy G.Ya.* Radioelektronnye izmereniya [Radioelectronic measurements]. Moscow: Energiya, 1975, 265 p.
19. Poisk, obnaruzhenie i izmerenie parametrov signalov v radionavigatsionnykh sistemakh [Search, detection and measurement of signal parameters in radio navigation systems], ed. by Yu.M. Kazarinova. Moscow: Sov. radio, 1975, 296 p.
20. *Elektro-radioizmereniya: ucheb. posobie dlya vuzov* [Electro-radio measurements: a textbook for universities], ed. by V.I. Vinokurova. Moscow: Vysshaya shkola, 1976, 264 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.П. Федосов

**Сытенский Василий Дмитриевич** – Институт радиотехнических систем и управления федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет»; e-mail: vdsytenkiy@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; к.т.н.; доцент.

**Маркович Игорь Ильич** – Научное конструкторское бюро цифровой обработки сигналов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет»; e-mail: marko@sfedu.ru, г. Таганрог, Россия; тел.: 88634394055; директор-главный конструктор; к.т.н.; с.н.с.

**Завтур Евгений Евгеньевич** – e-mail: zavtur90@mail.ru; тел.: 88634393075; начальник сектора.

**Syten'kiy Vasilij Dmirtievich** – Institute of Radio Engineering Systems and Management of the Federal State-Owned Educational of Higher Education «Southern Federal University»; e-mail: vdsytenkiy@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone.: +78634371632; the department of theoretical foundations of radio engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Markovich Igor Il'ich** – SFEDU Research and Design Bureau of Digital Signal Processing – Federal State-Owned Educational of Higher Education «Southern Federal University»; e-mail: marko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634394055; cand. of eng. sc.; senior fellow; director – chief designer.

**Zavtur Evgeny Evgenevich** – e-mail: zavtur90@mail.ru; phone: +78634393075; head of section.

УДК 681.518.3

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-81-93

**В.Ф. Филаретов, Д.А. Юхимец, А.В. Зуев, А.С. Губанков, Д.Д. Минаев**

### **ЦИФРОВАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И НАВИГАЦИИ ДЛЯ ПОДВОДНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ\***

*Предложена архитектура цифровой платформы для реализации распределенных систем управления и навигации подводных робототехнических комплексов (ПРК), выполняющих технологические операции в условиях неопределенности окружающей среды. Предлагаемая цифровая платформа предназначена для автоматизации следующих видов деятельности: мониторинг состояния объектов подводной инфраструктуры (линии связи, трубопроводы, добычное оборудование и т.д.), картографические и геодезические работы, определение параметров и границ физических полей, зон распространения химических соединений (зон загрязнений) и биоресурсов, охрана объектов подводной и надводной инфраструктуры (подводные фермы марикультур, границы водных заповедников и т.п.), сопровождение движущихся объектов, поиск объектов заданного типа (биологических, техногенных и др.), выполнение подводных технологических операций (сварка, резка, очистка и т.п.). Для этой платформы разработана система команд, обеспечивающая гибкое задание миссий ПРК различного типа и назначения. Выделены пять типов сообщений цифровой платформы: команды управления порядком выполнения миссии, команды управления загрузкой миссии, информационные сообщения, команды миссии и группового управления. Предложена концепция создания распределенных систем управления ПРК, обеспечивающая совместимость существующих бортовых систем ПРК с предлагаемым решением на основе компактных гидроакустических систем глобальной гидроакустической навигации, разработанных в ПАО «Дальприбор» (г. Владивосток). Указанные системы управления состоят из двух основных частей. Первая часть представляет собой исходную бортовую информационно-управляющую систему ПРК, обеспечивающую его движение в заданную точку пространства с заданной скоростью, получение данных от бортовых датчиков, а также управление работой бортового оборудования. Вторая часть – система управления верхнего уровня, обеспечивает возможность взаимодейст-*

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 20-38-70161, 19-08-00347.