

17. Zagray N.P., Golosov S.P. Vliyanie pregrady v oblasti nelineynogo vzaimodeystviya akusticheskikh voln na kharakteristiki parametricheskogo izluchatelya [The effect of obstacles in the field of nonlinear interaction of acoustic waves on the characteristics of the parametric emitter], *Sb. NTO im. A.N. Krylova "Akusticheskie metody issledovaniya okeana"* [The collection NTO them. A. N. Krylov "Acoustic methods of ocean."]. Leningrad: Sudostroenie, 1980, Issue 334, pp. 50-55.
18. Zagray N.P., Golosov S.P. Pole parametricheskogo izluchatelya pri izmenenii formy oblasti vzaimodeystviya [Field parametric emitter if you change the shape of the interaction region], *V kn. "Prikladnaya akustika"* [In book "Applied acoustics"]. Taganrog, TRTI, 1985, Issue XI, pp. 32-36.
19. Zagray N.P., Golosov S.P. Vliyanie formy oblasti nelineynogo vzaimodeystviya na pole parametricheskoy anteny [The influence of the shape of the region of nonlinear interaction on the field parametric antenna], *Nauchno-tekhnicheskiy sbornik: Sudostroitel'naya promyshlennost', seriya: Akustika, TsNII "Rumb"* [Scientific and technical collection: Ship-building industry, series: Phonics, CRI "RUMB"], 1990, Issue 6, pp. 83-84.
20. Zagray N.P. Prostranstvennyy analiz i sintez signalov parametricheskoy anteny v srede s vertikal'nym raspredeleniem skorosti zvuka [Spatial analysis and synthesis signals of the parametric antenna in a medium with vertical distribution of the speed of sound], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 1995, No. 4, pp. 18-21.
21. Alippi A., Scarano G., Zagrai N. Directivity Pattern of Parametrically Generated Acoustic Waves, *ITALI, Il Nuovo Cimento*, 1987, Vol. 9D, No. 5, pp. 489-496.

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

Заграй Николай Петрович – Южный федеральный университет; e-mail: znp@sfnu.ru; 347925, г. Таганрог, ул. К. Либкнехта, 93а; тел.: 88634379879; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

Zagray Nikolay Petrovitch – Southern Federal University; e-mail: znp@sfnu.ru; 193a, Libknehta street, Taganrog, 347925, Russia; phone: +78634379879; the department of hydroacoustics and medical engineering; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 681.883.02.024

DOI 10.23683/2311-3103-2017-8-162-171

И.И. Маркович, Е.Е. Завтур

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ЦЕЛЕЙ РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНЫМ МЕТОДОМ С УЧЕТОМ НЕТОЧНОСТЕЙ УСТАНОВКИ ПРИЕМНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН

На практике в пассивных гидроакустических системах для определения координат подводных и надводных объектов широкое распространение получил разностно-дальномерный метод (РДМ). Данный метод основан на использовании разностей расстояний от объекта до трех коллинеарных антенн с известными координатами. Для определения разности расстояний с помощью вычисления взаимно-корреляционных функций принятых шумоподобных сигналов измеряются временные задержки между поступлениями сигналов на каждую антенну. Существенным недостатком разностно-дальномерного метода является условие коллинеарного расположения трех приемных антенн с симметричной антенной базой, что представляет собой довольно трудную задачу при базах составляющих сотни метров. При несоблюдении этого требования погрешности определения координат цели значительно возрастают. В связи с этим практическую ценность для разработчиков гидроакустических систем представляет алгоритм, который позволяет рассчитать координаты цели для случая неколлинеарного

расположения антенн с несимметричной антенной базой. В работе предложен алгоритм определения координат целей РДМ с учетом неточностей установки гидроакустических антенн и получены его аналитические соотношения. Подтверждена правильность приведенного алгоритма путем сведения произвольного расположения антенн к расположению на одной прямой, т.е. получение аналитическим способом из выведенных соотношений изложенного алгоритма известных выражений для классического РДМ определения координат целей. Использование предложенного алгоритма предполагает наличие априорных сведений о положении антенн, отсутствие взаимного перемещения антенной системы и цели, высокую точность измерения временных задержек, сигнал от цели и помеха являются некоррелированными стационарными случайными процессами. Однако при реализации рассматриваемого метода определения координат целей в пассивной гидролокации эти условия не всегда выполняются, и поэтому приходится учитывать факторы, связанные со средой распространения: профиль скорости звука, глубину и наклон дна, возможные многократные отражения сигналов от дна и поверхности мелкого моря, а также всегда существующую неопределенность точного положения антенн и некомпенсированный эффект Доплера, обусловленный движением цели.

Пассивная гидроакустическая система; разностно-дальномерный метод; коллинеарное расположение; приемные антенны.

I.I. Markovich, E.E. Zavtur

**THE ALGORITHM OF TARGET COORDINATES DETERMINATION
BY THE RANGE-DIFFERENCE METHOD TAKING INTO ACCOUNT
THE INACCURACIES OF RECEIVING HYDROACOUSTIC ARRAYS
INSTALLATION**

In practice, in passive sonar systems for determination of underwater and surface targets coordinates the range-difference method (RDM) is widely used. This method is based on using of differences in distances from the object to three collinear arrays with known coordinates. To determine the difference of distances by calculating mutually correlation functions of received noise-like signals time delays between the received signals at each array are measured. A significant shortcoming of the range-difference method is the requirement of the collinear arrangement of three receiving arrays with symmetric antenna base that is a rather difficult task when the components of the bases are hundreds of meters. Failure to comply with this requirement, the errors of the target coordinates determining increase significantly. In this connection, the practical value for the developers of sonar systems is an algorithm, which allows calculating the target coordinates for the case of non-collinear arrangement with asymmetric antenna base. The present paper presents the algorithm of target coordinates determination by RDM, taking into account the inaccuracies of receiving hydroacoustic arrays installation and obtained analytical ratios. The correctness of the algorithm is confirmed by changing the arbitrary location of arrays to their location on the same line, that is obtaining well-known expressions for classical RDM of targets coordinates determination by the analytical method from derived ratios of the above algorithm. The use of the proposed algorithm assumes the presence of a priori information about the position of the arrays, the absence of mutual movement of the array system and the target, the high accuracy of the time delays measuring, the signal from the target and the interference are uncorrelated stationary random processes. However, when implementing the method of determining targets coordinates in passive sonar systems, these conditions are not always fulfilled, and therefore the following factors, related to the propagation medium, must be taken into account: sound velocity profile, the depth and slope of the bottom, possible multiple reflections of signals from the bottom and surface of the shallow sea, and always available uncertainty of the exact position of the arrays and the uncompensated Doppler effect due to the movement of the target.

Passive sonar system; the range-difference method; collinear location; receiving array.

Введение. Известны широко используемые на практике в пассивных гидроакустических системах триангуляционный и разностно-дальномерный методы определения координат подводных объектов [1–10].

Триангуляционный метод использует антенную базу из двух разнесенных антенн и позволяет вычислить дальность до цели и ее координаты по задержке принятого сигнала одной антенны относительно другой и по полученному пеленгу на цель любой антенны. Однако точность данного метода существенно зависит от точности определения направления на цель и требует применения направленных антенн.

Горизонтальный разностно-дальномерный метод (РДМ), основанный на измерении кривизны волнового фронта сигнала, использует три коллинеарно расположенные антенны и по полученным трем задержкам поступления сигналов относительно друг друга позволяет определить дальность до цели и ее координаты. РДМ использует три антенны, расположенные коллинеарно, но не требует определения пеленга на цель.

Классический РДМ определения координат цели предполагает коллинеарное и симметричное расположение антенн, то есть все антенны должны быть расположены строго на одной прямой и через равные расстояния, что не просто реализовать на практике при дистанциях, составляющих сотни метров. При несоблюдении этих требований погрешности определения координат цели значительно возрастают.

РДМ с коллинеарным расположением антенн. На рис. 1 показано типовое расположение антенн при использовании РДМ. Здесь обозначено: A_1 , A_2 и A_3 – коллинеарно расположенные антенны; Π – цель; R_1 , R_2 и R_3 – дальности до цели от соответствующей антенны; θ_1 , θ_2 и θ_3 – направления на цель; L_1 и L_2 – базы антенной системы. Начало координат соответствует точке расположения A_2 , (x, y) – искомые координаты цели. Время распространения шумоподобного сигнала до любой антенны равно $t_i = R_i/c$ (где $i = 1, 2, 3$; c – скорость распространения звука). Относительные задержки сигналов, принятых разными антеннами, можно обозначить через $\tau_{ij} = t_i - t_j$.

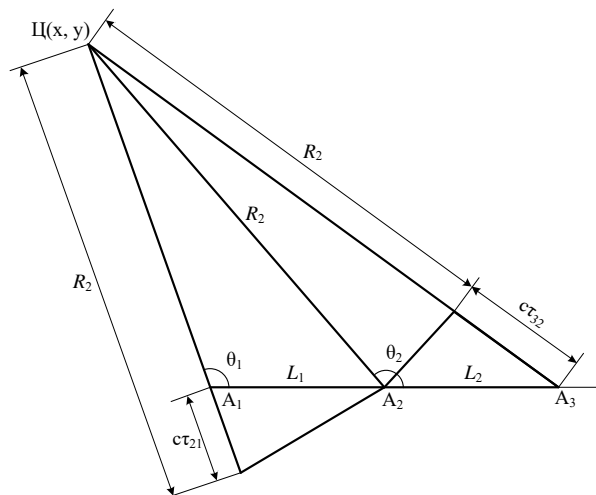


Рис. 1. Геометрия разностно-дальномерного метода

Необходимые соотношения для определения координат цели можно получить, используя теорему косинусов для треугольников $A_1A_2Ц$ и $A_1A_3Ц$ относительно угла θ_1 [11]:

$$\cos \theta_1 = \frac{(R_2 - c\tau_{21})^2 + L_1^2 - R_2^2}{2(R_2 - c\tau_{21})L_1}. \quad (1)$$

$$\cos \theta_1 = \frac{(R_2 - c\tau_{21})^2 + (L_1 + L_2)^2 - (R_2 + c\tau_{32})^2}{2(R_2 - c\tau_{21})(L_1 + L_2)}. \quad (2)$$

Приравнивая правые части (1) и (2) и приводя к общему знаменателю, получим:

$$((R_2 - c\tau_{21})^2 + L_1^2 - R_2^2)(L_1 + L_2) = ((R_2 - c\tau_{21})^2 + (L_1 + L_2)^2 - (R_2 + c\tau_{32})^2)L_1.$$

Раскроем скобки и упростим выражение:

$$\begin{aligned} & (R_2 - c\tau_{21})^2 L_1 + (R_2^2 - 2R_2 c\tau_{21} + (c\tau_{21})^2)L_2 + L_1^3 + L_1^2 L_2 - \\ & \quad - L_1 R_2^2 - L_2 R_2^2 = \\ & = (R_2 - c\tau_{21})^2 L_1 + L_1^3 + 2L_1^2 L_2 + L_1 L_2^2 - (R_2^2 + 2R_2 c\tau_{32} + (c\tau_{32})^2)L_1; \\ & \quad - 2R_2 c\tau_{21} L_2 + (c\tau_{21})^2 L_2 - L_1^2 L_2 - L_1 L_2^2 + 2R_2 c\tau_{32} L_1 + (c\tau_{32})^2 L_1 = 0. \end{aligned}$$

Оставим в левой части слагаемые, содержащие R_2 , и сделаем необходимые преобразования:

$$2R_2 L_1 L_2 \left(\frac{c\tau_{32}}{L_2} - \frac{c\tau_{21}}{L_1} \right) = L_1^2 L_2 \left(1 - \left(\frac{c\tau_{21}}{L_1} \right)^2 \right) + L_1 L_2^2 \left(1 - \left(\frac{c\tau_{32}}{L_2} \right)^2 \right).$$

Из последнего выражения при известных антенных базах L_1 и L_2 дальность от средней антенны до цели может быть определена в виде [2]:

$$R_2 = \frac{L_1 \left[1 - \left(\frac{c\tau_{21}}{L_1} \right)^2 \right] + L_2 \left[1 - \left(\frac{c\tau_{32}}{L_2} \right)^2 \right]}{2 \left(\frac{c\tau_{32}}{L_2} - \frac{c\tau_{21}}{L_1} \right)}. \quad (3)$$

При использовании симметричной антенной базы с $L_1 = L_2 = L$ формула (3) преобразуется к виду [1]:

$$R_2 = \frac{2L^2 - c^2(\tau_{21}^2 + \tau_{32}^2)}{2c(\tau_{32} - \tau_{21})}. \quad (4)$$

Направление на цель может быть определено по любой измеренной задержке с помощью теоремы косинусов. Например, используя τ_{21} , получим:

$$\theta_2(\tau_{21}) = 180^\circ - \arccos \frac{L_1^2 + 2R_2 c\tau_{21} - (c\tau_{21})^2}{2R_2 L_1}. \quad (5)$$

Координаты цели определяются из найденных величин:

$$x = R_2 \cos \theta_2; \quad y = R_2 \sin \theta_2. \quad (6)$$

Приведенные последние аналитические соотношения позволяют на практике по двум измеренным относительным задержкам τ_{21} и τ_{32} принятых сигналов рассчитать дальность, направление на цель и координаты цели в декартовой системе координат. Следует отметить, что при наличии трех антенн можно сформировать три пары относительных задержек (τ_{21} и τ_{32} ; τ_{21} и τ_{31} ; τ_{31} и τ_{32}), вычислить три раза координаты цели, и для повышения точности определения координат результаты усреднить.

Однако при практической реализации таких гидроакустических систем сложно добиться точной установки антенн в заданных координатах, особенно при базах антенных систем, составляющих сотни метров. Это приводит к снижению точности рассчитываемых параметров целей.

В связи с этим целесообразно рассмотреть случай произвольного (неколлинеарного и с неравными антенными базами), но известного расположения антенн для получения необходимых аналитических выражений для определения координат цели.

РДМ с неколлинеарным расположением антенн. Геометрию системы при неколлинеарном расположении антенн можно интерпретировать следующим образом. Крайние антенны соединить отрезком прямой. Затем найти геометрический центр этого отрезка и принять его за начало координат. Тогда можно считать, что положение центральной антенны смещено относительно этого центра на некоторое расстояние и под некоторым углом.

На рис. 2 изображена геометрия новой антенной системы, в которой центральная антенна смещена из точки A_2 в точку A_2' на расстояние Δ_a под углом θ_a к прямой, соединяющей антенны A_1 и A_3 .

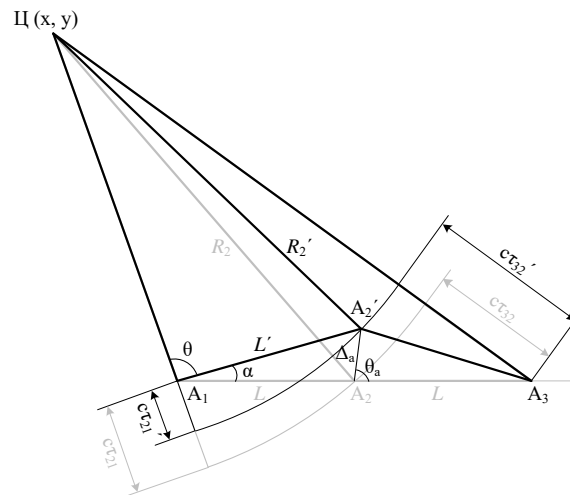


Рис. 2. Геометрия антенной системы с произвольным расположением антенн

На рис. 2 введены следующие обозначения:

A_2' – точка расположения смещенной центральной антенны;

A_2 – начало координат и центр отрезка, соединяющего антенны A_1 и A_3 ;

R_2' – дальность до цели от смещенной центральной антенны;

θ – направление на цель от первой антенны;

L – расстояние между точками A_1 и A_2 ;

L' – расстояние между антеннами A_1 и A_2' ;

Δ_a – расстояние между точками A_2 и A_2' (смещение центральной антенны);

α – угол отклонения центральной антенны с вершиной в точке A_1 ;

θ_a – угол отклонения центральной антенны с вершиной в точке A_2 ;

τ_{21}' – задержка сигнала на второй антенне относительно первой;

τ_{32}' – задержка сигнала на третьей антенне относительно второй.

По известным координатам антенн рассчитываются параметры Δ_a , θ_a и L . Антенная база L определяется как половина расстояния между антеннами A_1 и A_3 .

При смещении центральной антенны изменяется размер антенной базы между антеннами A_1 и A_2 . Новое значение рассчитывается по теореме косинусов:

$$L' = \sqrt{L^2 + \Delta_a^2 - 2L\Delta_a \cos(\pi - \theta_a)} = \sqrt{L^2 + \Delta_a^2 + 2L\Delta_a \cos \theta_a}. \quad (7)$$

Согласно следствию из теоремы косинусов, угол α равен:

$$\alpha = \arccos \frac{L^2 + L'^2 - \Delta_a^2}{2LL'}. \quad (8)$$

Аналогично для треугольника $\triangle A_1 A_2'$ относительно угла θ :

$$\cos \theta = \frac{(R_2' - c\tau_{21}')^2 + L'^2 - R_2'^2}{2(R_2' - c\tau_{21}')L'} \quad (9)$$

и для треугольника $\triangle A_1 A_3$ относительно угла $(\theta + \alpha)$:

$$\cos(\theta + \alpha) = \frac{(R_2' - c\tau_{21}')^2 + 4L^2 - (R_2' + c\tau_{32}')^2}{2(R_2' - c\tau_{21}')2L}. \quad (10)$$

Представим косинус суммы в виде:

$$\cos\theta \cos\alpha - \sqrt{1 - \cos^2\theta} \sin\alpha = \frac{(R_2' - c\tau_{21}')^2 + 4L^2 - (R_2' + c\tau_{32}')^2}{2(R_2' - c\tau_{21}')2L}$$

Подставим (9) и упростим выражение, раскрыв скобки:

$$\begin{aligned} & \frac{(c\tau_{21}')^2 + L'^2 - 2R_2' c\tau_{21}'}{2(R_2' - c\tau_{21}')L'} \cos\alpha - \sqrt{1 - \left(\frac{(c\tau_{21}')^2 + L'^2 - 2R_2' c\tau_{21}'}{2(R_2' - c\tau_{21}')L'} \right)^2} \sin\alpha = \\ & = \frac{(c\tau_{21}')^2 + 4L^2 - (c\tau_{32}')^2 - 2R_2'(c\tau_{21}' + c\tau_{32}')}{2(R_2' - c\tau_{21}')2L}. \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, необходимо решить уравнение (11) относительно R_2' . Решение получено с помощью встроенных функций среды MATLAB:

$$R_2' = \frac{(A - B \cos \alpha + 2LL' \sin \alpha \sqrt{C})}{D}, \quad (12)$$

где A , B , C и D определяются выражениями:

$$A = 4L^2(c\tau_{21}')^3 + L'^2((c\tau_{21}')^3 - (c\tau_{32}')^3) + 4L^2L'(2c\tau_{21}'\cos^2\alpha + c\tau_{32}' + L'2c\tau_{21}'c\tau_{32}'c\tau_{21}' - c\tau_{32}'); \quad (13)$$

$$B = 4LL'c\tau_{21}'((c\tau_{21}')^2 + 2L^2) + 2LL'^3(c\tau_{21}' + c\tau_{32}') - 2LL'c\tau_{21}'c\tau_{32}'(c\tau_{32}' - c\tau_{21}'); \quad (14)$$

$$C = (L^2 - (c\tau_{21}')^2)(2L - c\tau_{21}' - c\tau_{32}')(2L + c\tau_{21}' + c\tau_{32}')(4L^2 - 4LL'\cos\alpha + L'2 - c\tau_{32}'2); \quad (15)$$

$$D = 4L^2(2(c\tau_{21}')^2 - L'^2) + 2L'^2((c\tau_{21}')^2 + (c\tau_{32}')^2) + 4L'^2(c\tau_{21}'c\tau_{32}' + L^2 \cos 2\alpha) - 8LL'c\tau_{21}' \cos \alpha (c\tau_{21}' + c\tau_{32}'). \quad (16)$$

Так как начало координат находится в точке A_2 , то координаты цели определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} x &= (R_2' - c\tau_{21}') \cos(\theta + \alpha) - L; \\ y &= (R_2' - c\tau_{21}') \sin(\theta + \alpha). \end{aligned} \quad (17)$$

Полученные аналитические соотношения реализуются в виде алгоритма определения координат целей РДМ с учетом неточностей установки гидроакустических антенн.

Приведенный алгоритм представляет практическую ценность для разработчиков гидроакустических систем, так как позволяет рассчитать дальность, направление и координаты цели для случая неколлинеарного расположения антенн с разными антенными базами.

Для проверки правильности математических соотношений, полученных с использованием встроенных функций среды MATLAB, для РДМ с учетом неточностей установки ПГА определим аналитическим способом из полученных соотношений известные выражения для классического метода определения координат объектов – РДМ с коллинеарным расположением антенн.

Для этого положим $\alpha = 0$, $L' = L$. Тогда из (12) имеем для расстояния от цели до центральной второй антенны:

$$R_{20}' = \frac{(A_0 - B_0)}{D_0}, \quad (18)$$

где A_0 , B_0 и D_0 определяются выражениями:

$$\begin{aligned} A_0 &= 4L^2(c\tau_{21}')^3 + L^2((c\tau_{21}')^3 - (c\tau_{32}')^3) + \\ &+ 4L^4(2c\tau_{21}' + c\tau_{32}') + L^2c\tau_{21}'c\tau_{32}'(c\tau_{21}' - c\tau_{32}') = \\ &= 5L^2(c\tau_{21}')^3 + 8L^4c\tau_{21}' - L^2(c\tau_{32}')^3 + 4L^4c\tau_{32}' \\ &+ L^2c\tau_{21}'c\tau_{32}'(c\tau_{21}' - c\tau_{32}'); \end{aligned} \quad (19)$$

$$B_0 = 4L^2(c\tau_{21}')^3 + 10L^4c\tau_{21}' + 2L^4c\tau_{32}' + 2L^2c\tau_{21}'c\tau_{32}'(c\tau_{21}' - c\tau_{32}'); \quad (20)$$

$$\begin{aligned} D_0 &= 8L^2(c\tau_{21}')^2 - 4L^4 + 2L^2(c\tau_{21}')^2 + 2L^2(c\tau_{32}')^2 + 4L^2c\tau_{21}'c\tau_{32}' + \\ &+ 4L^4 - 8L^2(c\tau_{21}')^2 - 8L^2c\tau_{21}'c\tau_{32}' = \\ &= 2L^2(c\tau_{21}')^2 + 2L^2(c\tau_{32}')^2 - 4L^2c\tau_{21}'c\tau_{32}' = 2L^2(c\tau_{21}' - c\tau_{32}')^2. \end{aligned} \quad (21)$$

Находим разность $(A_0 - B_0)$:

$$\begin{aligned} A_0 - B_0 &= 5L^2(c\tau_{21}')^3 + 8L^4c\tau_{21}' - L^2(c\tau_{32}')^3 + 4L^4c\tau_{32}' - \\ &- 4L^2(c\tau_{21}')^3 - 10L^4c\tau_{21}' - 2L^4c\tau_{32}' - L^2c\tau_{21}'c\tau_{32}'(c\tau_{21}' - c\tau_{32}') = \\ &= L^2(c\tau_{21}' - c\tau_{32}')[(c\tau_{21}')^2 + c\tau_{21}'c\tau_{32}' + (c\tau_{32}')^2] - \\ &- L^2(c\tau_{21}' - c\tau_{32}')c\tau_{21}'c\tau_{32}' + 2L^2 = \\ &= L^2(c\tau_{21}' - c\tau_{32}')[(c\tau_{21}')^2 + (c\tau_{32}')^2 - 2L^2]. \end{aligned} \quad (22)$$

Подставляя полученные после преобразований для D_0 и $(A_0 - B_0)$ выражения (21) и (22) в формулу (18), получим:

$$\begin{aligned} R_2' &= \frac{L^2(c\tau_{21}' - c\tau_{32}')[(c\tau_{21}')^2 + (c\tau_{32}')^2 - 2L^2]}{2L^2(c\tau_{21}' - c\tau_{32}')^2} = \\ &= \frac{[(c\tau_{21}')^2 + (c\tau_{32}')^2 - 2L^2]}{2c(\tau_{21} - \tau_{32}')}. \end{aligned} \quad (23)$$

Последнее выражение (23) полностью совпадает с формулой (4), что подтверждает правильность полученных аналитических соотношений.

Заключение. Таким образом, на основе приведенных выше аналитических соотношений получен алгоритм определения координат целей РДМ с учетом неточностей установки гидроакустических антенн, предназначенный для использования в перспективных гидроакустических системах и комплексах [12–21].

Следует отметить, что при реализации рассматриваемого алгоритма определения координат целей в пассивной гидролокации необходимо учитывать факторы, связанные со средой распространения: профиль скорости звука, глубину и наклон дна, возможные многократные отражения сигналов от дна и поверхности мелкого моря, а также всегда существующую неопределенность точного положения антенн и некомпенсированный эффект Доплера, обусловленный движением цели [1, 3].

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. *Марьев А.А., Маркович И.И., Завтур Е.Е.* Исследование погрешностей разностно-дальномерного метода пассивной локации // *Излучение и рассеяние электромагнитных волн: Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-2015.* – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 391-395.
5. *Ширман Я.Д., Манжос В.Н.* Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
6. *Черняк В.С.* Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
7. *Беляевский Л.С., Новиков В.С., Олянюк П.В.* Основы радионавигации: учебник для вузов гражд. авиации. – М.: Транспорт, 1982. – 288 с.
8. *Quazi A.H., Lerro D.T.* Passive localization using Time-Delay Estimates with Sensor Positional Errors // *J. Acoust. Soc. Amer.* – 1985. – Vol. 78, No. 5. – P. 1664-1670.
9. *Hassab I.C.* The Effect of Uncertainty in the Heading or Placement of a Subarray on Passive Ranging Accuracy // *J. Acoust. Soc. Amer.* – 1984. – Vol. 75, No. 2. – P. 479-485.
10. *Ворошилин Е.П., Миронов М.В., Громов В.А.* Определение координат источников радиозлучения разностно-дальномерным методом с использованием группировки низкоорбитальных малых космических аппаратов // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.* – Томск: Изд-во ТУСУР, 2010. – № 1 (21). – Ч. 2. – С. 23–28.
11. *Понарин Я. П.* Элементарная геометрия: В 2 т. – Т. 1: Планиметрия, преобразования плоскости. – М.: МЦНМО, 2004. – 312 с.
12. *Маркович И.И., Семеняк П.Л.* Перспективные методы и алгоритмы, системы и устройства цифрового формирования и пространственно-временной обработки сигналов и изображений в практических разработках НКБ цифровой обработки сигналов ЮФУ // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2008. – № 12 (89). – С. 79-88.
13. *Маркович И.И., Ковалев Э.П., Семеняк П.Л., Коваленко Е.И.* Гидроакустические средства исследования океана. Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2009) // *Материалы XI Международной научно-технической конференции.* – М.: Океанология, 2009. – С. 207-210.
14. *Маркович И.И.* Цифровая пространственно-временная обработка сигналов в гидроакустических средствах исследования океана // *Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления».* – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – С. 125-129.
15. *Маркович И.И.* Цифровая пространственно-временная обработка сигналов в гидроакустических системах и комплексах. Подводные технологии и средства освоения Мирового океана / под ред. Н. Спасского. – М.: Изд. дом «Оружие и технологии», 2011. – С. 366-373.
16. *Маркович И.И., Махонин Г.М., Дорошенко В.Ю.* Локация навигационно опасных неровностей дна // *Сб. трудов научной конференции «Сессия научного совета РАН по акустике и XXIV сессия Российского акустического общества».* – М.: ГЕОС, 2011. – Т. 2. – С. 222-225.
17. *Маркович И.И., Махонин Г.М., Черниковская Г.Л., Дорошенко В.Ю.* Оценка параметров и формы гидролокационных целей // *Сб. трудов научной конференции «Сессия научного совета РАН по акустике и XXIV сессия Российского акустического общества».* – М.: ГЕОС, 2011. – Т. 2. – С. 225-229.
18. *Маркович И.И.* Цифровая обработка сигналов в системах и устройствах: монография. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2012. – 236 с.

19. Маркович И.И. Методы и алгоритмы цифровой пространственно-временной обработки гидроакустических сигналов в многолучевых эхолотах и локаторах препятствий // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – СПб.: Наука, 2014. – Т. 7, № 2. – С. 58-71.
20. Маркович И.И., Душенин Ю.В. Применение многолучевых гидроакустических средств с цифровой пространственно-временной обработкой для экологического мониторинга водных районов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 12 (173). – С. 85-98.

REFERENCES

1. Koryakin Yu.A., Smirnov S.A., Yakovlev G.V. Korabel'naya gidroakusticheskaya tekhnika: Sostoyanie i aktual'nye problemy [Ship-based hydroacoustic technology: Status 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]. Moscow: Mir, 1985, pp. 415-421.
4. Mar'ev A.A., Markovich I.I., Zavtur E.E. Issledovanie pogreshnostey raznostno-dal'nomernogo metoda passivnoy lokatsii [Investigation of errors in the range-ranging method of passive location], *Izluchenie i rasseyanie elektromagnitnykh voln: Trudy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Izluchenie i rasseyanie elektro-magnitnykh voln» IREMV-2015* [Proceedings of International Scientific Conference «Radiation and scattering of electromagnetic waves» IREMV-2015]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 391-395.
5. Shirman Ya.D., Manzhos V.N. Teoriya i tekhnika obrabotki radiolokatsionnoy informatsii na fone pomekh [Theory and technique of radar information processing against background noise]. Moscow: Radio i svyaz', 1981, 416 p.
6. Chernyak V.S. Mnogopozitsionnaya radiolokatsiya [Multi-position radar ranging]. Moscow: Radio i svyaz', 1993, 416 p.
7. Belyaevskiy L.S., Novikov V.S., Olyanyuk P.V. Osnovy radionavigatsii: uchebnik dlya vuzov grazhd. aviatsii [Fundamentals of radio navigation: Textbook for civil aviation high schools]. Moscow: Transport, 1982, 288 p.
8. Quazi A.H., Lerro D.T. Passive localization using Time-Delay Estimates with Sensor Positional Errors, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1985, Vol. 78, No. 5, pp. 1664-1670.
9. Hassab I.C. The Effect of Uncertainty in the Heading or Placement of a Subarray on Passive Ranging Accuracy, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1984, Vol. 75, No. 2, pp. 479-485.
10. Voroshilin E.P., Mironov M.V., Gromov V.A. Opredelenie koordinat istochnikov radioizlucheniya raznostno-dal'nomernym metodom s ispol'zovaniem gruppировки nizkoorbital'nykh malykh kosmicheskikh apparatov [Determination of the radio emission sources coordinates by a distance-ranging method using the grouping of low-orbit small spacecraft], *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics]. Tomsk: Izd-vo TUSUR, 2010, No. 1 (21), Part 2, pp. 23-28.
11. Ponarin Ya.P. Elementarnaya geometriya [Elementary geometry]: In 2 vol. Vol. 1: Planimetriya, preobrazovaniya ploskosti [Planimetry, plane transformation]. Moscow: MTsNMO, 2004, 312 p.
12. Markovich I.I., Semenyak P.L. Perspektivnye metody i algoritmy, sistemy i ustroystva tsifrovogo formirovaniya i prostranstvenno-vremennoy obrabotki signalov i izobrazheniy v prakticheskikh razrabotkakh NKB tsifrovoy obrabotki signalov YuFU [Perspective methods and algorithms, systems and devices of signal formation, propagation and space-time signal processing and selections in practical developments in the NCS of digital signal processing], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]. Taganrog: TTI YuFU, 2008, No. 12 (89), pp. 79-88.
13. Markovich I.I., Kovalev E.P., Semenyak P.L., Kovalenko E.I. Gidroakusticheskie sredstva issledovaniya okeana. Sovremennye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovaniy (MSOI-2009) [Hydroacoustic means of ocean research. Modern methods and means of oceanological research MSOI-2009], *Materialy XI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnikeskoy konferentsii* [Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference MSOI-2009]. Moscow: Okeanologiya, 2009, pp. 207-210.

14. *Markovich I.I.* Tsifrovaya prostranstvenno-vremennaya obrabotka signalov v gidroakusticheskikh sredstvakh issledovaniya okeana [Digital space-time signal processing in hydroacoustic means of ocean research], *Materialy V Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Proceedings of the All-Russian Scientific-Practical Conference «Perspective systems and management tasks»]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2010, pp. 125-129.
15. *Markovich I.I.* Tsifrovaya prostranstvenno-vremennaya obrabotka signalov v gidroakusticheskikh sistemakh i kompleksakh. Podvodnye tekhnologii i sredstva osvoiniya Mirovogo okeana [Digital space-time signal processing in sonar systems and complexes. Underwater technologies and the oceans development means], ed. by N. Spasskogo. Moscow: Izd. dom «Oruzhie i tekhnologii», 2011, pp. 366-373.
16. *Markovich I.I., Makhonin G.M., Doroshenko V.Yu.* Lokatsiya navigatsionno opasnykh nerovnostey dna [The navigation of dangerous bottom irregularities], *Sb. trudov nauchnoy konferentsii «Sessiya nauchnogo soveta RAN po akustike i XXIV sessiya Rossiyskogo akusticheskogo obshchestva»* [Proceedings of the Scientific Conference «Session of the Scientific Council of the RAS Acoustics and SSC Session of the Russian Acoustical Society»]. Moscow: GEOS, 2011, Vol. 2, pp. 222-225.
17. *Markovich I.I., Makhonin G.M., Chernikhovskaya G.L., Doroshenko V.Yu.* Otsenka parametrov i formy gidrolokatsionnykh tseley [Estimation of parameters and forms of radar targets], *Sb. trudov nauchnoy konferentsii «Sessiya nauchnogo soveta RAN po akustike i XXIV sessiya Rossiyskogo akusticheskogo obshchestva»* [Proceedings of the Scientific Conference «Session of the Scientific Council of the RAS Acoustics and SSC Session of the Russian Acoustical Society»]. Moscow: GEOS, 2011, Vol. 2, pp. 225-229.
18. *Markovich I.I.* Tsifrovaya obrabotka signalov v sistemakh i ustroystvakh: monografiya [Digital signal processing systems and devices: monograph]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2012, 236 p.
19. *Markovich I.I.* Metody i algoritmy tsifrovoy prostranstvenno-vremennoy obrabotki gidroakusticheskikh signalov v mnogoluchevykh ekholotakh i lokatorakh prepyatstviy [Methods and algorithms of digital space-time processing of multibeam sonar signals in multibeam echo sounders and obstacles sonars], *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and Applied Hydrophysics]. Saint Petersburg: Nauka, 2014, Vol. 7, No. 2, pp. 58-71.
20. *Markovich I.I., Dushenin Yu.V.* Primenenie mnogoluchevykh gidroakusticheskikh sredstv s tsifrovoy prostranstvenno-vremennoy obrabotkoy dlya ekologicheskogo monitoringa vodnykh rayonov [Application of multi-beam hydroacoustic means with digital space-time processing for ecological monitoring of water areas], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 12 (173), pp. 85-98.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.М. Гаврилов.

Маркович Игорь Ильич – Научное конструкторское бюро цифровой обработки сигналов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет»; e-mail: marko@sfedu.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 88634394055; директор-главный конструктор; к.т.н.; с.н.с.

Завтур Евгений Евгеньевич – e-mail: dsp@sfedu.ru; тел.: 88634393075; конструктор 1 категории.

Markovich Igor I'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; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634394055; director-chief designer; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Zavtur Evgeniy Evgen'evich – e-mail: dsp@sfedu.ru; phones: +78634393075; designer of the 1st cat.