

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-143-150

УДК 534.612

EDN: GBSRTJ

В.А. Калью¹, Н.В. Краснописцев², Г.И. Лосев², В.Н. Некрасов²,
В.В. Петрова¹, Д.А. Смирнов¹

¹ ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

² ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений»,
Московская область, Россия

Авторы выражают благодарность В.Д. Морозову за внимание к работе и ценные замечания.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКА АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ КОМБИНИРОВАННОГО ПРИЕМНИКА

Объект и цель научной работы. Процедура определения координат места повышенного излучения с помощью комбинированных приемников акустического давления и колебательной скорости, измеряющих направление вектора плотности потока акустической мощности. Цель – оценка точности получаемого результата измерения.

Материалы и методы. Теоретические оценки точности результата, натурный эксперимент по определению координаты эталонного излучателя, помещенного в заданную точку.

Основные результаты. Получены оценки погрешности определения координаты места повышенного излучения с учетом погрешности входных данных и неравноточности усредняемых результатов отдельных наблюдений. Показано, что фактическое отклонение результата определения координат места излучения от известного заданного значения не превосходит теоретических значений погрешности.

Заключение. Результаты исследования показывают, что теоретические оценки погрешности определения координаты места повышенного излучения с помощью комбинированного приемника могут быть приняты в качестве приписанных характеристик точности метода, применяемого для решения данной задачи.

Ключевые слова: звуковое давление, колебательная скорость, векторный приемник, вектор плотности потока акустической мощности, координаты источника излучения, погрешность метода, точность локализации источника излучения.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

SHIP SIGNATURES

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-143-150

UDC 534.612

EDN: GBSRTJ

V.A. Kalyu¹, N.V. Krasnopistsev², G.I. Losev², V.N. Nekrasov², V.V.
Petrova¹, D.A. Smirnov¹

¹ Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

² Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Research Institute of Physical, Technical and Radio Engineering»
(VNIIFTRI), Moscow region, Russia

The authors are grateful to V.D. Morozov for his attention to the study and important comments.

RESEARCH OF THE ACCURACY OF ACOUSTIC RADIATION SOURCE LOCALIZATION USING A COMBINED RECEIVER

Для цитирования: Калью В.А., Краснописцев Н.В., Лосев Г.И., Некрасов В.Н., Петрова В.В., Смирнов Д.А. Исследование точности локализации источника акустического излучения с помощью комбинированного приемника. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 3(405): 143–150.

For citations: Kalyu V.A., Krasnopistsev N.V., Losev G.I., Nekrasov V.N., Petrova V.V., Smirnov D.A. Research of the accuracy of acoustic radiation source localization using a combined receiver. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 3(405): 143–150 (in Russian).

Object and purpose of research. The procedure for localization of increased radiation coordinates using combined acoustic pressure and vibrational velocity receivers that measure the direction of the sound intensity vector. Assessment of the resulting measurement result accuracy.

Materials and methods. Theoretical estimates of the result accuracy, a full-scale experiment to determine the coordinates of a reference emitter placed at a given point.

Main results. Estimates of the error in determining the coordinate of the site of increased radiation are obtained, taking into account the error of the input data and the unequal accuracy of the averaged results of individual observations. It is shown that the actual deviation of the result of determining the coordinates of the radiation site from the known given value does not exceed the theoretical values of the error.

Conclusion. The results of the study show that theoretical estimates of the error in determining the coordinate of the increased radiation site using a combined receiver can be taken as the assigned characteristics of the accuracy of the method used to solve this problem.

Keywords: sound pressure, vibrational velocity, vector receiver, sound intensity vector, radiation source coordinates, method error, radiation source localization accuracy.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Локализация источников повышенного акустического излучения на корпусе морского объекта (МО) – сложная задача, которую приходится решать при диагностике судовых и промышленных систем и механизмов. Эффективность локализации определяется той точностью, с которой можно оценить координаты мест повышенного излучения на корпусе.

Один из методов локализации реализуется с использованием комбинированных приемников, позволяющих измерять не только звуковое давление $P(\vec{r}, t)$, но и составляющие вектора колебательной скорости частиц среды $\vec{V}(\vec{r}, t)$. Измерение обеих этих компонент и их комбинаций [1–3] позволяет сформировать пространственную избирательность приемной комбинированной системы, что может быть использовано для выделения гидроакустического сигнала отдельного источника на фоне окружающих помех [4].

Для решения задачи локализации источника шумоизлучения можно применять усредненную за время t плотность потока акустической мощности в точке размещения приемника:

$$\bar{P}(\vec{r}, t) = \frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} P(\vec{r}, t) \vec{V}(\vec{r}, t) dt. \quad (1)$$

Компоненты вектора $\bar{P}(\vec{r}, t)$ позволяют выделять мощность акустической волны, приходящей в точку приема с выбранного направления, а также определять направление на источник наибольшей акустической мощности.

Формулировка задачи

Problem formulation

Задача представленного в настоящей статье исследования состоит в оценке точности локализации источника акустического излучения с помощью комбинированного приемника и экспериментальной проверке этой оценки по результатам натурных испытаний.

Измеряемой величиной является координата центра зоны на корпусе МО, характеризующейся максимальным излучением выбранной компоненты спектра его подводного шума. Данная координата определяется в метрах вдоль корпуса МО относительно выбранной опорной точки. Схема взаимного расположения приемных модулей (ПМ) и МО представлена на рис. 1.

На рис. 1 использованы следующие обозначения: s_1, s_2 – отстояние вертикальных осей приемных модулей 1, 2 от опорной точки на корпусе МО:

$$\begin{aligned} s_1 &= d + h_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma_1, \\ s_2 &= d + S - h_2 \cdot \operatorname{tg} \gamma_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где S – расстояние между реперными излучателями И1 и И2; d – расстояние от опорной точки «0» до реперного излучателя И1; γ_1, γ_2 – углы между вертикальными осями приемных модулей ПМ1 и ПМ2 и направлениями на реперные излучатели И1 и И2 соответственно; h_1, h_2 – разности глубин погружения килля МО и соответствующих приемных модулей; θ_1, θ_2 – углы между направлениями на зону повышенного излучения и перпендикуляром к корпусу МО, определяемые модулями 1 и 2 соответственно;

$$\begin{aligned} l_1^* &= h_1 \cdot \operatorname{tg} \theta_1, \\ l_2^* &= h_2 \cdot \operatorname{tg} \theta_2. \end{aligned} \quad (3)$$

В системе координат с началом в опорной точке «0» координаты центра зоны повышенного излучения l_1, l_2 вычисляются по формулам (4–5):

$$l_1 = s_1 + h_1 \cdot \operatorname{tg} \theta_1, \quad (4)$$

$$l_2 = s_2 - h_2 \cdot \operatorname{tg} \theta_2. \quad (5)$$

Как видно, оценки координат l зависят от величины угла θ , соответственно погрешность оценки $\delta l \approx \frac{1}{\cos^2 \theta}$. Т.е. различные оценки l_1 и l_2 не будут равнозначными, и среднее значение \bar{l} будет вычисляться как средневзвешенное по формуле (6)

$$\bar{l} = g_1 l_1 + g_2 l_2, \quad (6)$$

где веса измерений

$$g_1 = \frac{\cos^4 \theta_1}{\cos^4 \theta_1 + \cos^4 \theta_2},$$

$$g_2 = \frac{\cos^4 \theta_2}{\cos^4 \theta_1 + \cos^4 \theta_2},$$

$$g_1 + g_2 = 1.$$

Теоретическое исследование

Theoretical study

Поскольку измерение значения \bar{l} является косвенным, погрешность измерения $\delta \bar{l}$ зависит от погрешностей измерения величин $\Delta_i, h_i, \operatorname{tg} \theta_i$ ($i = 1, 2$) и с учетом того, что

$$|\delta \Delta_1| = |\delta \Delta_2| = \delta \Delta,$$

$$|\delta h_1| = |\delta h_2| = \delta h,$$

$$|\delta \operatorname{tg} \theta_1| = |\delta \operatorname{tg} \theta_2| = \delta \operatorname{tg} \theta,$$

получаем

$$\delta \bar{l} = (\delta \Delta) + (\delta h) \frac{\operatorname{tg} \theta_1 + \operatorname{tg} \theta_2}{2} + (\delta \operatorname{tg} \theta) \frac{h_1 + h_2}{2}. \quad (7)$$

С учетом формулы взвешенного усреднения (6) максимальное значение погрешности имеет место, когда $\theta_1 \approx \theta_2$. Полагая при этом $h = \frac{h_1 + h_2}{2}$, можно записать:

$$\delta \bar{l} = (\delta \Delta) + \frac{1}{2} (\delta h) \frac{\Delta_2}{h} + (\delta \operatorname{tg} \theta) h, \quad (8)$$

$$\text{где } \delta \operatorname{tg} \theta = \frac{1}{\cos^2 \theta} \delta \theta.$$

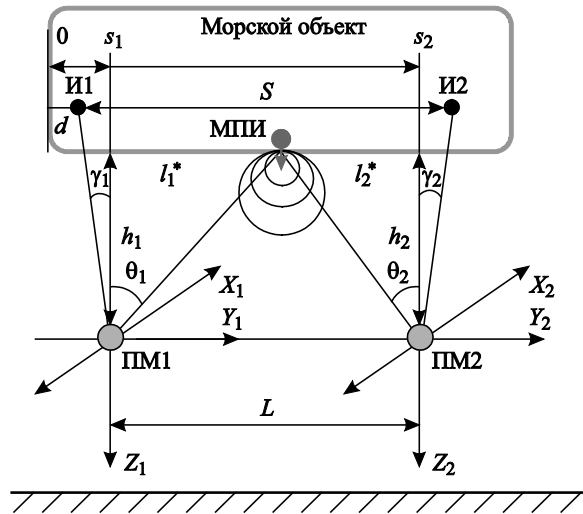


Рис. 1. Общая схема расположения приемных модулей и морского объекта

Fig. 1. General layout of receiving modules and marine object

Значения параметров измерений определяются по результатам испытаний, описанных ниже.

Граница погрешности измерения величины \bar{l} в соответствии с [5] определится как

$$\Delta \bar{l} = 1,1 \sqrt{(\delta \Delta)^2 + h^2 (\delta \operatorname{tg} \theta)^2 + (\delta h)^2 \left(\frac{\Delta_2}{2h} \right)^2}. \quad (9)$$

Описание натурального эксперимента

Description of the field experiment

Натурный эксперимент проводился в бухте с глубинами 20–70 м. Измерительно-регистрационная аппаратура размещалась внутри судна, стоящего у пирса, к ней подключались кабельные линии связи (КЛС) и приемные модули.

С помощью катера приемные модули ПМ-1 и ПМ-2 были поочередно отбуксированы с синхронным вытравливанием кабельных линий связи на дистанцию 30–40 м от пирса. Затем они были заглублены в акватории с помощью промежуточных грузов, закрепляемых на КЛС в 12 м от ПМ. В заранее определенном месте металлического корпуса судна был установлен виброизлучатель (РИВ). С борта была спущена пара разнесенных на известную дистанцию гидроакустических реперных излучателей (РИГ), работавших на разных частотах в режиме излучения тональных сигналов. На основе

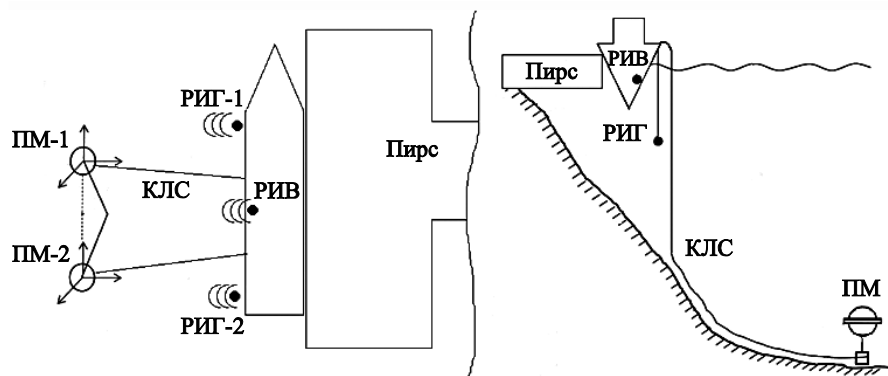


Рис. 2. Схема натурального эксперимента

Fig. 2. Scheme of a full-scale experiment

информации с ПМ1 и ПМ2 определялись местоположение каждого из реперных излучателей и их взаимное расположение вдоль корпуса судна.

Схема натурального эксперимента представлена на рис. 2.

Описание алгоритма обработки данных

Description of data processing algorithm

Алгоритм обработки натуральных данных выглядит следующим образом. Вычисляются геометрические характеристики, необходимые для определения искомой координаты расположения места излучения (рис. 3–4).

Определяются углы направлений на реперные излучатели РИГ-1, РИГ-2 для ПМ-1 и ПМ-2 относительно направления на север: φ_{10} , φ_{20} , $\varphi_{11} + \varphi_{12}$, $\varphi_{21} + \varphi_{22}$.

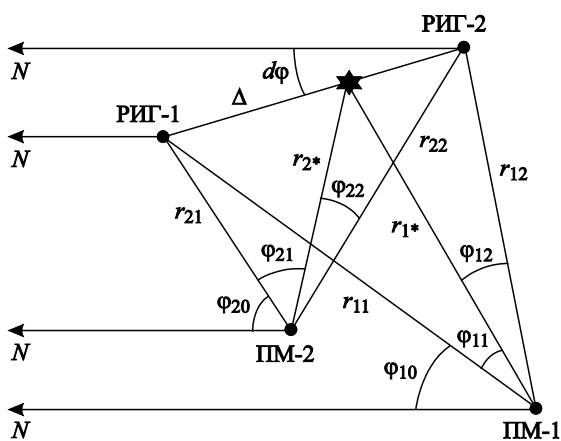


Рис. 3. Схема расположения приемных модулей и реперных излучателей при измерении

Fig. 3. Layout of receiving modules and reference emitters when measuring

Измеряется расстояние между реперными излучателями S .

Измеряется угол между направлением на север и линией, соединяющей реперные излучатели, $d\varphi$.

Для определения расстояний r_{11} , r_{12} , r_{21} , r_{22} записываем систему уравнений:

$$S^2 = r_{11}^2 + r_{12}^2 - 2r_{11}r_{12} \cdot \cos(\varphi_{11} + \varphi_{12}), \quad (10)$$

$$S^2 = r_{21}^2 + r_{22}^2 - 2r_{21}r_{22} \cdot \cos(\varphi_{21} + \varphi_{22}),$$

$$S \cdot \cos(d\varphi) = r_{11} \cdot \cos\varphi_{10} + r_{12} \cdot \cos(180^\circ - \varphi_{10} - \varphi_{11} - \varphi_{12}),$$

$$S \cdot \cos(d\varphi) = r_{21} \cdot \cos\varphi_{20} + r_{22} \cdot \cos(180^\circ - \varphi_{20} - \varphi_{21} - \varphi_{22}).$$

Эта система уравнений сводится к решению двух пар уравнений ($i = 1, 2$):

$$\left(1 + \frac{2 \cdot \cos \varphi_{i0} \cdot \cos(\varphi_{i1} + \varphi_{i2})}{\cos \alpha_i} + \cos(\varphi_{i1} + \varphi_{i2})\right) r_{i1}^2 - \frac{2S \cdot \cos d\varphi \left(\frac{\cos \varphi_{i0}}{\cos \alpha_i} + \cos(\varphi_{i1} + \varphi_{i2})\right)}{\cos \alpha_i} r_{i1} + S^2 \left(\frac{\cos^2 d\varphi}{\cos^2 \alpha_i} - 1\right) = 0; \quad (11)$$

$$r_{i2} = \frac{S \cdot \cos d\varphi - r_{i1} \cdot \cos \varphi_{i0}}{\cos \alpha_i},$$

где $\alpha_i = 180^\circ - \varphi_{i0} - (\varphi_{i1} + \varphi_{i2})$.

По результатам решений уравнений (11) вычисляются половины периметров треугольников с вершинами в точках расположения реперных излучателей и приемных модулей p_i :

$$p_i = \frac{1}{2}(S + r_{i1} + r_{i2}), \quad (12)$$

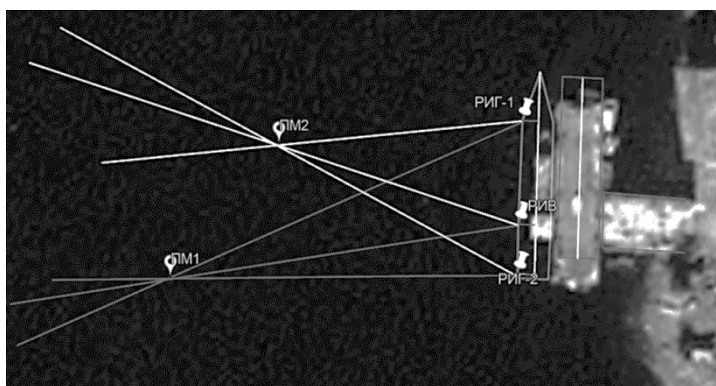
где $i = 1, 2$.

Вычисляются площади указанных треугольников S_i :

$$S_i = \sqrt{p_i(p_i - S)(p_i - r_{i1})(p_i - r_{i2})}. \quad (13)$$

Рис. 4. Направления потоков акустической мощности, найденные с применением приемных модулей, нанесенные на схему их постановки относительно исследуемого морского объекта с установленными излучателями

Fig. 4. The directions of sound intensity vectors found using the receiving modules plotted on the scheme of their setting relative to the studied marine object with installed emitters



Вычисляются высоты указанных треугольников h_i , являющиеся расстояниями от линии расположения источников до приемных модулей

$$h_i = \frac{2S_i}{S}. \quad (14)$$

Вычисляются углы между высотами треугольников и направлениями на реперные излучатели

$$\gamma_i = \arccos \frac{h_i}{r_{ii}}. \quad (15)$$

Вычисляются углы

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \varphi_{12} - \gamma_1, \\ \theta_2 &= \varphi_{21} - \gamma_2 \end{aligned} \quad (16)$$

и значения s_1, s_2 по формуле (2).

Определяется средневзвешенное значение координаты центра зоны повышенного шумоизлучения по формулам (3–6).

Анализ результатов исследования

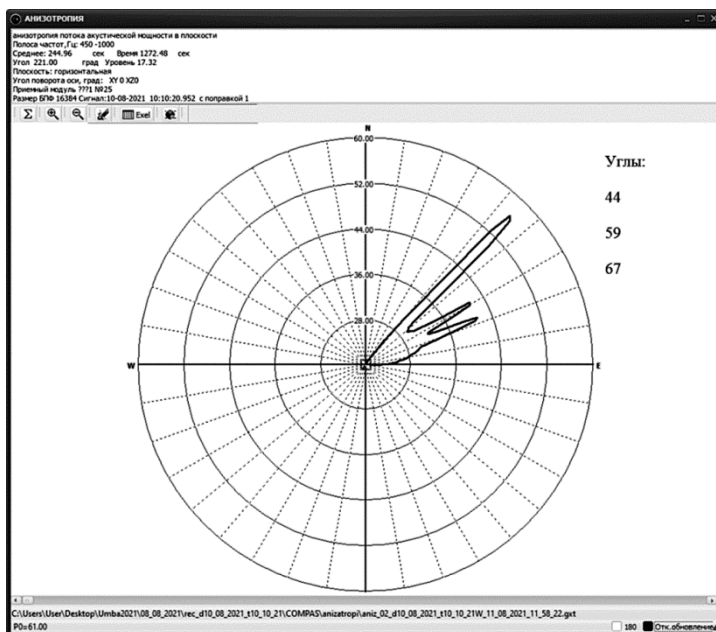
Study results analysis

Результаты измерений, выполненных в ходе натуральных испытаний, представлены на рис. 5–6 в форме диаграмм распределения направлений потока акустической мощности шумов и сигналов от источников, расположенных на борту МО. Каждая диаграмма построена в полосе частот от 450 до 1000 Гц с угловым разрешением 1° .

Измеренные значения углов и расстояния между реперными излучателями представлены в табл. 1.

Рис. 5. Диаграмма пространственного распределения потока акустической мощности, измеренной приемным модулем ПМ-1, построенная с осреднением 245 с

Fig. 5. Diagram of the spatial distribution of the sound intensity measured by the RM-1 receiving module, plotted with averaging 245 s



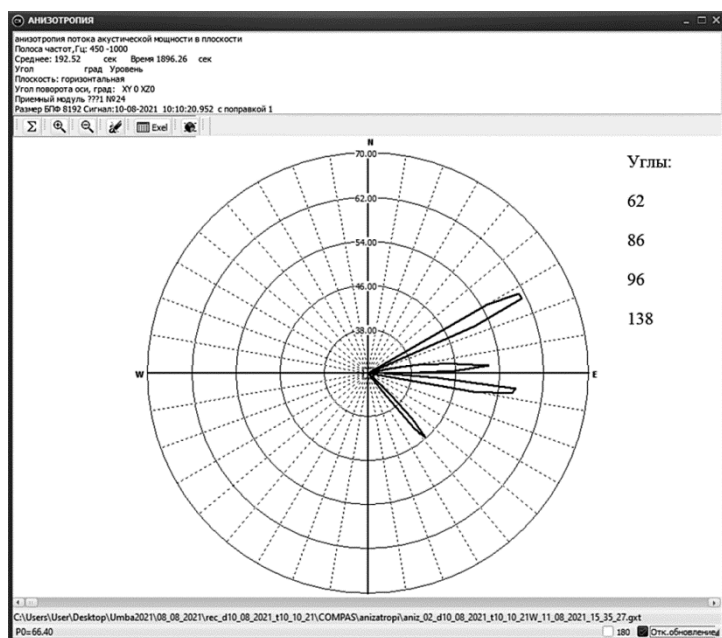


Рис. 6. Диаграмма пространственного распределения потока акустической мощности, измеренной приемным модулем ПМ-2, построенная с осреднением 192 с

Fig. 6. Diagram of the spatial distribution of the sound intensity measured by the RM-2 receiving module, plotted with averaging 192 s

Решение уравнений (11) дает значения, представленные в табл. 2.

Проверка практической реализуемости алгоритма поиска места излучения осуществлялась путем сравнения результата расчета координаты пробного

излучателя, помещенного в точку с известной координатой, со значением этой координаты.

Пробный излучатель помещался на линии, соединяющей реперные излучатели на расстоянии X_n от излучателя РИГ-1, равном $X_n = 21$ м.

Таблица 1. Измеренные значения углов между реперными излучателями

Table 1. Measured values of angles between reference emitters

	$d\varphi$	φ_{10}	φ_{20}	$\varphi_{11} + \varphi_{12}$	$\varphi_{21} + \varphi_{22}$	α_1	α_2
Градусы	25 ± 3	44 ± 3	62 ± 3	23 ± 3	34 ± 3	113 ± 3	84 ± 3
cos	0,91	0,72	0,45	0,92	0,82	-0,39	0,11

* Измеренное расстояние между реперными излучателями $S = 31 \pm 1$ м.

Таблица 2. Расчетные значения

Table 2. Calculated values

r_{12} , М	r_{11} , М	r_{21} , М	r_{22} , М	h_1 , М	h_2 , М
64 ± 6	71 ± 7	45 ± 5	51 ± 5	64 ± 6	44 ± 4

Таблица 3. Значения углов направления на пробный излучатель

Table 3. Values of the angles of direction to the test emitter

	φ_{11}	φ_{12}	φ_{21}	φ_{22}	θ_1	θ_2
Градусы	15 ± 3	8 ± 3	24 ± 3	10 ± 3	21 ± 3	6 ± 3

Углы направлений на пробный излучатель показаны на рис. 5–6, а их значения приведены в табл. 3. Там же указаны углы отклонений от вертикалей θ_1 , θ_2 (рис. 3), при этом:

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \varphi_{20} - \varphi_{21} + d\varphi - 90^\circ, \\ \theta_2 &= 90^\circ - \varphi_{10} - \varphi_{11} + d\varphi.\end{aligned}\quad (17)$$

Значения отстояния вертикальных осей приемных модулей ПМ1 и ПМ2 от опорной точки на корпусе морского объекта представлены в табл. 4.

В результате получены оценки координаты расположения пробного излучателя:

$$\begin{aligned}l_1 &= 21 \pm 5 \text{ м}, \\ l_2 &= 27 \pm 5 \text{ м}, \\ g_1 &= 0,44, \\ g_2 &= 0,56, \\ \bar{l} &= 9 + 15 = 24 \text{ м}.\end{aligned}$$

Отклонение от заданного значения составило 3 м.

По результатам натурального эксперимента получены оценки значений, приведенные в табл. 5.

Таким образом, полученное экспериментально значение координаты источника повышенного шумоизлучения на корпусе МО составило 24 м, что соответствует заданному значению координаты размещения пробного излучателя (21 м) в пределах оцененной теоретически погрешности измерений (6 м).

Заключение

Conclusion

В результате выполненного исследования получена теоретическая оценка точности локализации источника акустического излучения с помощью комбинированного приемника: соответствующая погрешность измерений составила 6 м.

Точность локализации, достигнутая экспериментально в ходе натуральных испытаний приемных модулей, составила 3 м, что не превосходит расчетного значения погрешности.

Список использованной литературы

1. Гордиенко В.А., Некрасов В.Н. Векторно-фазовые измерения в гидроакустике: некоторые аспекты использования потока акустической мощности для целей обеспечения единства гидроакустических измерений в условиях морских полигонов. Москва: ВНИИФТРИ, 2007. 451 с.
2. Kim K., Gabrielson T., Lauchle G. Development of an accelerometer-based underwater acoustic intensity

Таблица 4. Отстояние вертикальных осей приемных модулей 1, 2 от опорной точки на корпусе морского объекта

Table 4. Distance of the vertical axes of receiving modules 1, 2 from the reference point on the hull of the offshore object

$s_1, \text{ м}$	$s_2, \text{ м}$
1 ± 1	0 ± 1

Таблица 5. Составляющие погрешностей измерений

Table 5. Components of measurement errors

Величина	Значение
$s_2/2h$	0,3
θ	$\pi/4$
$\delta\Delta$	1 м
$\delta\theta$	3°
δh	5 м
$\delta \operatorname{tg} \theta$	0,1
$\Delta \bar{l}$	6 м

sensor // Journal of the Acoustical Society of America. 2004. Vol. 116, No. 6. P. 3384–3392. DOI: 10.1121/1.1804632.

3. Gabrielson T., Gardner D., Garrett S. A simple neutrally buoyant sensor for direct measurement of particle velocity and intensity in water // Journal of the Acoustical Society of America. 1995. Vol. 97, No. 4. P. 2227–2237. DOI: 10.1121/1.411948.
4. Калью В.А., Самылин Л.П. Оценка помехоустойчивости некоторых векторно-фазовых алгоритмов обработки при измерениях с помощью комбинированного приемника // Техническая акустика. 1999. Т. 5, № 3–4. С. 29–32.
5. ГОСТ Р 8.563-2009. Государственная система единства измерений. Методики (методы) измерений. Москва: Стандартинформ, 2010. 27 с.

References

1. Gordienko V.A., Nekrasov V.N. Vector-phase measurements in hydroacoustics. Moscow: VNIIFTRI, 2007. 451 p. (in Russian).
2. Kim K., Gabrielson T., Lauchle G. Development of an accelerometer-based underwater acoustic intensity sensor // Journal of the Acoustical Society of America. 2004. Vol. 116, No. 6. P. 3384–3392. DOI: 10.1121/1.1804632.

3. *Gabrielson T., Gardner D., Garrett S.* A simple neutrally buoyant sensor for direct measurement of particle velocity and intensity in water // *Journal of the Acoustical Society of America*. 1995. Vol. 97, No. 4. P. 2227–2237. DOI: 10.1121/1.411948.
4. *Kalyu V.A., Samylin L.P.* Evaluation of the noise immunity of some vector-phase processing algorithms during measurements using a combined receiver // *Tehnicheskaya Akustika*. 1999. Vol. 5, No. 3–4. P. 29–32 (*in Russian*).
5. GOST R 8.563-2009. State system for ensuring the uniformity of measurements. Procedures of measurements. Moscow : Standartinform, 2010. 27 p. (*in Russian*).

Сведения об авторах

Калью Валерий Алексеевич, к.т.н., доцент, начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 386-69-90. E-mail: v_kalyu@ksrc.ru.

Краснописцев Николай Вячеславович, начальник лаборатории ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений». Адрес: 141570, Московская область, Солнечногорский район, г.п. Менделеево. E-mail: lab21@vniiftri.ru.

Лосев Герман Игоревич, младший научный сотрудник ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений». Адрес: 141570, Московская область, Солнечногорский район, г.п. Менделеево. E-mail: losev-ga@mail.ru.

Некрасов Виталий Николаевич, д.т.н., профессор, начальник подразделения НИО-5 ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений». Адрес: 141570, Московская область, Солнечногорский район, г.п. Менделеево. E-mail: nvn@vniiftri.ru.

Петрова Вера Владимировна, ведущий инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: v_kalyu@ksrc.ru.

Смирнов Денис Алексеевич, к.т.н., старший научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: v_kalyu@ksrc.ru.

About the authors

Valery A. Kalyu, Cand. Sci. (Eng), Associate Prof., Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 386-69-90. E-mail: v_kalyu@ksrc.ru.

Nikolai V. Krasnopistsev, Head of Laboratory, Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Research Institute of Physical, Technical and Radio Engineering» (VNIIFTRI). Address: Solnechnogorsk district, settlement Mendeleevo, Moscow region, post code 141570. E-mail: lab21@vniiftri.ru.

German I. Losev, Junior Researcher, Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Research Institute of Physical, Technical and Radio Engineering» (VNIIFTRI). Address: Solnechnogorsk district, settlement Mendeleevo, Moscow region, post code 141570. E-mail: losev-ga@mail.ru.

Vitaliy N. Nekrasov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Division, Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Research Institute of Physical, Technical and Radio Engineering» (VNIIFTRI). Address: Solnechnogorsk district, settlement Mendeleevo, Moscow region, post code 141570. E-mail: nvn@vniiftri.ru.

Vera V. Petrova, Lead Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: v_kalyu@ksrc.ru.

Denis A. Smirnov, Cand. Sci. (Eng), Senior Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: v_kalyu@ksrc.ru.

Поступила / Received: 13.03.23
Принята в печать / Accepted: 30.08.23
© Коллектив авторов, 2023