

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-121-127
УДК 534.612

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

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ УРОВНЕЙ ПОДВОДНОГО ШУМА ИСТОЧНИКА, ПОЛУЧЕННЫХ ПРЯМЫМ МЕТОДОМ И С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕКТОРНО-ФАЗОВОЙ ОБРАБОТКИ

Объект и цель научной работы. Оценки уровня подводного шума движущегося широкополосного источника, получаемые прямым и косвенным методами, с использованием комбинированного приемника звукового давления и компонент вектора колебательной скорости.

Материалы и методы. Теоретические исследования с помощью компьютерного моделирования, натурные эксперименты в реальных условиях измерения, статистический анализ результатов экспериментов.

Основные результаты. По представительным выборкам выполнено сравнение оценок уровня шума, получаемых прямым методом, только по каналу звукового давления, и косвенным методом, путем пересчета значений потока акустической мощности в идеальных условиях и в условиях реальной акватории.

Заключение. В идеальных условиях измерения статистически значимое различие двух способов оценивания имеет место только на частотах ниже 16 Гц. По результатам натурального эксперимента в реальных условиях показано, что оценка, полученная на основе вектора плотности потока мощности, обладающего пространственной избирательностью, характеризуется большей достоверностью и точностью, т.к. меньше подвержена влиянию отражений от границ акватории.

Ключевые слова: звуковое давление, колебательная скорость, векторный приемник, плотность потока акустической мощности, уровень подводного шума.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

SHIP SIGNATURES

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-121-127
UDC 534.612

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

COMPARISON OF THE RESULTS OF MEASUREMENTS OF THE SOURCE UNDERWATER NOISE LEVELS OBTAINED BY THE DIRECT METHOD AND USING VECTOR-PHASE PROCESSING

Для цитирования: Калью В.А., Краснописцев Н.В., Лосев Г.И., Некрасов В.Н., Петрова В.В., Смирнов Д.А. Сравнение результатов измерений уровней подводного шума источника, полученных прямым методом и с использованием векторно-фазовой обработки. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 3(401): 121–127.

For citations: Kalyu V.A., Krasnopistsev N.V., Losev G.I., Nekrasov V.N., Petrova V.V., Smirnov D.A. Comparison of the results of measurements of the source underwater noise levels obtained by the direct method and using vector-phase processing. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 3(401): 121–127 (in Russian).

Object and purpose of research. Moving broadband source underwater noise level estimations obtained by direct and indirect methods using a receiver for the measurement of sound pressure and sound particle velocity components combined.

Materials and methods. Theoretical research using computer simulation, full-scale experiments in real measurement conditions, statistical analysis of experimental results.

Main results. The noise level estimations obtained by the direct method, only through the sound pressure channel, and by the indirect method with recalculating the values of sound intensity were compared based on representative samples under ideal conditions and in real water area conditions.

Conclusion. Under ideal measurement conditions a statistically significant difference between the two estimation methods occurs only at frequencies below 16 Hz. The results of a full-scale experiment in real conditions show that the estimate obtained on the basis of the spatial selective sound intensity vector is characterized by greater reliability and accuracy since it is less affected by reflections from the boundaries of the water area.

Keywords: sound pressure, sound particle velocity, vector sensor, sound intensity, underwater noise level.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Гидроакустическое поле характеризуется не только звуковым давлением $P(\vec{r}, t)$, но и вектором 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].

Наиболее понятной физической величиной на выходе обработки измерительной информации с каналов комбинированного приемника является усредненная за время t плотность потока акустической мощности, описываемая вектором

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

компоненты которого позволяют выделять мощность акустической волны, приходящей в точку приема с выбранного направления. При наличии информации о характере акустической волны (сферическая, цилиндрическая, плоская) можно с использованием импеданса выразить значения \vec{V} в единицах звукового давления и таким образом оценить уровень звукового давления в этой акустической волне

$$L_p = 10 \lg \frac{P_{\Pi\alpha}^2}{P_0^2}, \quad (2)$$

где P_0 – пороговое значение акустического давления $2 \cdot 10^{-5}$ Па.

На практике векторные каналы комбинированного приемника калибруются по плоской волне [5–6], что для неплоских волн будет источником погрешности результата такого косвенного измерения

$$L_p = 10 \lg \left(\frac{\overline{P^2}}{P_0^2} \right) \cong 10 \lg \frac{P_{\Pi\alpha}^2}{P_0^2}, \quad (3)$$

где $\overline{P^2}$ – средний квадрат акустического давления, $P_{\Pi\alpha}^2$ – оценка среднего квадрата акустического давления по значению компонент плотности потока акустической мощности $\vec{\Pi}$ в направлении α , при этом

$$\overline{P_{\Pi\alpha}^2} = k \Pi_{\alpha}, \quad (4)$$

где k – калибровочный коэффициент, учитывающий также чувствительность каналов комбинированного приемника.

Формулировка задачи

Problem formulation

Задача представленного в настоящей статье исследования состоит в сравнении результатов оценивания уровней звукового давления L_p в 1/3-октавных полосах частот (со средними частотами $f_{1/3}$) движущегося источника шума в условиях ограниченной акватории и фоновых шумов с помощью комбинированного приемника и с использованием двух алгоритмов обработки измерительной информации.

Первый алгоритм реализует прямой метод измерения уровня звукового давления

$$L_p(f_{1/3}) = 10 \lg \left(\frac{\left(\max_t \frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} P^2(t, f_{1/3}) dt \right)}{P_0^2} \right). \quad (5)$$

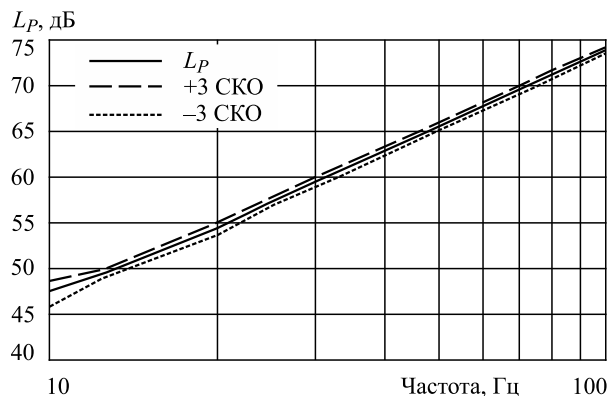


Рис. 1. Результаты моделирования измерения уровня подводного шума по алгоритму P^2 с указанием доверительных границ

Fig. 1. The results of simulation of the underwater noise levels measurement according to the algorithm P^2 with indication of confidence limits

Второй алгоритм реализует косвенный метод с использованием измерения плотности потока акустической мощности

$$L_{\Pi}(f_{1/3}) = 10 \lg \left(\left(\max_t \frac{k}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} \Pi_{\alpha}(t, f_{1/3}) dt \right) / P_0^2 \right), \quad (6)$$

где a – направление из точки расположения комбинированного приемника перпендикулярно траектории движения источника.

Теоретическое исследование с помощью компьютерной модели

Theoretical study using a computer simulation

Первым этапом исследования является сравнение оценок уровня шума широкополосного источника $L_P(f_{1/3})$ и $L_{\Pi}(f_{1/3})$ в идеальных условиях измерения:

- идентичность параметров движения (скорость и траверзная дистанция) источника для различных реализаций шума;
- безграничное однородное пространство;
- отсутствие фоновых помех.

Для этого исследования была разработана компьютерная модель [7], имитирующая движение источника относительно комбинированного приемника, регистрацию сигналов звукового давления и трех компонент вектора колебатель-

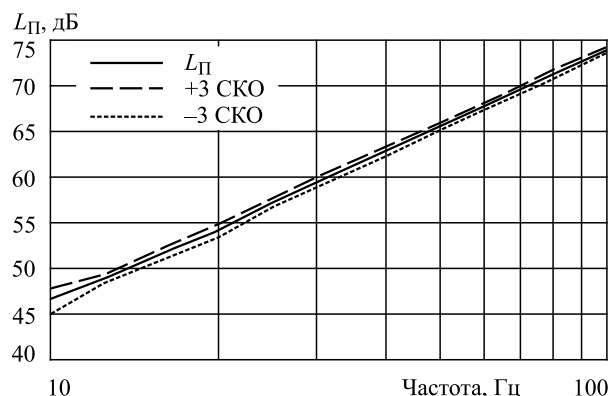


Рис. 2. Результаты моделирования измерения уровня подводного шума по алгоритму Π_z с указанием доверительных границ

Fig. 2. The results of simulation of the underwater noise levels measurement according to the algorithm Π_z with indication of confidence limits

ной скорости, а также процедуру вычисления оценок L_P и L_{Π} . Точность моделирования полей P и \vec{V} позволяет проводить описанное исследование. Результаты моделирования оценивания L_P и L_{Π} по 16 независимым реализациям шума представлены на рис. 1–2.

Сравнение оценок иллюстрирует рис. 3, при этом показано, что оценки L_P и L_{Π} значительно различаются (на уровне значимости $q = 0,01$) только на частотах ниже 16 Гц.

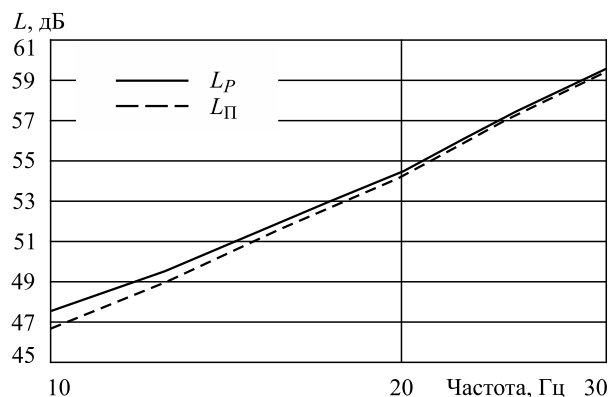


Рис. 3. Результаты исследования различия уровня подводного шума, полученные с помощью различных алгоритмов обработки информации (средние значения) в диапазоне до 30 Гц

Fig. 3. The results of the study of the differences in underwater noise levels obtained using various information processing algorithms (average values) in the range up to 30 Hz

Описание натурального эксперимента и описание полученных результатов

Description of the field experiment and description of the obtained results

Натурный эксперимент проводился в бухте с глубинами 20÷70 м и состоял в измерении уровня подводного шума (УПШ) движущегося катера с помощью двух заглубленных приемных модулей (ПМ), оснащенных гидрофонами и приемниками колебательной скорости. Катер совершал равномерное прямолинейное движение с заданной скоростью относительно двух приемных модулей. Траверсная дистанция между катером и приемниками $d_{\text{Тр}}$ лежала в пределах 43÷65 м.

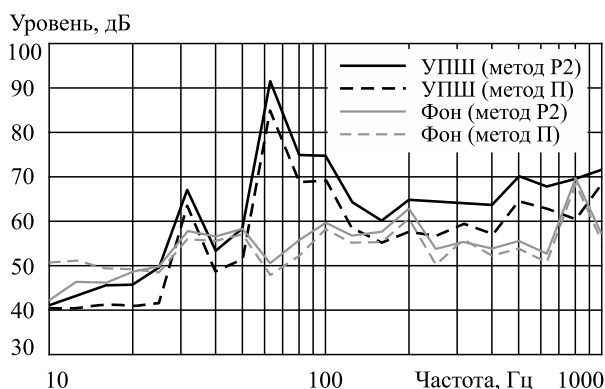


Рис. 4. Значения уровня подводного шума на фоне помехи, полученные различными методами на ПМ № 1

Fig. 4. Values of underwater noise levels against the background noise obtained by various methods at receiver no. 1

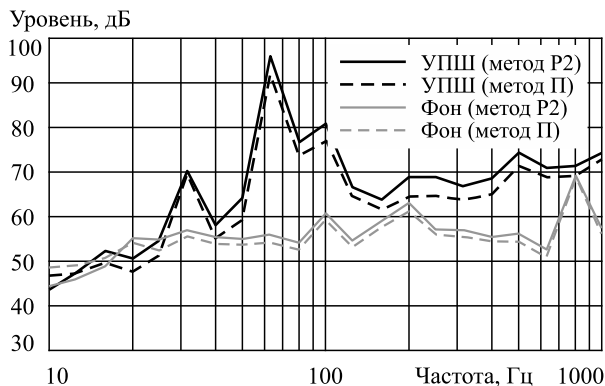


Рис. 5. Значения уровня подводного шума на фоне помехи, полученные различными методами на ПМ № 2

Fig. 5. Values of underwater noise levels against the background noise obtained by various methods at receiver no. 2

Результаты измерений приводились к единой дистанции 50 м по сферическому закону, с внесением поправки Δ :

$$\Delta = 20 \cdot \lg \frac{d_{\text{Тр}}}{50}. \quad (7)$$

Было получено $N_1 = 9$ зачетных реализаций на ПМ № 1 и $N_2 = 7$ зачетных реализаций на ПМ № 2. Таким образом, общее число реализаций, взятых в зачет по результату натурального эксперимента, составило $N = N_1 + N_2 = 16$.

Сигналы на выходе приемной системы были обработаны по двум алгоритмам:

$\overline{P^2}$ – непосредственное измерение значения среднего квадрата акустического давления $\overline{PP^*}$;

$\overline{P_i}$ – вычисление значения среднего квадрата акустического давления по измеренной компоненте потока акустической мощности $\text{Re} PV_i^*$.

На рис. 4–5 представлены усредненные по галсам значения УПШ на фоне помехи, полученные различными методами на ПМ № 1 и ПМ № 2 соответственно.

Средние значения уровней в 1/3-октавных полосах спектра подводного шума, полученные по алгоритму $\overline{P^2}$, превышают соответствующие значения, полученные по алгоритму $\overline{P_i}$ примерно на 6 дБ на ПМ № 1 и примерно на 3 дБ на ПМ № 2.

Как видно, средние значения уровней в 1/3-октавных полосах спектра подводного шума, полученные на ПМ № 2, превышают соответствующие значения на ПМ № 1, что может быть обусловлено различием в калибровке каналов приемников этих двух баз.

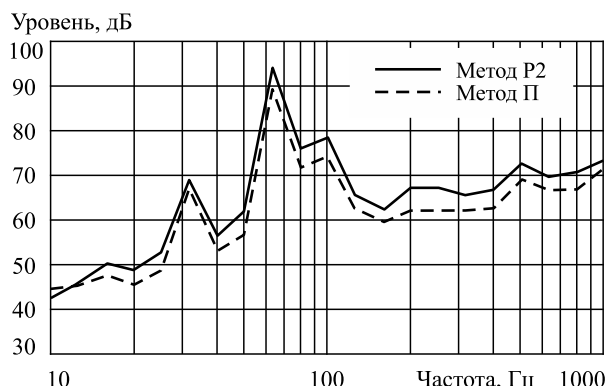


Рис. 6. Усредненные по всем реализациям значения уровня подводного шума, полученные по алгоритму $\overline{P^2}$ и алгоритму $\overline{P_i}$

Fig. 6. Underwater noise level values averaged over all implementations obtained by algorithm $\overline{P^2}$ and algorithm $\overline{P_i}$

На рис. 6 показаны усредненные по всем зачетным реализациям и по обоим приемникам значения УПШ, полученные по алгоритму $\overline{P^2}$ и алгоритму $\overline{\Pi}_i$.

Анализ результатов исследования

Study results analysis

При анализе результатов исследования были вычислены дисперсии D выборок значений УПШ, полученных по алгоритму $\overline{P^2}$ и алгоритму $\overline{\Pi}_i$, в соответствии со следующими формулами:

$$D_{P^2} = \frac{1}{N_1 + N_2 - 2} \times \left[\sum_{i=1}^9 (P_{(1)i}^2 - \overline{P_{(1)}^2})^2 + \sum_{j=1}^7 (P_{(2)j}^2 - \overline{P_{(2)}^2})^2 \right], \quad (8)$$

$$D_{\Pi} = \frac{1}{N_1 + N_2 - 2} \times \left[\sum_{i=1}^9 (\Pi_{(1)i} - \overline{\Pi_{(1)}})^2 + \sum_{j=1}^7 (\Pi_{(2)j} - \overline{\Pi_{(2)}})^2 \right]. \quad (9)$$

На рис. 7 представлено отношение D_{P^2}/D_{Π} и критическое значение критерия Фишера, равное $F_{кр}(14; 14; 0,005) = 2,5$.

Из представленных на рис. 7 данных следует, что дисперсии выборок значений УПШ, полученных по алгоритмам $\overline{P^2}$ и $\overline{\Pi}$, можно считать значимо различающимися с вероятностью ошибки первого рода 0,05.

Для сравнения средних значений использовался критерий Стьюдента (t). Вычислялось фактическое значение статистики по формуле

$$t = \frac{\sqrt{N_1 + N_2}}{\sqrt{D_{P^2} + D_{\Pi}}} \cdot |\overline{\Pi} - \overline{P^2}| \quad (10)$$

и сравнивалось с критическим значением $t_{кр}(14; 0,02) = 3,65$. Результаты сравнения представлены на рис. 8.

Средние значения УПШ, полученные по алгоритмам $\overline{P^2}$ и $\overline{\Pi}$, можно считать различными с вероятностью ошибки первого рода 0,02.

Выявленные в результате анализа различия средних значений и дисперсий выборок УПШ, вычисленных по алгоритмам $\overline{P^2}$ и $\overline{\Pi}$, объясня-

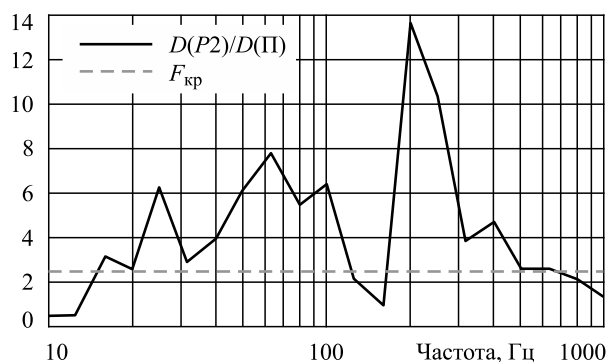


Рис. 7. Отношение D_{P^2}/D_{Π} и критическое значение критерия Фишера $F_{кр}(14; 14; 0,005)$

Fig. 7. The D_{P^2}/D_{Π} ratio and the critical value of the Fisher criterion $F_{кр}(14; 14; 0,005)$

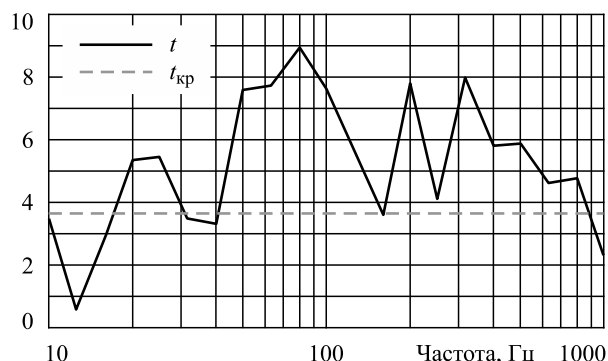


Рис. 8. Статистика Стьюдента и критическое значение $t_{кр}(14; 0,02)$

Fig. 8. Student statistic and critical value $t_{кр}(14; 0,02)$

ются различиями таких условий постановки приемных модулей ПМ № 1 и ПМ № 2, как глубина места и удаленность от береговой линии, а также неидентичностью условий прохода источника шума относительно приемных систем на разных галсах.

Заключение

Conclusion

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В отсутствие влияющих факторов условий выполнения измерений (отражений от границ акватории и неидентичности различных проходов источника относительно приемников) оценки УПШ $L_P(f_{1/3})$ и $L_{\Pi}(f_{1/3})$, получаемые прямым и косвенным методами соответственно, не различаются в области частот выше 16 Гц.

2. В различных условиях выполнения измерений дисперсия выборки косвенных оценок $L_{\Pi}(f_{1/3})$ значительно меньше дисперсии выборки прямых оценок $L_P(f_{1/3})$, что говорит о большей достоверности оценивания УПШ с помощью $L_{\Pi}(f_{1/3})$ из-за меньшей чувствительности этих оценок к изменчивости условий измерений.
3. Поскольку средние значения оценок УПШ $L_P(f_{1/3})$ и $L_{\Pi}(f_{1/3})$ значительно различаются только под влиянием изменчивости условий измерений и это влияние на оценки $L_{\Pi}(f_{1/3})$ значительно меньше, чем на оценки $L_P(f_{1/3})$, следует признать оценку $L_P(f_{1/3})$ завышенной, а оценку $L_{\Pi}(f_{1/3})$ более точной. Это обусловлено тем, что отражения шума источника от границ акватории дают больший вклад в значение P^2 , чем в значение Π , т.к. приемник давления не учитывает направление прихода акустических волн. В то же время комбинированный приемник обладает пространственной избирательностью и ослабляет отраженные от границ акватории сигналы, дающие вклад в величину Π .

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 sensor // Journal of the Acoustical Society of America. 2004. Vol. 116, № 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, № 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. Free-Field Calibration of a Pressure Gradient Receiver in a Reflecting Water Tank Using a Linear Frequency-Modulated Signal / A.E. Isaev, A.N. Matveev, G.S. Nekrich, A.M. Polikarpov // Acoustical Physics. 2013. Vol. 59, № 6. P. 773–781. DOI: 10.1134/S1063771013050096.
 6. Complex Calibration of a Pressure Gradient Receiver Using the Reciprocity Method Procedure / A.E. Isaev, A.N. Matveev, G.S. Nekrich, A.M. Polikarpov // Acoustical Physics. 2014. Vol. 60, № 1. P. 48–55. DOI: 10.1134/S1063771013060067.
 7. Simulation computer model for measuring the characteristics of the hydroacoustic field of an object using a combined receiver under specified conditions : description of the program / The Krylov State Research Centre. Saint Petersburg, 2020. 39 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, инженер I категории 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.

Смирнов Денис Алексеевич, к.т.н., старший научный сотрудник 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.

About the authors

Valery A. Kalyu, Cand. Sci. (Eng.), Associate Prof., Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: 44, Mos-

kovskoye 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, Techhical 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, Techhical 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, Techhical and Radio Engineering» (VNIIFTRI). Address: Solnechnogorsk district, settlement Mendeleevo, Moscow region, post code 141570. E-mail: nvn@vniiftri.ru.

Vera V. Petrova, 1st Category Engineer, 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.

Denis A. Smirnov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, 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.

Поступила / Received: 21.04.22
Принята в печать / Accepted: 01.07.22
© Коллектив авторов, 2022