Робототехнический комплекс обнаружения и локализации подводных источников шума*

С.А. Переселков, В.М. Кузькин, Ю.В. Матвиенко

Разработаны методы голографической обработки шумовых сигналов для обнаружения и локализации малогабаритных подводных беспилотных транспортных средств (БТС), обладающих низким уровнем шумоизлучения. Предложена методика применения для контроля подводной обстановки автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) с малогабаритными антеннами из векторно-скалярных приемников (ВСП) на борту. Созданы облики АНПА-транспорта и АНПА-носителя с малогабаритной антенной из ВСП. Выполнены вычислительные и натурные эксперименты, проведена голографическая обработка экспериментальных данных. Предложена новая концепция построения роботизированной системы мониторинга подводной обстановки на основе голографической обработки. Обозначены перспективы развития голографической обработки для гидроакустических сигналов.

Ключевые слова: АНПА, голографическая обработка, ВСП, обнаружение, локализация, антенна, БТС.

**Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №19-29-06075).*

Введение

Контроль подводной обстановки, направленный на предотвращение и отражение угрозы со стороны малогабаритных малошумных подводных БТС, является одной из важнейшей задач безопасности морского государства. В США, например, получила развитие интегрированная система освещения подводной обстановки IUSS (Integrated Undersea Surveillance System), объединяющая стационарные и мобильные комплексы гидроакустического наблюдения [1]. Насколько известно авторам, в России не существует подобной интегрированной системы.

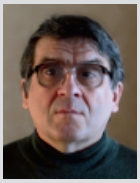
В настоящее время для решения проблемы освещения подводной обстановки, наряду с традиционными подходами пассивной локации [2], получили развитие методы, основанные на согласованной со средой обработке гидроакустических сигналов (matched-field processing) [3, 4]. Они подразумевают использование многоэлементных приемных антенн и данных о трассе распространения, позволяющих рассчитывать модельную форму сигнала. Данные алгоритмы обработки сигналов достигли предельных возможностей и не позволяют решать современные задачи обнаружения и локализации малогабаритных малошумных источников. Это стимулирует разработку современных средств контроля подводной обстановки, ориентированных на новые технологии обработки шумовых сигналов и построения технических средств, обеспечивающих мобильное обнаружение и локализацию малогабаритных малошумных подводных БТС в заданной акватории.

В работе предложена и обоснована новая концепция построения роботизированной системы освещения подводной обстановки, основанная на голографической обработке принимаемых шумовых сигналов [5, 6]. Обработка позволяет с высокой помехоустойчивостью и малой чувствительностью к вариациям параметров океанического волновода решать комплексную задачу локализации: обнаружения, разрешения, пеленгования, определения радиальной скорости (проекция скорости источника в направлении приемника), удаления и глубины малошумного источника. Ключевой фактор концепции – использование группировки гибридных АНПА [7] с антеннами из ВСП [8] и средствами обработки. Намечены перспективы развития голографической обработки шумовых сигналов для решения задач обнаружения и локализации БТС в условиях пространственно-временно́й изменчивости океанической среды.

Голографическая обработка

Голографическая обработка шумоизлучения подводного аппара-

ПЕРЕСЕЛКОВ Сергей Алексеевич
профессор,
Воронежский государственный университет



КУЗЬКИН Венедикт Михайлович
Институт общей физики РАН

МАТВИЕНКО Юрий Викторович
Институт проблем морских технологий ДВО РАН

та с применением одиночного ВСП строится следующим образом [5]. За время наблюдения Δt в полосе Δf для временны́х интервалов длительностью $\delta t_1=(\Delta t/J-\delta t_2)$ выполняется частотно-временна́я обработка принятого сигнала [9] с шагом по частоте $\delta f=1/\delta t_1$. Здесь J и δt_2 – число независимых временны́х шумовых реализаций и временно́й интервал между ними. Определяются текущие значения комплексных амплитуд звукового давления $P(f,t)$ и трех компонент $V_{x,y,z}(f,t)$ вектора колебательной скорости частиц среды. Вычисляются частотно-временны́е интерференционные картины (интерферограммы) энергетических параметров шумового поля. Например, интерферограммы квадрата модуля звукового давления $I(f,t)$ и горизонтальных составляющих потока мощности $X(f,t)$, $Y(f,t)$

$$I(f,t)=P(f,t)P^*(f,t), X(f,t)= =V_x(f,t)\,P^*(f,t), Y(f,t)=V_y(f,t)P^*(f,t), \quad (1)$$

где верхний индекс «*» обозначает комплексно-сопряженную величину.

К интерферограммам (1) применяется двумерное частотно-временно́е преобразование Фурье, и вычисляются голограммы $F_I(\tau, \nu)$ $F_X(\tau, \nu)$, $F_Y(\tau, \nu)$. Применительно к интерферограмме $X(f, t)$, например, голограмма имеет вид:

$$F_X(\tau, \nu)=\int_0^{\Delta\tau}\int_{f2}^{f1} X(f, t)\exp[i2\pi(\nu t-f\tau)]df dt. \quad (2)$$

Здесь ν и τ – частота и время голограммы; $f_{1,2}=f_0\pm(\Delta f/2)$, f_0 – средняя частота спектра. На голограмме (2) спектральная плотность сигнала движущегося источника сконцентрирована в двух узких полосах, зеркально перевернутых относительно начала координат, в виде фокальных пятен, вызванных интерференцией мод разных номеров. Они размещены в первом и третьем квадрантах голограммы, если радиальная скорость источника $w<0$ (источник приближается к приемнику), и во втором и четвертом квадрантах ($w>0$), если источник удаляется от приемника. При неподвижном или движущемся источнике с радиальной скоростью $w=0$ координаты пиков фокальных пятен расположены на оси времени τ. Область локализации содержит $(M-1)$ главных максимумов с координатами (τ_μ, ν_μ), расположенными на прямой $\nu=\varepsilon\tau$ с угловым коэффициентом $\varepsilon=\nu_\mu/\tau_\mu$, где M – число мод, формирующих поле, $\mu=1,\overline{M-1}$ – номер фокального пятна. Ближайший к началу координат максимум первого фокального пятна, обусловленный интерференцией соседних мод, приходится на значения (τ_1, ν_1). Координаты соседнего пика, вызванного интерференцией мод номеров $(m, m+2)$, расположены в точке (τ_2, ν_2) и т. д. И, наконец, координаты самого удаленного пика, продиктованного интерференцией первой и последней моды – (τ_{M-1}, ν_{M-1}). В точках с координатами (τ_μ, ν_μ) суммируются $(M-\mu)$ главных максимумов. Помеха распределена по всей плоскости (τ, ν) голограммы.

При условии $r_0 >> |w|\Delta t$, где r_0 – удаление источника от приемника в начальный момент времени $t=0$, радиальная скорость и начальное удаление равны

$$\dot{w}=-2\pi\kappa_{w\mu}\nu_\mu, \qquad \dot{r}_0=\kappa_{r\mu}\tau_\mu,$$

где $\kappa_{w\mu}=[\overline{h_{m(m+\mu)}(f_0)}]^{-1}$, $\kappa r\mu=2\pi[\overline{dh_{m(m+\mu)}(f_0)/df}]^{-1}$ – коэффициенты, определяющие пространственные и частотные масштабы изменчивости передаточной функции волновода [10].

Здесь $h_{mn}=h_m-h_n$, h_m – горизонтальное волновое число m-й моды. Восстановленные параметры источника и характеристики шумовых сигналов, в отличие от их истинных значений, отмечены точкой сверху. Черта сверху означает усреднение по номерам мод.

Спектральная плотность сигнала сосредоточена в полосе, ограниченной прямыми

$\nu=\varepsilon\tau+\delta\nu$, $\nu=\varepsilon\tau-\delta\nu$,

где $\delta\nu=1/\Delta t$ – полуширина фокальных пятен в направлении оси частоты ν. Вне этой полосы спектральная плотность практически подавлена. В направлении оси времени τ полуширина фокальных пятен $\delta\tau=1/\Delta f$.

Далее под входным отношением «сигнал–помеха» (с/п) q_0 понимается отношение уровня локализованного шума БТС к уровню распределенного шума акватории. В качестве критерия обнаружения источника принимается условие, согласно которому максимум функции углового распределения спектральной плотности (функции обнаружения) звукового давления при входном отношении с/п.

$$G_I(\chi, q_0)=\int_0^{\Delta\tau}|F_I(\tau, \chi\tau, q_0)|d\tau .$$

Значение функции обнаружения в направлении $\chi=\varepsilon$ расположения пиков фокальных пятен сигнала в два и более число раз превышает помеховый уровень в направлениях $\chi\neq\varepsilon$

$$G_I[\varepsilon, q_0]\geq 2G_I(\chi, q_0). \quad (3)$$

Здесь $\Delta\tau$ – линейный размер области концентрации по оси времени τ; χ – варьируемое значение углового коэффициента при интегрировании вдоль прямых $\nu=\chi\tau$. За оценку ε принимается положение максимального пика $\max G_I(\chi) = G_I(\varepsilon)$.

Направление на источник, пеленг φ, оценивается по отношению максимумов функций обнаружения горизонтальных составляющих потоков мощности

$$\mathrm{tg}\dot{\phi}(q_0)=\frac{G_Y(\varepsilon, q_0)}{G_X(\varepsilon, q_0)}. \quad (4)$$

Определение пеленга неоднозначно: значения $\dot{\phi}$, $\dot{\phi}+\pi$, согласно (4), равнозначны. Области голограмм $F_X(\tau, \nu)$, $F_Y(\tau, \nu)$, $F_I(\tau, \nu)$ за пределами полосы концентрации спектральной плотности очищаются от помехи и выполняются обратные двумерные преобразования Фурье по восстановлению двумерных интерферограмм $\dot{X}(f, t)$, $\dot{Y}(f, t)$, $\dot{I}(f, t)$. Неоднозначность пеленга устраняется при рассмотрении в фиксированный момент времени t_* на частоте f_* отношений интерферограмм

$$\alpha_x=\frac{\dot{X}(f^*, t^*)}{\dot{I}(f^*, t^*)}, \alpha_y=\frac{\dot{Y}(f^*, t^*)}{\dot{I}(f^*, t^*)}.$$

Если: а) $\alpha_x > 0$, $\alpha_y > 0$, то источник расположен в I-ом квадранте ВСП; б) $\alpha_x < 0$, $\alpha_y > 0$ – во II-м квадранте; в) $\alpha_x < 0$, $\alpha_y < 0$ – в III-м квадранте; г) $\alpha_x > 0$, $\alpha_y < 0$ – в IV-м квадранте.

По одной из восстановленных интерферограмм вычисляется огибающая сигнала и через отношение амплитуд соседних мод оценивается глубина источника; алгоритм разрешения нескольких шумовых источников изложен в [8]. Для решения задач обнаружения, пеленгования, восстановления глубины и разрешения знания о шумовом сигнале, помехе и передаточной функции волновода не требуются.

Отношение с/п q_1 на выходе голографической обработки оценивается как

$$\dot{q}_1=J\gamma q_0,$$

где $\gamma=S_n/S_s$ – коэффициент концентрации, S_n и S_s – площади областей голограммы распределения спектральных плотностей помехи и сигнала [5].

На основе изложенных выше голографических подходов к обработке шумовых сигналов в проекте получены следующие результаты в рамках разработки методов обнаружения и локализации БТС, обладающих низким уровнем шумоизлучения.

Применительно к одиночному приемнику оценена минимальная длительность шумового сигнала, минимизирующая предельное входное отношение с/п q_0, при котором сохраняется работоспособность голографической обработки

$$\min\delta t_1=(5r/2\pi)|(dh_{1M}(f_0))/df|, \quad (5)$$

где r – расстояние между источником шума и приемником. Если длительность шумового сигнала $\delta t_1 < \min\delta t_1$, то искажается конфигурация спектральной плотности голограммы и увеличивается погрешность восстановления параметров шумового источника. В зависимости от входного отношения с/п q_0 и времени наблюдения Δt максимальная дальность обнаружения источника оценивается как

$$r_{\max}=(2\pi/5)\sqrt{q_0/1.5}[\Delta t/|gh_{1M}(f_0)df|]. \quad (6)$$

Значения $\min\delta t_1$ и $r_{\max}$ определяются параметрами передаточной функции волновода. Оценки (5), (6) снабжены результатами численного моделирования.

Для горизонтально-однородных волноводов разработаны два варианта адаптивных алгоритмов голографической обработки определения радиальной скорости и удаления источника при малом входном отношении с/п в отсутствии информации о гидроакустических характеристиках океанической среды. Они строятся на основе измерений пеленга и частотных смещений интерференционных пиков между двумя горизонтально разнесенными приемниками. Тем самым расширяются возможности применения голографической обработки в тех случаях, которые не доступны для других известных методов обработки. В рамках численных экспериментов показана их эффективность.

Применительно к одиночному приемнику построена теория вероятностных характеристик обнаружения шумового сигнала по критерию Неймана – Пирсона. Получены выражения для кривых обнаружения, представляющие собой зависимость вероятности правильного обнаружения от отношения с/п при фиксированной вероятности ложной тревоги. Определены пороговые сигналы на выходе голографической обработки при наличии шумового сигнала источника и в его отсутствие. Для частных случаев результаты численного моделирования показаны на *рис. 1*.

На основе критерия (3) и данных о спектральных характеристиках шумового сигнала и фоновой помехи разработан алгоритм оценки предельной дальности обнаружения шумового источника одиночным ВСП. Сформулированы условия

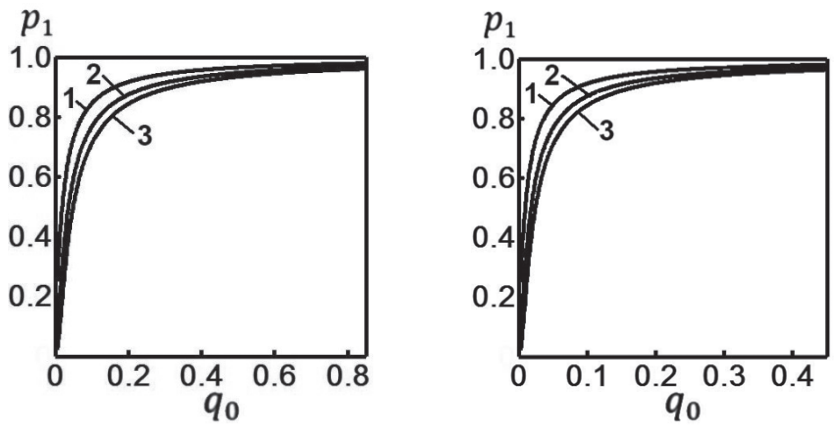


Рис. 1. *Зависимость вероятности правильного обнаружения p_1 от входного отношения с/п q_0 для разных значений вероятности ложной тревоги p_2: a – J=10; b – J=20. Кривая 1 – $p_2=10^{-1}$, кривая 2 – $p_2=10^{-2}$, кривая 3 – $p_2=10^{-3}$. Коэффициент концентрации γ=7 [5].*

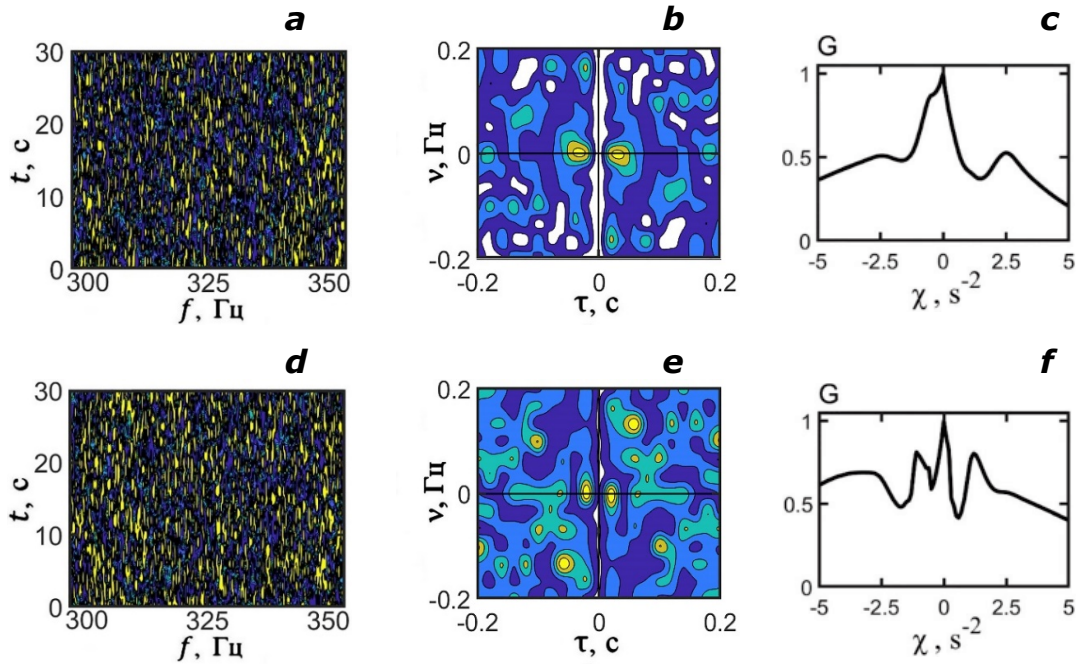


Рис. 2. *Нормированные интерферограммы (a, d), голограммы (b, e) и функции обнаружения (c, f). Расстояния: (a, b, c) – 11.0 км, (d, e, f) – 11.5 км [5].*

формирования неискаженной интерферограммы, которые накладывают ограничения на ширину полосы и время наблюдения в зависимости от расстояния, радиальной скорости и пространственно-частотных масштабов изменчивости передаточной функции волновода. На *рис. 2*, на основе данных численного моделирования звукового поля и экспериментальных данных спектров шумоизлучения АНПА и фонового шума в мелководной акватории глубиной 60 м [11], приведены результаты голографической обработки в полосе 300–350 Гц при скорости движения 2 м/с. Из *рис. 2 c, f,* согласно алгоритму (3), следует оценка максимальной дальности обнаружения r_{max}=11.0 *км*. Это показывает, что *N* стационарных АНПА с одиночными ВСП на борту способны контролировать рубежную линию протяженностью *L*=20*N* км. Оценка дальности отвечает входному отношению с/п q_0=–10 дБ и вероятностям правильного обнаружения p_1=0.87, 0.82, 0.77 при вероятностях ложной тревоги p_2=0.1, 0.01, 0.001. Взаимосвязь критерия дальности обнаружения с теорией обнаружения состоит в следующем. На основе критерия (3) определяется входное отношение с/п q_0 и для заданной вероятности ложной тревоги p_2 вычисляется вероятность правильного обнаружения p_1.

Разработан голографический метод выделения мод и оценок их параметров (амплитуды, горизонтального волнового числа, модального коэффициента затухания и групповой скорости) в мелководных акваториях с использованием одиночного ВСП. Метод основан на двумерном частотно-временно́м преобразовании Фурье вещественной части амплитуды поля движущегося источника. На

выходе интегрального преобразования спектральная плотность концентрируется в форме фокальных пятен, отвечающих отдельным модам. Установлена связь между фазовыми и групповыми скоростями мод с координатами пиков фокальных пятен. Получены выражения, связывающие спектральную плотность голограмм с амплитудой и модальным коэффициентом затухания. Фильтрация фокальных пятен и применение к ним обратного двумерного преобразования Фурье восстанавливает поля выделенных мод. В рамках численного моделирования продемонстрирована погрешность восстановления параметров мод. Предлагаемый подход позволяет рассмотреть и объединить гораздо больший круг задач по выделению мод, нежели преобразование Вигнера [12] и оператор time-warping [13].

Разработана голографическая обработка шумового сигнала с применением линейных антенн. Установлена связь спектральной плотности голограммы, формируемой источником, с апертурой и угловой зависимостью принимаемого поля. Оценены коэффициент усиления, характеристика направленности антенны и помехоустойчивость голографической обработки. В зависимости от входного отношения с/п на элементе антенны получено выражение для максимального удаления шумового источника, при котором сохраняется устойчивое обнаружение и оценки параметров шумового источника близки к реальным значениям. По сравнению с одиночным приемником максимальная дальность обнаружения шумового источника (6) возрастает примерно в $\sqrt{B}$ раз, где B – число элементов антенны. Представлены результаты численного моделирования.

Для линейных антенн на основе критерия Неймана – Пирсона построена теория вероятностных характеристик обнаружения шумового сигнала голографическим методом. Получены выражения для вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги в зависимости от отношения с/п и числа элементов антенны. Приведены кривые обнаружения шумового сигнала. Введено понятие коэффициента результативности обнаружения: отношение вероятности правильного обнаружения с использованием антенны к вероятности правильного обнаружения с применением одиночного приемника при заданной вероятности ложной тревоги. Выигрыш в вероятностях правильного обнаружения между одиночным приемником и антенной сосредоточен преимущественно в области малых входных отношений с/п. С повышением числа элементов антенны В значение коэффициента результативности увеличивается. С возрастанием значений отношения с/п коэффициент результативности уменьшается и асимптотически стремится к единице. Выполнены численные расчеты.

Разработан и протестирован программно-алгоритмический комплекс автоматизированной системы обнаружения и определения параметров источника шума на основе голографической обработки его шумоизлучения. Тестирование проведено: в различных гидрологических условиях; в разной фоновой помеховой обстановке, на фоне интенсивных локализованных помех и в условиях отсутствия знания о передаточной функции среды. Результаты тестирования положительные и подтверждены пятью свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ и одним патентом.

Робототехнические средства

Для технической реализации решаемой проблемы предложено использовать робототехнические средства.

В работе предложена новая концепция построения роботизированной системы освещения подводной обстановки, основанная на голографической обработке принимаемых шумовых сигналов [5]. Ключевой фактор концепции – использование группировки гибридных АНПА, то есть классических АНПА, способных работать дополнительно в режиме подводного планера (глайдера) [7]. На борту каждого из них размещается малогабаритная приемная антенна из элементов ВСП [8] и средств обработки. Гибридный АНПА осуществляет индивидуальные маневры (курс, скорость и глубина) в соответствии с введенным и периодически корректируемым по каналам связи заданием, передаваемым с пункта управления. Информационный обмен между АНПА и пунктом управления обеспечивается средствами гидроакустической, радио- и спутниковой связи.

Группировка АНПА выставляется на заданную акваторию с установленной продолжительностью и размером контролируемой области. Группировка состоит из АНПА-транспорта и группы АНПА-носителя для приема шумовых сигналов. АНПА-транспорт обеспечивает старт с носителя и переход в точку назначенными координатами в подводном положении. Гибридные АНПА с антеннами из ВСП на борту рассредотачиваются по району акватории и с применением гологра-

фической обработки выполняют обнаружение и локализацию малошумных движущихся подводных БТС. При этом каждый АНПА-носитель осуществляет индивидуальные маневры в соответствии с введенным и периодически корректируемым по каналам связи заданием.

В области реализации мобильного робототехнического комплекса контроля подводной обстановки получены следующие важные результаты.

Разработана методика применения АНПА-транспорта с единичным ВСП на борту для обнаружения и локализации малошумных БТС, основанная на голографической обработке шумоизлучения источника.

Разработана методика применения АНПА-носителя с малогабаритной антенной из ВСП на борту для контроля подводной обстановки. Его отличительными особенностями являются два фактора. Первый фактор – в транспортном положении антенна встроена в корпус аппарата. Второй фактор – в рабочем положении антенна формируется из стационарной, встроенной в корпус АНПА, и выносной, связанной с АНПА гидроакустической линией связи. По отношению к АНПА-транспорту с одиночным ВСП повышается помехоустойчивость обработки примерно в *B* раз.

Предложен проект АНПА-транспорта, несущего на борту ВСП. Его особенностью является наличие системы управления плавучестью, формирующей минимальные положительные или отрицательные плавучести, позволяющие в режиме глайдера перемещаться под водой. Аппарат оснащен системами изменения плавучести и остойчивости, обеспечивающими возможность изменения его функций. Предлагаемая конфигурация наряду с обычными функциями АНПА обеспечивает возможность реализации режима подводного глайдера для выхода в заданный район патрулирования подводной обстановки, возможность реализации малошумной приемной гидроакустической станции с управляемым режимом движения по толще воды и режим радиобуя со средствами навигации и связи.

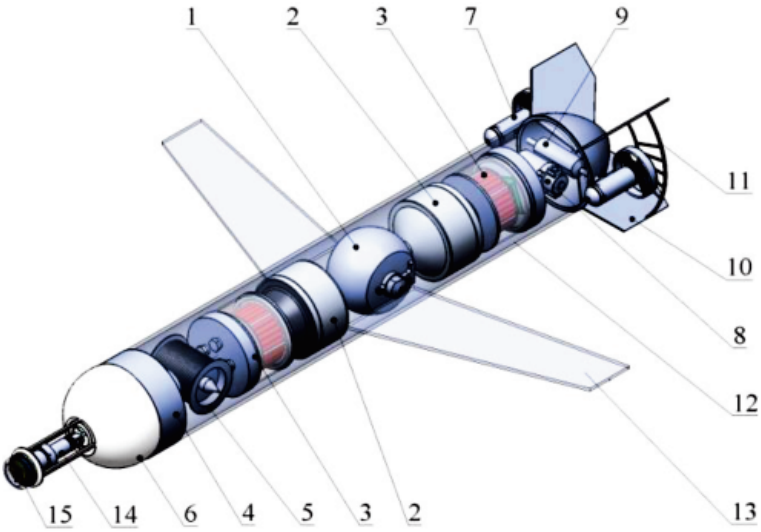


Рис. 3. *Конструктивный облик гибридного АНПА контроля подводной обстановки: 1 – система регулирования момента остойчивости; 2 – система регулирования плавучести; 3 – блок электроники и аккумуляторных батарей; 4 – улавливающее устройство для выпускаемого модуля ВСП; 5 – устройство выдачи/приема выпускаемого модуля ВСП; 6 – выпускаемый модуль ВСП; 7 – маршевый двигатель; 8 – блок управления привода поворота маршевых двигателей; 9 – привод поворота маршевых двигателей; 10 – стабилизатор; 11 – защита двигателей; 12 – каркас-обтекатель аппарата; 13 – крыло; 14 – антенны радиосвязи; 15 – приемник спутниковой навигационной системы.*

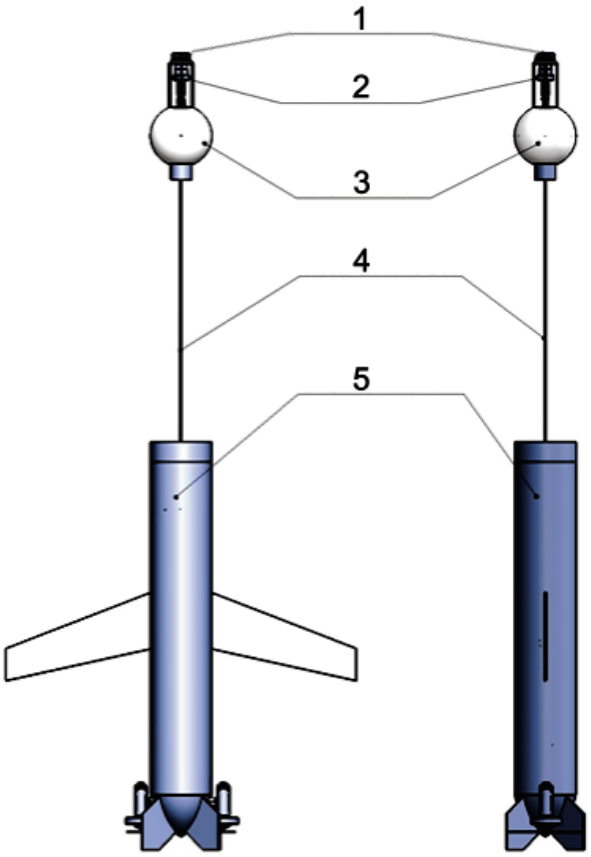


Рис. 4. *Конструктивный облик гибридного АНПА в режиме приемной станции: 1 – приемник спутниковой навигационной системы; 2 – антенны радиосвязи; 3 – всплывающий модуль ВСП; 4 – кабель связи ВСП; 5 – гибридный АНПА.*

Таблица 1. *Ориентировочные технические характеристики гибридного АНПА*

Характеристика	Значение
Масса на воздухе, не более, кг	100
Размеры, не более: длина×ширина×высота, м	2.3×1.7×0.4
Предельная рабочая глубина, м	500
Энергоемкость системы энергообеспечения, Вт·ч	$2 \cdot 10^{24}$
Максимальная скорость хода в режиме АНПА, не менее, м/с	2.0
Автономность хода в режиме АНПА на максимальной скорости, не менее, км	10
Скорость вертикального перемещения в режиме приемной станции, м/с	0.01–0.03
Максимальная скорость хода в режиме глайдера, м/с	0.35
Автономность хода в режиме глайдера, не менее, месяцев (суммарная дальность горизонтального хода – не менее 1 500 км)	2

Предлагаемый проект гибридного АНПА развивает идеи, заложенные при создании АНПА [7], и отличается возможностями решения задач назначения на борту аппарата в реальном времени, порядком формирования функционального облика и доставки результатов в пункт управления. Изображение предлагаемого аппарата приведено на *рис. 3*, его вид в режиме приемной станции с выпущенным модулем ВСП показан на *рис. 4*, а основные характеристики сведены в *табл. 1*.

Натурные и численные эксперименты

В данном разделе изложены результаты вычислительных и натурных экспериментов, выполненных в рамках проекта.

На стационарной трассе по данным натурного эксперимента (SWARM-95) [14] и численного моделирования в частотном диапазоне 40–620 Гц проанализирована устойчивость голографической обработки широкополосного сигнала на фоне интенсивных внутренних волн (ИВВ), вызывающих горизонтальную рефракцию и взаимодействие мод звукового поля. Экспериментально реконструирована передаточная функция невозмущенного волновода. Разработан алгоритм передачи неискаженного модуля спектра источника при наличии гидродинамических возмущений среды распространения.

Проведены эксперименты в морских заливах с применением приемных систем из ВСП. Реализованы трассы различных геометрических конфигураций. На основе голографической обработки выполнено обнаружение малогабаритного БТС и определение пеленга, радиальной скорости и удаленности. Обработка реализована в частотном диапазоне несколько сот герц.

В рамках численного эксперимента в частотном диапазоне несколько сот герц продемонстрирована устойчивость работы АНПА-носителя с малогабаритной антенной из ВСП на борту по отношению к ИВВ, приводящих к горизонтальной рефракции и взаимодействию мод звукового поля источника. Использование малогабаритных антенн уменьшает относительную ошибку восстановления интерферограммы невозмущенного поля, что объясняется пространственным усреднением возмущения по элементам антенны.

В мелководной акватории Черноморского побережья на фоне интенсивного надводного судоходства проведен эксперимент по обнаружению и идентификации малоразмерного БТС гидроакустической системой из разнесенных в пространстве трех ВСП [15]. Голографическая обработка осуществлена в частотном диапазоне 0.7–1.7 кГц. Подводный аппарат обнаруживался и локализовался на всех дальностях, которые были заданы условиями проведения эксперимента. Определены пеленги и траектории движения. При движении БТС входное отношение с/п изменялось в пределах от –11 дБ до 9 дБ.

В мелководной акватории Тихоокеанского побережья выполнены измерения спектра шумоизлучения БТС в частотном диапазоне от 50 до 1 000 Гц для дальней зоны аппарата [11]. Спектральные уровни звукового давления зарегистрированы при различных режимах и условиях движения. Спектральные характеристики в дальней зоне позволяют получить реалистические оценки дальности обнаружения аппарата в широком диапазоне частот при разных режимах работы и скоростях движения, и, как следствие, оценить размер контролируемой зоны исследуемой акватории.

Выполнены численные эксперименты по апробации голографического метода выделения мод в мелководной акватории на фоне ИВВ, обусловливающих горизонтальную рефракцию и взаимодействие волн поля источника. Рассмотрены случаи неподвижного и движущегося источника. В обоих случаях не происходит потеря идентичности параметров мод: моды выделяются, их параметры восстанавливаются. Определены вариации амплитуд, фазовых и групповых скоростей мод. Групповые скорости мод обнаруживают весьма слабую чувствительность к влиянию ИВВ.

Заключение

Таким образом, в выполненном проекте разработаны методы голографической обработки шумовых сигналов

для обнаружения и локализации малогабаритных подводных БТС, обладающих низким уровнем шумоизлучения. В рамках разработанных голографических методов установлены простые и явные связи между восстанавливаемыми параметрами подводного источника шума и спектральной плотностью голограммы по разным каналам ВСП.

Предложена новая концепция построения роботизированной системы освещения подводной обстановки, основанная на голографической обработке принимаемых шумовых сигналов. Ключевой фактор концепции – использование группировки гибридных АНПА, то есть классических АНПА, способных работать дополнительно в режиме подводного планера (глайдера). На борту каждого из них размещается малогабаритная приемная антенна из элементов ВСП и средств голографической обработки.

В рамках численных и натурных экспериментов протестированы теоретические положения голографической обработки обнаружения и локализации малошумных малогабаритных источников. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенных голографических подходов для контроля подводной обстановки с применением приемных систем из ВСП.

Что же касается перспективности развития данного направления, то важно обозначить следующие области исследований.

Во-первых, разработка и апробация адаптивных алгоритмов голографической обработки шумовых сигналов для обнаружения и локализации малошумных источников в условиях пространственно-временно́й изменчивости характеристик среды распространения. Тем самым будет открыта возможность восстановления параметров шумовых подводных источников посредством наблюдаемых величин, то есть величин, которые могут быть непосредственно измерены в условиях малого входного отношения с/п, не требующих знания о передаточной функции волновода.

Во-вторых, обобщение голографической обработки шумовых сигналов на случай мелководной акватории с неоднородной батиметрией. Оценка погрешности восстановления параметров малошумных подводных источников. Проведение экспериментальной верификации алгоритма обработки. В результате существенно расширяется круг задач по контролю подводной обстановки в условиях пространственно-временно́й изменчивости характеристик среды распространения, вообще поддающихся решению.

В-третьих, построение многомерных алгоритмов $(H + 2)D$ голографической обработки шумовых сигналов, принимаемых антеннами из ВСП, позволяющих повысить помехоустойчивость при работе в широкой полосе частот. Здесь H – число параметров, характеризующих расположение элементов антенны в пространстве. Например, если элементы антенны расположены на прямой линии, то H=1, если расположены на плоскости, то H=2. Предложенная выше голографическая обработка шумового сигнала с применением линейных антенн не позволяет реализовать помехоустойчивую обработку в широком диапазоне частот.

В-четвертых, оценка шумового портрета малогабаритного АНПА, то есть определение мощности излучения в заданном частотном диапазоне. Решение поставленной задачи возможно в результате объединения голографической обработки с кепстральным методом выделения сигналов.

По результатам, полученным в проекте, подготовлена монография [6].

В настоящее время коллектив авторов продолжает совместные научно-исследовательские работы в рамках проекта, поддержанного Российским научным фондом №23-61-10024, rscf.ru/project/23-61-10024/.

Литература

1. ***National Security Strategy,*** USA, Washington, The White House, 2015, 29 pp. (https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/docs/2015_national_security_strategy_2.pdf).
2. ***Ю.А. Корякин, С.А. Смирнов, Г.В. Яковлев*** *Корабельная гидроакустическая техника: состояние и актуальные проблемы,* РФ, Санкт-Петербург, Наука, 2004, 410 с.
3. ***D. Gingrass*** *J. Acoust. Soc. Am.,* 1989, **86**, 1940. DOI: 10.1109/MDSP.1989.97041.
4. ***А.Г. Сазонтов, А.И. Малеханов*** *Акустический журнал,* 2015, **61**(2), 233. DOI: 10.7X68/S0320791915020124.
5. ***С.А. Переселков, В.М. Кузькин*** *Известия РАН. Серия физическая,* 2023, **87**(4), 598. DOI: 10.31857/S036767652270106X.
6. ***С.А. Переселков, В.М. Кузькин*** *Голографическая обработка широкополосных гидроакустических сигналов,* РФ, Воронеж, Издательский дом ВГУ, 2023, 183 с.
7. ***Ю.В. Матвиенко, В.В. Костенко, В.А. Гой, Ю.А. Хворостов*** *Пат. РФ,* 2664971, 2018.
8. ***В.А. Гордиенко*** *Векторно-фазовые методы в акустике,* РФ, Москва, Физматлит, 2007, 480 с.
9. ***М.И. Вашкевич, И.С. Азаров*** *Цифровая обработка сигналов,* 2020, №2, 13.

10. ***Л.М. Бреховских, Ю.П. Лысанов***
Теоретические основы акустики океана, СССР, Ленинград, Гидрометеоиздат, 1982, 264 с.
11. ***Ю.А. Хворостов, Ю.В. Матвиенко, В.М. Кузькин, С.А. Пересёлков, С.А. Ткаченко***
Подводные исследования и робототехника, 2022, №4(42), 84. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_42_04_08.
12. ***А.И. Белов, Г.Н. Кузнецов***
Акустический журнал, 2014, **60**(2), 190. DOI: 10.7868/S0320791914010055.
13. ***J. Bonnel, N.R. Chapman***
J. Acoust. Soc. Am., 2011, **130**, EL101. DOI: 10.1121/1.3611395.
14. ***J.R. Apel, M. Badiey, C.-S. Chiu, S. Finette, R.H. Headrick, J. Kemp, J.F. Lynch, A.E. Newhall, M.H. Orr, B.H. Pasewark, D. Tielburger, A. Turgut, K. von der Heydt, S.N. Wolf***
IEEE J. Ocean. Eng., 1997, **22**, 465. DOI: 10.1109/48.611138.
15. ***Ю.В. Матвиенко, Ю.А. Хворостов, А.В. Каморный, М.Ю. Глущенко, В.М. Кузькин, С.А. Пересёлков***
Подводные исследования и робототехника, 2022, №3(41), 4. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_41_03_01.

English

Robotic Complex for Detection and Localization of Underwater Noise Sources*

Sergey A. Pereselkov
Professor,
Voronezh State University
1 Universitetskaya Sqr., Voronezh, 394018, Russia
pereselkov@yandex.ru

Yuri V. Matvienko
Institute of Marine Technology Problems, FEB RAS
5a Sukhanova Str., Vladivostok, 690091, Russia
ymat33@yandex.ru

Venedikt M. Kuz'kin
Prokhorov General Physics Institute, RAS
38 Vavilov Str., Moscow, 119991, Russia
kumiov@yandex.ru

Abstract

Methods for holographic processing of noise signals have been developed for the detection and localization of small-sized underwater unmanned vehicles (UVs) with a low level of noise emission. A technique has been proposed for using autonomous uninhabited underwater vehicles (AUVs) with small-sized vector-scalar receiver (VSR) antennas on board to monitor the underwater environment. The appearances of the AUV-transport and AUV-carrier with a small-sized VSR antenna were created. Computational and full-scale experiments were performed, and holographic processing of experimental data was carried out. A new concept for constructing a robotic system for monitoring the underwater environment based on holographic processing is proposed. Prospects for the development of holographic processing for hydroacoustic signals are outlined.

Keywords: AUV, holographic processing, VSR, detection, localization, antennae, UV.

**The work was financially supported by RFBR (project 19-29-06075).*

Images & Tables

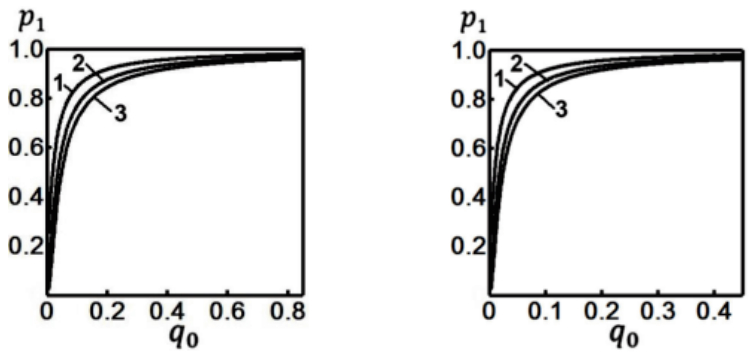


Fig. 1. *Dependence of the probability of correct detection p_1 on the input ratio signal/interference q0 for different values of the probability of false alarm p_2: a – J=10; b – J=20. Curve 1 – $p_2=10^{-1}$, curve 2 – $p_2=10^{-2}$, curve 3 – $p_2=10^{-3}$. Concentration coefficient γ=7 [5].*

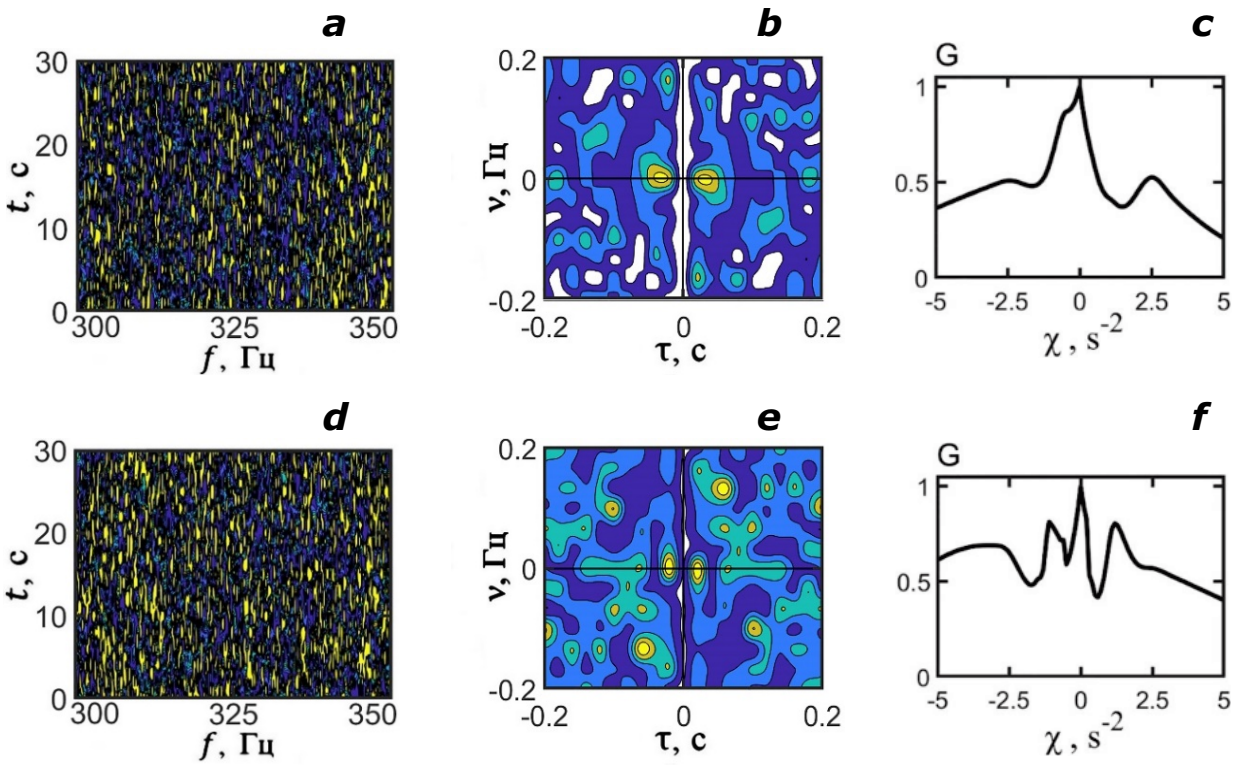


Fig. 2. Normalized interferograms (a, d), holograms (b, e) and detection functions (c, f). Distances: (a, b, c) – 11.0 km, (d, e, f) – 11.5 km [5].

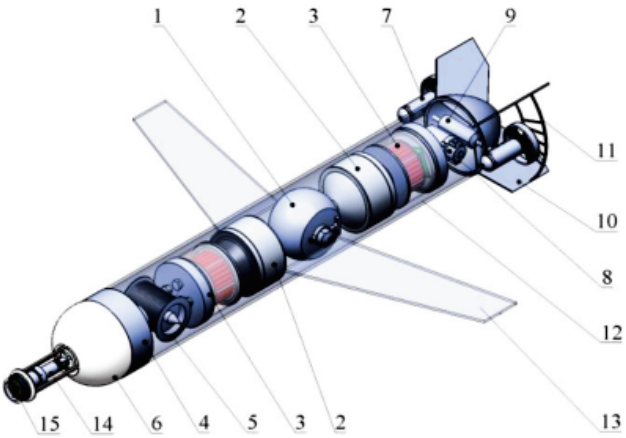


Fig. 3. The design of the hybrid AUV for monitoring the underwater situation: 1 – system for regulating the moment of stability; 2 – buoyancy control system; 3 – electronics and battery unit; 4 – catcher of the produced VSR module; 5 – device for issuing/receiving the VSR module; 6 – the VSR module; 7 – main engine; 8 – control unit for the rotation drive of the main engines; 9 – drive of rotation of main engines; 10 – stabilizer; 11 – protection of engines; 12 – fairing frame of the device; 13 – wing; 14 – radio communication antennas; 15 – satellite navigation system receiver.

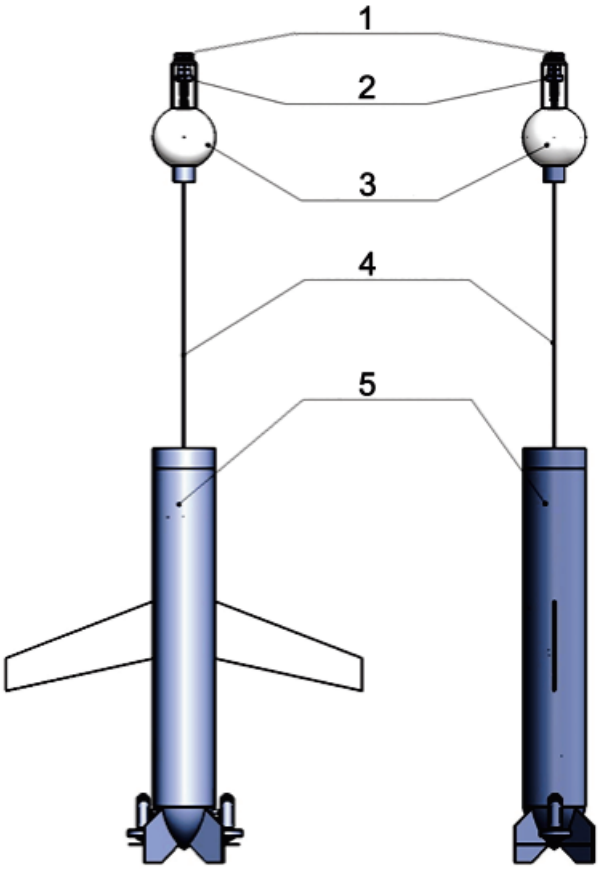


Fig. 4. The design of a hybrid UAV in receiving station mode: 1 – satellite navigation system receiver; 2 – radio communication antennas; 3 – pop-up VSR module; 4 – VSR communication cable; 5 – hybrid UAV.

DOI: 10.22204/2410-4639-2024-121-01-101-111 № 1 (121) январь–март 2024 г.

Table 1. *Approximate technical characteristics of a hybrid AUV*

Specifications	Value
Weight in air, no more than, kg	100
Dimensions, no more than: length×width×height, m	2.3×1.7×0.4
Maximum working depth, m	500
Energy intensity of the energy supply system, W·h	$2 \cdot 10^{24}$
Maximum speed in AUV mode, not less than, m/s	2.0
Autonomy in AUV mode at maximum speed, not less than, km	10
Vertical movement speed in receiving station mode, m/s	0.01–0.03
Maximum speed in glider mode, m/s	0.35
Autonomy in glider mode, not less than, months (total horizontal range – at least 1 500 km)	2

References

1. ***National Security Strategy,*** USA, Washington, The White House, 2015, 29 pp. (https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/docs/2015_national_security_strategy_2.pdf).
2. ***Yu.A. Koryakin, S.A. Smirnov, G.V. Yakovlev*** *Shipboard Hydroacoustic Equipment: Status and Current Problems [Korabelnaya gidroakusticheskaya tekhnika: sostoyanie i aktualnye problemy],* RF, Saint Petersburg, Nauka, 2004, 410 pp. (in Russian).
3. ***D. Gingrass*** *J. Acoust. Soc. Am.,* 1989, **86**, 1940. DOI: 10.1109/MDSP.1989.97041.
4. ***A.G. Sazontov, A.I. Malekhanov*** *Acoustical Physics,* 2015, **61**(2), 213. DOI: 10.1134/S1063771015020128.
5. ***V.M. Kuz'kin, S.A. Pereselkov*** *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics,* 2023, **87**(5), 518. DOI: 10.3103/S1062873822701581.
6. ***S.A. Pereselkov, V.M. Kuzkin*** *Holographic Processing of Broadband Hydroacoustic Signals [Golograficheskaya obrabotka shirokopolosnykh gidroakusticheskikh signalov],* RF, Voronezh, Voronezh State University Publ. House, 2023, 183 pp. (in Russian).
7. ***Yu.V. Matvienko, V.V. Kostenko, V.A. Goy, Yu.A. Khvorostov*** *Pat. RU,* 2664971, 2018 (in Russian).
8. ***V.A. Gordienko*** *Vector-Phase Methods in Acoustics [Vektorno-fazovye metody v akustike],* RF, Moscow, Fizmatlit, 2007, 480 pp. (in Russian).
9. ***M.I. Vashkevich, I.S. Azarov*** *Digital Signal Processing [Tsifrovaya obrabotka signalov],* 2020, №2, 13 (in Russian).
10. ***L.M. Brekhovskikh, Yu.P. Lysanov*** *Theoretical Foundations of Ocean Acoustics [Teoreticheskie osnovy akustiki okeana],* USSR, Leningrad, Hydrometeorological Publ. House, 1982, 264 pp. (in Russian).
11. ***Yu.A. Khvorostov, Yu.V. Matvienko, V.M. Kuz'kin, S.A. Pereselkov, S.A. Tkachenko*** *Underwater Investigations and Robotics [Podvodnye issledovania i robototekhnika],* 2022, №4(42), 84 (in Russian). DOI: 10.37102/1992-4429_2022_42_04_08.
12. ***A.I. Belov, G.N. Kuznetsov*** *Acoustical Physics,* 2014, **60**(2), 191. DOI: 10.1134/S1063771014010047.
13. ***J. Bonnel, N.R. Chapman*** *J. Acoust. Soc. Am.,* 2011, **130**, EL101. DOI: 10.1121/1.3611395.
14. ***J.R. Apel, M. Badiey, C.-S. Chiu, S. Finette, R.H. Headrick, J. Kemp, J.F. Lynch, A.E. Newhall, M.H. Orr, B.H. Pasewark, D. Tielburger, A. Turgut, K. von der Heydt, S.N. Wolf*** *IEEE J. Ocean. Eng.,* 1997, **22**, 465. DOI: 10.1109/48.611138.
15. ***Yu.V. Matvienko, Yu.A. Khvorostov, A.V. Kamorny, M.Yu. Glushchenko, V.M. Kuz'kin, S.A. Pereselkov*** *Underwater Research and Robotics [Podvodnye issledovaniya i robototekhnika],* 2022, №3(41), 4 (in Russian). DOI: 10.37102/1992-4429_2022_41_03_01.