

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОШУМНЫХ ПОДВОДНЫХ ЦЕЛЕЙ В МЕЛКОВОДНЫХ АКВАТОРИЯХ

Ю.В. Матвиенко, Ю.А. Хворостов, А.В. Каморный,
М.Ю. Глущенко, В.М. Кузькин, С.А. Переселков

Анализируются материалы применения в мелководной акватории для контроля подводной обстановки гидроакустической системой, содержащей для приема сигналов автономные приемные модули с комбинированными скалярно-векторными приемниками звука. Представлены технология и условия проведения эксперимента системой из трех разнесенных в пространстве приемных модулей, регистрирующих шумовое поле акватории при движении в ней малогабаритного подводного аппарата в условиях интенсивного судоходства. Приведены общие сведения о методах обработки данных приемных модулей для получения расчетных информационных параметров – энергетических характеристик акустического поля, определенных через квадрат давления и компоненты вектора потока энергии, на основе которых решались задачи обнаружения и оценки направления на подводный аппарат – источник широкополосного шумового сигнала. Даны оценки зоны нахождения подводного аппарата по расчетным значениям направлений на него от приемных модулей. Представлены оценки увеличения дальности обнаружения при обработке исходных данных приемных модулей методом голографической интерферометрии.

Ключевые слова: пассивная система контроля подводной обстановки, гидроакустический приемный модуль, скалярно-векторный приемник, вектор потока акустической энергии, обнаружение и пеленгация подводного маневренного объекта, голографическая интерферометрия сигналов.

Введение

Одним из вариантов создания пассивной системы наблюдения за подводной обстановкой (ПСНПО) в мелководной акватории может быть система, основанная на регистрации и обработке сигналов шумоизлучения подводных движущихся объектов. В качестве приемников акустических сигналов в такой системе наиболее перспективны комбинированные скалярно-векторные приемники (СВП). Такие приемники для заданной точки среды – фазового центра приемника – вырабатывают сигналы звукового давления и трех ортогональных компонентов вектора колебательной скорости акустической волны. Возможности применения СВП для решения актуальных задач гидроакустики анализируются во многих публикациях, например [1–5].

Применение СВП расширяет объем объективных данных об источнике сигнала в сравнении с обычным приемником давления за счет возможности определе-

ния направления на источник и, кроме того, обеспечивает возможность подавления изотропных помех, реализующаяся при временном осреднении компонент вектора потока акустической энергии. Для определения местоположения целей в ПСНПО используется совместная обработка пеленгов от нескольких пространственно разнесенных акустических приемных модулей (ПМ), оснащенных СВП.

При работе ПСНПО на борту каждого установленного ПМ формируются информационные параметры, в качестве которых используются энергетические характеристики шумового акустического поля. Далее информационные параметры доставляются в пост управления системой (ПУС) и обрабатываются с целью решения задач обнаружения, оценки направления на источник шумового сигнала и классификации объекта. По расчетным значениям пеленгов при установке в районе наблюдения нескольких разнесенных приемных модулей формируются оценки зоны нахождения шумящего объекта.

Потенциально ПСНПО может быть выполнена в двух вариантах. В стационарном исполнении система используется для организации длительной охраны портов и морских/прибрежных инфраструктурных объектов. В позиционном – для быстрого развертывания в целях краткосрочной охраны мест якорных стоянок кораблей и судов, а также создания временных рубежей и районов антитеррористического наблюдения. При этом длительная работа стационарной системы обеспечивается путем электроснабжения её подводной части – приемных модулей, по проводным жилам кабеля канала оптоэлектрической связи с ПУС. Для позиционной системы ПМ оснащаются автономными источниками электропитания. В зависимости от поставленной задачи ПМ в ПСНПО могут иметь на отдельных участках контролируемой акватории взаимное пространственное расположение в виде треугольников или линии (рис. 1).

На рис. 1 голубым цветом показана зона, в которой ПСНПО выделяет имеющиеся на акватории источники шумовых сигналов, фиолетовым – зона контроля источников по пеленгу и местоположению с выделением подводных маневренных целей. Внутри треугольника из ПМ находится область контроля повышенной точности, линейное расположение ПМ образует барьерную линию. При этом на аква-

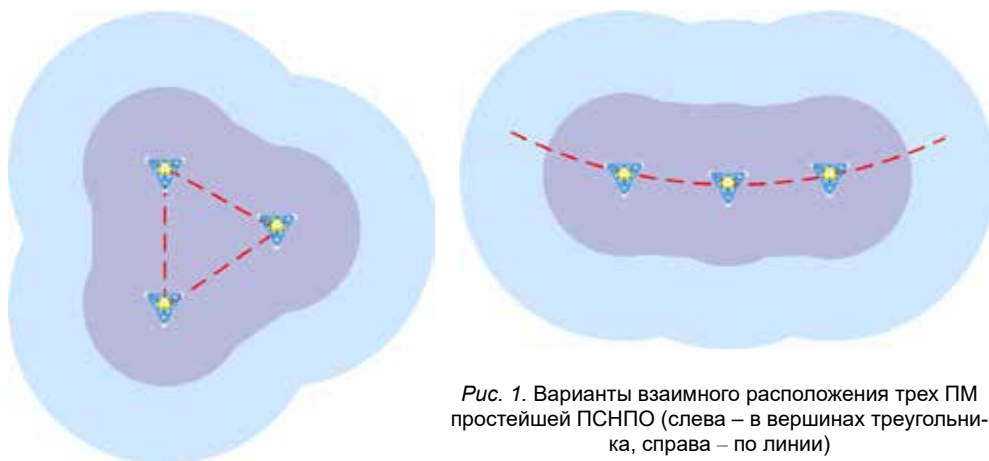


Рис. 1. Варианты взаимного расположения трех ПМ простейшей ПСНПО (слева – в вершинах треугольника, справа – по линии)

тории размер упомянутых зон зависит от величины шумоизлучения источников и характеристик точек позиционирования ПМ (глубины места и гидрологии среды).

На рис. 2 схематично показано несколько вариантов применения ПСНПО для различных охранных задач.

1. Порядок проведения исследований

Технология практической реализации ПСНПО, макеты приемных модулей которой были разработаны ранее, опробована при проведении экспериментальных работ в Керченском проливе осенью 2021 г.

В ходе работ на мелководной акватории были выполнены постановки оборудования, включавшего три пассивных приемных модуля ПМ1–ПМ3 (рис. 3), разнесенных в пространстве в вершинах равнове-

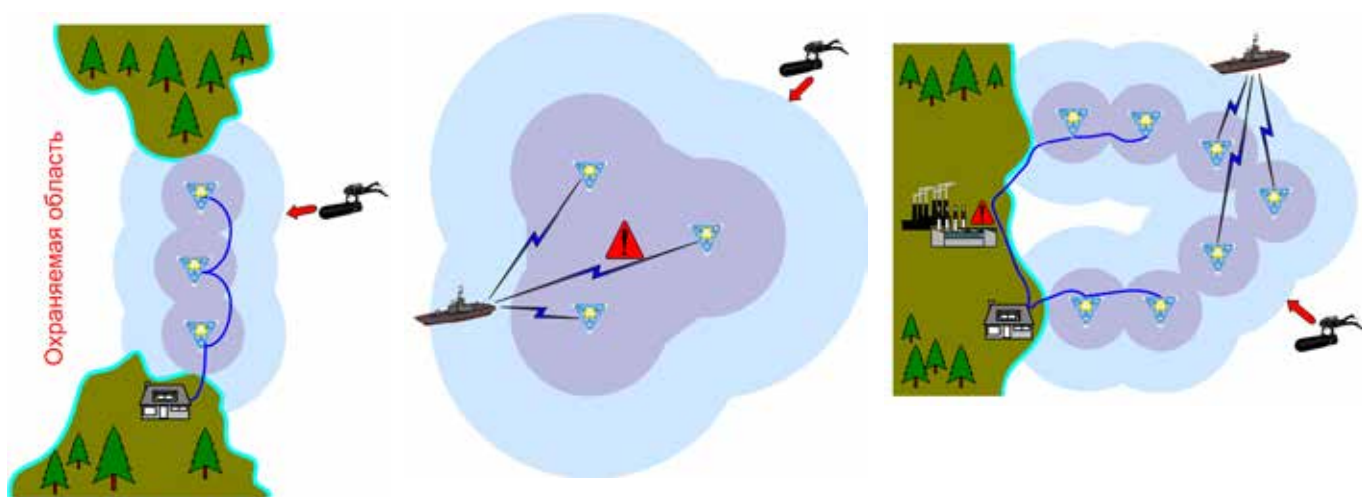


Рис. 2. Организация наблюдения за подводной обстановкой (слева – контроль стационарной ПСНПО морской узкости, в центре – охрана позиционной ПСНПО морского инфраструктурного объекта), справа – охрана комбинированной ПСНПО берегового инфраструктурного объекта

ронного треугольника со стороны около 400 м. С целью сокращения времени постановки все модули в эксперименте были уложены на грунт. Оборудованием была обеспечена запись шумовых сигналов акватории в условиях оживленного судоходства по фарватеру при контролируемом наличии движущейся малогабаритной подводной цели. Работы проводились при глубине места 5–12 м и удалении от берега и фарватера 1–2 км.

Каждый приемный модуль содержал скалярно-векторный приемник гидроакустических сигналов в обтекателе и электронный блок, включающий блок датчиков углового положения СВП, аналоговый блок усиления и фильтрации, АЦП, микроконтроллер, блок цифровой обработки сигналов, накопитель данных, автономный источник электропитания.

В качестве малогабаритной маневренной подводной цели использовался экспериментальный образец автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) «ММТ-300» (рис. 4) с оборудованием поста управления аппаратом на обеспечивающем судне. При проведении эксперимента выполнялись пуски АНПА с контролем его положения по данным гидроакустической навигационной системы аппарата.

2. Общие сведения о методах обработки данных эксперимента

По записанным данным звукового давления и колебательной скорости акустического поля в режиме камеральной обработки с использованием разработанного специального программного обеспечения для каждого установленного приемного модуля были выполнены расчеты информационных параметров,



Рис. 3. Внешний вид приемных модулей ПМ1–ПМ3

в качестве которых использовались энергетические характеристики акустического поля, определенные через квадрат давления, и компоненты вектора потока энергии. Далее информационные параметры подвергались обработке с целью решения задач обнаружения и оценки направления на источник шумового сигнала. По расчетным значениям пеленгов всех модулей делались оценки возможности определения зоны нахождения шумового объекта. Используемые методы обработки защищены патентами [6–8].

Решение задачи обнаружения включало следующие фазы:

- построение сонограмм энергетических информационных параметров в координатах «время – частота – уровень»;
- выполнение оператором сравнительного анализа структуры фрагментов сонограмм в контролируемых временных интервалах, включая интервалы движения обнаруживаемого объекта и интервалы помеховой обстановки в его отсутствие;
- выделение сигналов от шумящих объектов по превышению уровня над помеховым порогом;
- установление факта наличия шумящих объектов;
- анализ динамики изменения информационных параметров объектов в течение времени их нахождения в акватории;
- установление факта обнаружения подводного шумящего маневренного объекта.

Задача определения направления на объекты решалась для каждого модуля по соотношению уровней горизонтальных компонент вектора потока энергии принимаемого акустического сигнала с использованием обработки данных в широком частотном диапазоне и их продолжительного накопления. Решение задачи включало:



Рис. 4. Внешний вид АНПА «ММТ-300»

– формирование для принятого сигнала методами частотно-временной обработки сигналов набора частотных каналов, охватывающих весь наблюдаемый частотный диапазон;

– вычисление в каждом частотном канале горизонтального угла прихода потока акустической энергии и величины интенсивности потока;

– назначение равных горизонтальных угловых секторов, охватывающих весь горизонт наблюдения 0–360 град.

– вычисление для каждого назначенного углового сектора величины секторной интенсивности потока энергии – суммы величин интенсивностей потоков в частотных каналах, имеющих углы прихода в пределах данного сектора, и выделение секторов, в которых величина интенсивности потока энергии превышает пороговую;

– формирование «мгновенного» углового распределения величин секторной интенсивности потоков энергии выделенных угловых секторов;

– формирование из параметров «мгновенных» угловых распределений, вычисленных в циклах обработки временных фрагментов принятого сигнала, сонограммы время-углового прихода потока энергии шумового сигнала в горизонтальной плоскости в координатах «время – угол прихода – энергия»;

– определение из сонограммы время-углового прихода потока энергии доминирующего углового сектора с максимальной величиной секторной интенсивности потока энергии;

– определение направления на источник по ориентации в пространстве углового сектора с максимальной энергией.

По полученным данным о направлении на цель из точек, в которых размещались приемные модули, делалась оценка возможной зоны нахождения объекта движения, размера этой зоны и оценивалась динамика изменения положения этой зоны во времени при движении объекта.

3. Обзор полученных результатов

По каждому пуску подводной цели – АНПА «ММТ-300» – полученные данные каждого модуля представлялись в виде энергетических сонограмм и угловых зависимостей прихода энергии в широкой полосе частот. Полоса частот шумоизлучения малогабаритного АНПА оказалась довольно широкой, при этом наиболее информативным был диапазон 400–1000 Гц [9]. Пример сонограммы звукового поля акватории в координатах «время – частота - энергия» в одном из пусков, зафиксированной одним из ПМ, приведен на рис. 5. При этом превышение уровня регистрируемой энергии над фоновым является признаком наличия шумящего объекта, изменение структуры сонограммы во времени определяет порядок его движения. Характерные моменты движения АНПА на сонограмме отмечены соответствующими комментариями на рисунке.

На рис. 6 (а-в) приведены данные о структуре время-углового распределения звуковой энергии, регистрируемой модулями ПМ1–ПМ3, и выделенных пеленгах на объект движения в ходе одного из пусков АНПА.

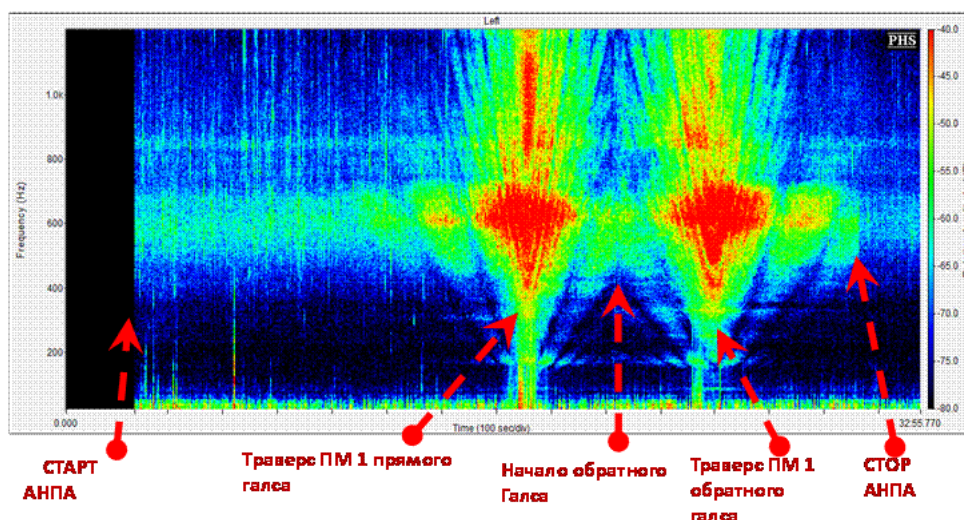
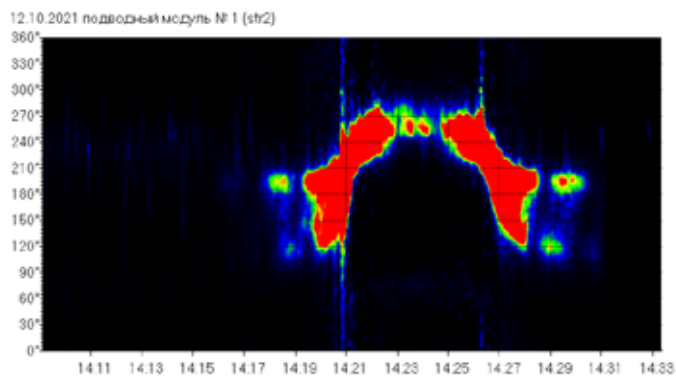
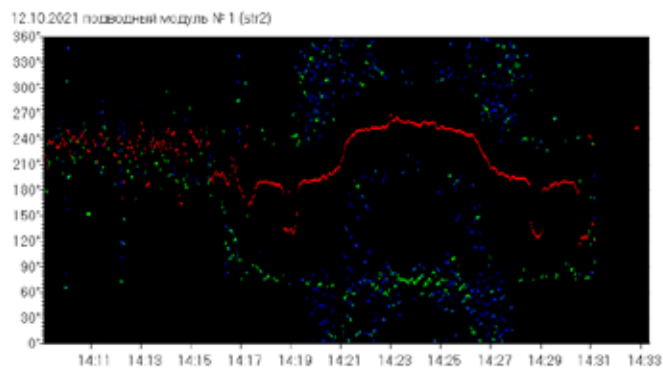


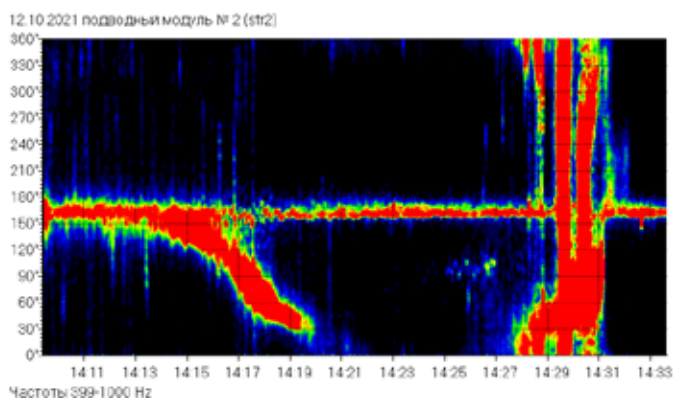
Рис. 5. Сонограмма энергии звукового поля при первом пуске АНПА (векторный канал СВП), скорость движения аппарата 1,5 м/с



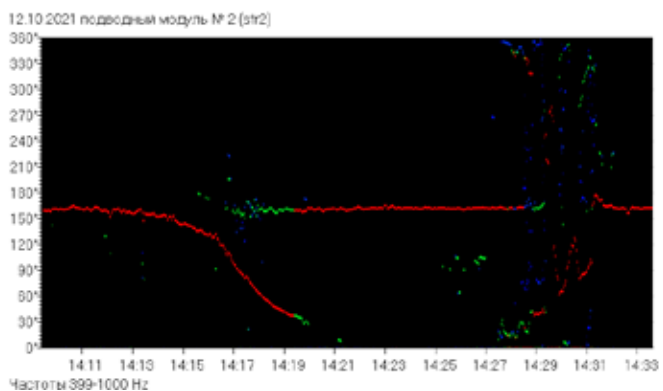
а) ПМ1. Время-угловое распределение принимаемой энергии в диапазоне 400-1000Гц



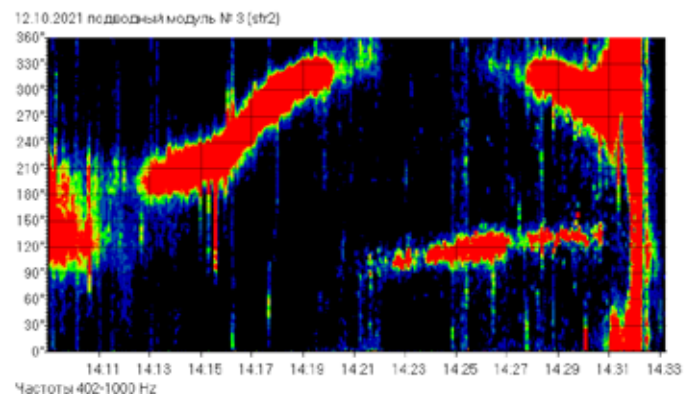
ПМ1. Пеленг на объект движения



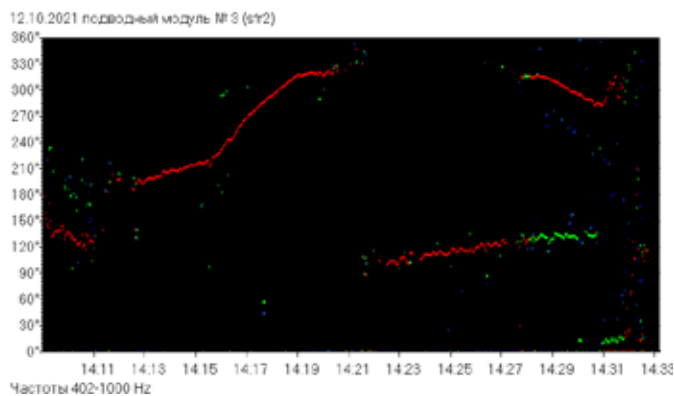
б) ПМ2. Время-угловое распределение принимаемой энергии в диапазоне 400-1000Гц



ПМ2. Пеленг на объект движения



в) ПМ3. Время-угловое распределение принимаемой энергии в диапазоне 400-1000Гц



ПМ3. Пеленг на объект движения

Рис. 6. Структура время-углового распределения звуковой энергии, регистрируемой модулями ПМ1–ПМ3, и выделенные пеленги на объект

По расчетным значениям пеленгов, полученным установленными приемными модулями, были восстановлены траектории движения для двух пусков АНПА (рис. 7). Кроме расчетных значений пеленгов для определения местоположения аппарата использовалась дополнительная фильтрация, основанная на наличии перемещения (скорости) АНПА.

4. Применение голографической интерферометрии для локализации малозумных подводных объектов

Экспериментальные данные эксперимента были дополнительно подвергнуты обработке с использованием голографической интерферометрии. Целью

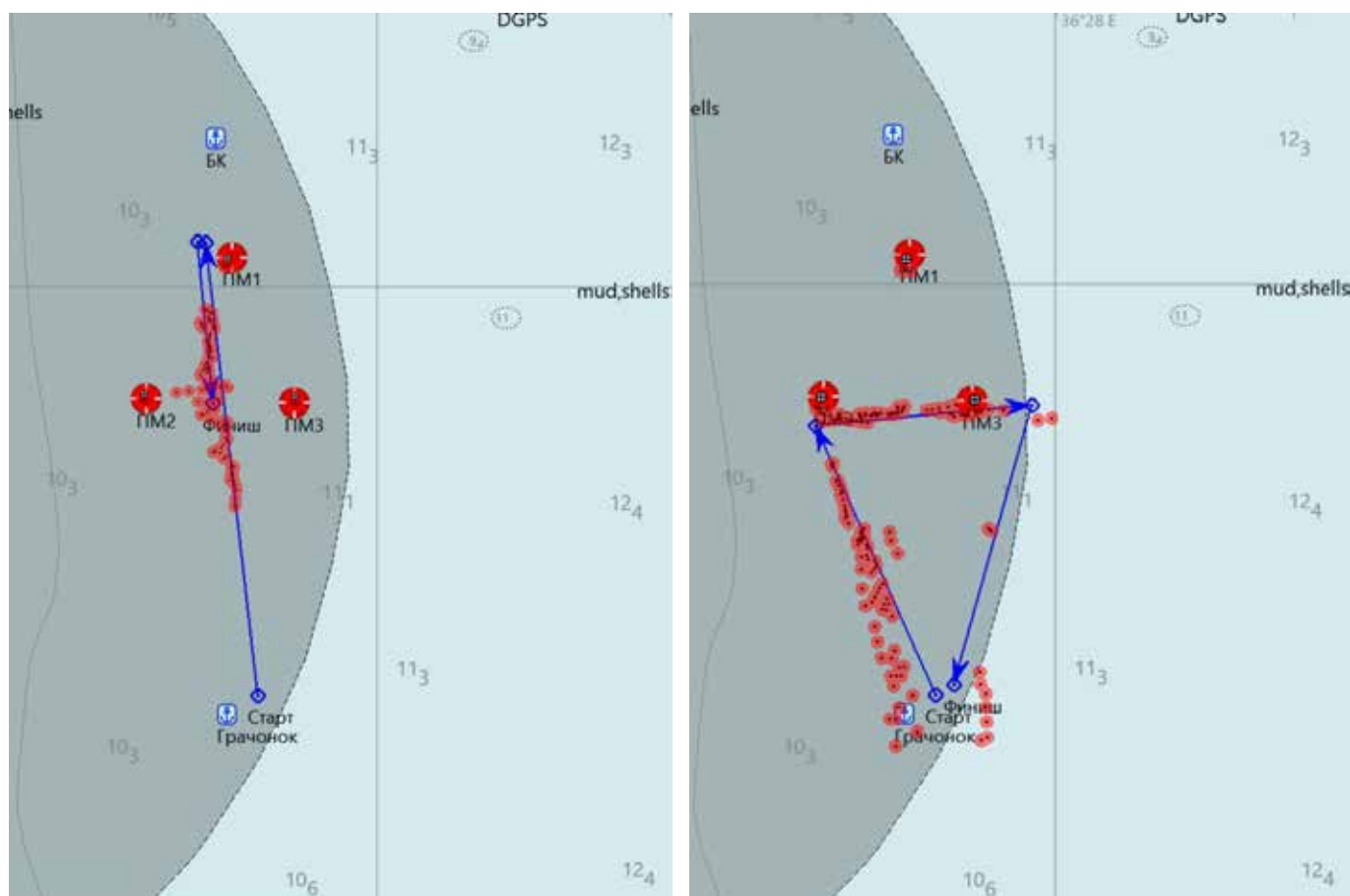


Рис. 7. Оценка зоны нахождения АНПА (красные кружки). Слева – при первом пуске аппарата (выполнение прямого и обратного галсов), справа – при втором пуске (движение по треугольнику). Синие линии – траектория движения по данным бортовой навигации АНПА

обработки была оценка возможности увеличения дальности обнаружения и, что не менее важно, формализация технологии такой обработки для реализации в системах автоматического обнаружения.

Голографическая обработка основана на устойчивых структурных особенностях интерференционной картины (интерферограммы) звукового поля, формируемой движущимся широкополосным источником звука. Под интерферограммой понимается квадрат модуля принимаемого сигнала в переменных частота–время. Обработка реализует квазикогерентное накопление спектральной плотности вдоль локализованных полос интерферограммы в переменных частота–время. К интерферограмме применяется двумерное преобразование Фурье, т.е. записывается голограмма выделенного фрагмента шумоизлучения источника в заданных частотном диапазоне и промежутке времени. Природа двумерных интегральных преобразований периодических структур такова, что сигнальная информация, распределенная по всей плоскости на входе, локализуется на выходе в малой области. Накопление помехи вдоль интерференцион-

ных полос некогерентно, и на выходе интегрального преобразования спектральная плотность помехи распределена по всей области голограммы. Это позволяет решать проблему обнаружения и идентификации малозумных источников, которые ранее другими методами обработки не поддавались решению. Теоретические основы голографической интерферометрии и ее применения для локализации маневренных малозумных подводных источников звука изложены, например, в публикациях [10–14].

При обработке экспериментальных данных голограммы формировались во временных интервалах 1 мин и в частотном диапазоне 700–1700 Гц. Далее вычислялись угловые распределения спектральной плотности голограммы (функции обнаружения). Значение функции обнаружения может быть использовано в качестве количественного параметра для принятия решения в системах автоматического обнаружения. На рис. 8 и 9 приведены примеры построения интерферограмм, голограмм и функций обнаружения в различные моменты времени движения АНПА во время первого пуска при регистрации

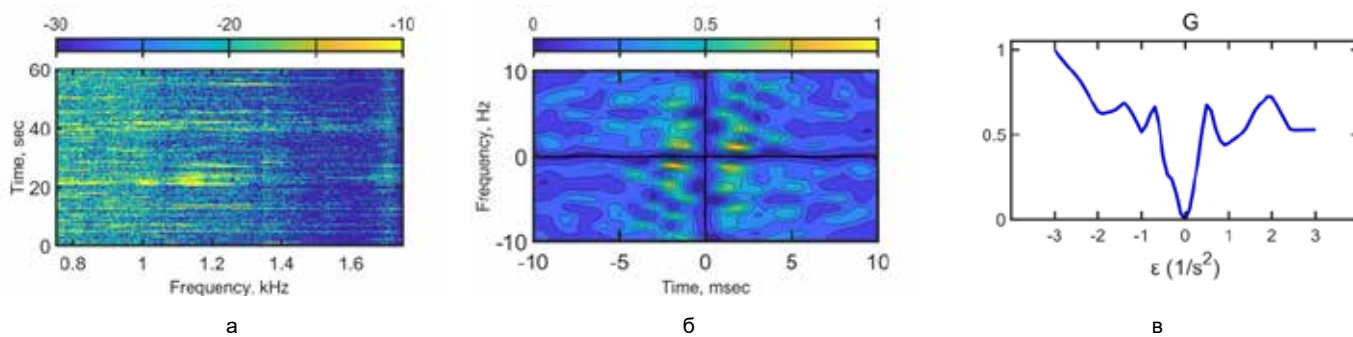


Рис. 8. Нормированные интерферограмма (а), голограмма (б), функция обнаружения (в) до пуска АНПА

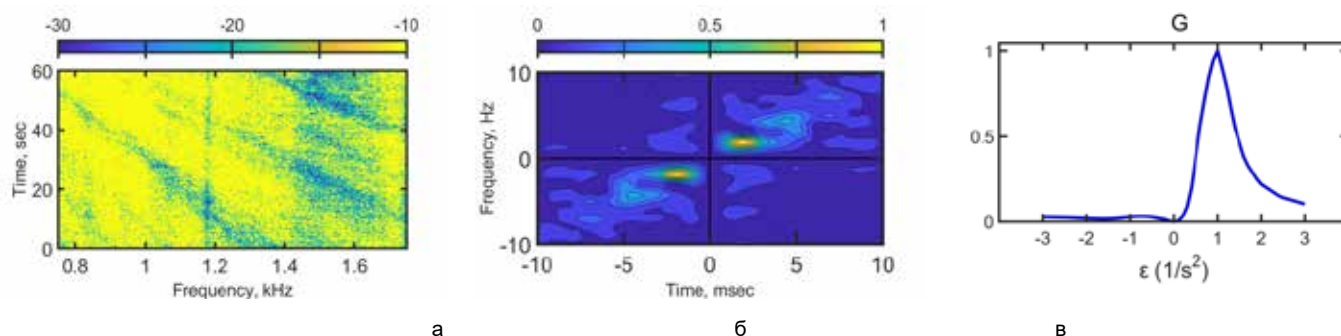


Рис. 9. Нормированные интерферограмма (а), голограмма (б), функция обнаружения (в) в первом пуске АНПА. Приближение АНПА к ПМ1 и прохождение области траверса, дБ

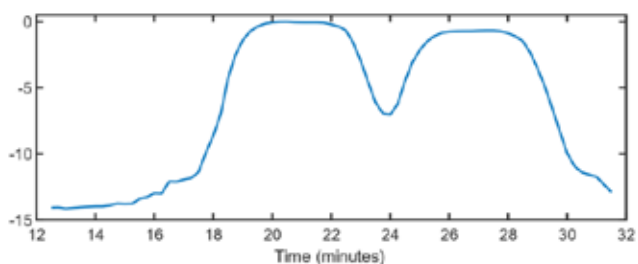


Рис. 10. Временная зависимость нормированной функции обнаружения АНПА модулем ПМ1. Канал СВП вертикальной компоненты колебательной скорости частиц среды

звукового давления ПМ1. Следует заметить, что значения функций обнаружения на этих рисунках про- нормированы на максимальные значения в соответ- ствующее время.

Голографическая обработка позволяла уверенно обнаруживать и выделять шумовой сигнал АНПА на фоне помехи и других локализованных источников шума в акватории Керченского пролива. На рис. 10 приведен пример построения нормированной функ- ции обнаружения АНПА за все время его первого пус- ка. Фактически это оценка уровня шумоизлучения аппарата при голографической обработке.

Голографический метод обработки был исполь- зован также для определения направления на объект движения из точек установки приемных модулей [15].

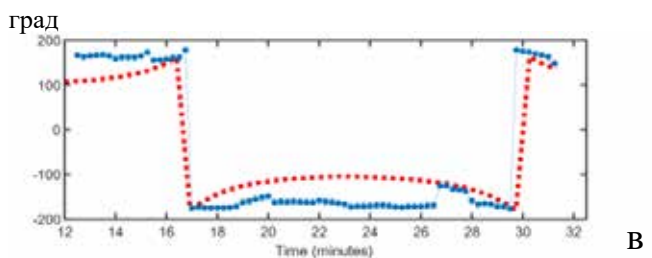
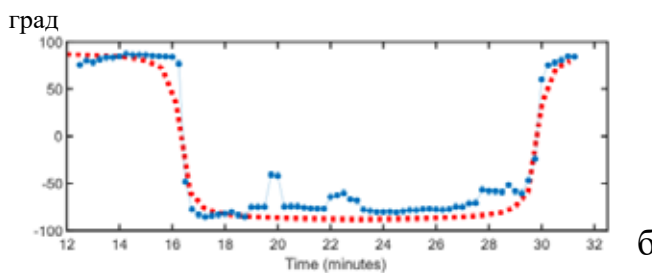
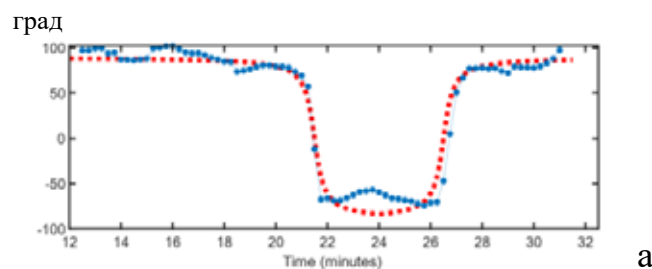


Рис. 11. Временная зависимость пеленга: а – ПМ1, б – ПМ2, в – ПМ3. Модельная зависимость – красная линия, эксперименталь- ная – синяя линия

На рис. 11 приведены пеленги на АНПА, полученные от трех ПМ в течение всего времени первого пуска аппарата. По оси абсцисс отложено время в минутах, по оси ординат – пеленг в градусах.

6. Выводы по результатам обработки эксперимента

Выполнена проверка работоспособности ПСНПО в мелководной акватории по контролю движения малогабаритного АНПА. Показано, что АНПА обнаруживается на всех дальностях, которые были заданы условиями проведения работ. Максимальная дальность обнаружения АНПА составила около 1000 м. При движении АНПА по контролируемой зоне отношение сигнал/помеха составляло от единиц до нескольких десятков децибел. Информационные параметры акустического поля, определенные через компоненты вектора потока энергии, выше аналогичных параметров, определенных по данным звукового давления.

Выполнены оценки углового положения АНПА каждым из трех установленных ПМ на основе расчета и анализа время-углового прихода энергии. По-

казано, что АНПА достаточно уверенно пеленгуется ПМ с максимальной дистанцией не менее 900 м. Отдельные сбои при пеленговании объясняются нахождением объекта в так называемой слепой зоне угловых секторов СВП.

Приведены оценки зоны нахождения АНПА по данным пеленгов от ПМ. При установке ПМ в виде треугольной измерительной базы со сторонами около 400 м продемонстрирована возможность определения зоны нахождения и частично траекторий движения АНПА в двух пусках. Максимальная дальность объекта от измерительной базы, образованной любыми двумя приемными модулями и при которой устанавливалось местоположение АНПА в эксперименте, составляла около 600 м.

При выбранном времени накопления и частотном диапазоне голографическая обработка по оценочным данным могла бы обнаруживать и пеленговать АНПА на расстояниях до четырех километров.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-29-06075).

ЛИТЕРАТУРА

1. Щуров В.А. Векторная акустика океана. Владивосток: Дальнаука, 2003. 307 с.
2. Дзюба В.П. Скалярно-векторные методы в акустике. Владивосток: Дальнаука, 2006. 194 с.
3. Каришнев Н.С., Кузнецов Г.Н., Луньков А.А. Обнаружение и оценка координат шумового источника в мелком море с использованием скалярной или скалярно-векторной антенны и согласованной фильтрации // Гидроакустика. 2014. № 20. С. 74–80.
4. Гордиенко В.А., Гордиенко Е.Л., Краснописцев Н.А., Некрасов В.Н. Помехоустойчивость гидроакустических приемных систем, регистрирующих поток акустической мощности // Акуст. журн. 2008. Т. 54, № 5. С. 774–785.
5. Селезнев И.А., Глебова Г.М., Жбанков Г.А., Мальцев А.М., Харахашьян А.М. Вероятностные характеристики обнаружения сигналов одиночным скалярно-векторным модулем // Подводные исследования и робототехника. 2016. № 2 (22). С. 44–49.
6. Матвиенко Ю.В., Хворостов Ю.А., Каморный А.В. Способ обнаружения подводного источника широкополосного шума: патент 201901778 РФ. № 2699923; заявл. 23.01.2019; опубл. 11.09.2019, Бюл. № 24.
7. Матвиенко Ю.В., Хворостов Ю.А., Каморный А.В. Способ обнаружения подводного источника широкополосного шума: патент 2019121077 РФ. № 2715431; заявл. 03.07.2019; опубл. 28.02.2020, Бюл. № 4.
8. Матвиенко Ю.В., Каморный А.В., Хворостов Ю.А. Об одном подходе к решению задачи обнаружения подводного источника шумовых сигналов // Подводные исследования и робототехника. 2018. № 2 (26). С. 37–43.
9. Хворостов Ю.А., Матвиенко Ю.В. Характеристики собственного шумоизлучения малогабаритного АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4 (30). С. 58–53.
10. Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Пересёлков С.А. Спектрограмма и локализация источника звука в мелком море // Акуст. журн. 2017. Т. 63, № 4. С. 406–418.
11. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Kaznacheev I.V. Spectrogram and localization of a sound source in shallow water // Phys. Wave Phenom. 2017. V. 25. No 2. P. 156–163.
12. Казначеев И.В., Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Пересёлков С.А. Интерферометрический метод обнаружения движущегося источника звука векторно-скалярным приемником // Акуст. журн. 2018. Т. 64, № 1. С. 33–45.
13. Кузькин В.М., Матвиенко Ю.В., Переселков С.А. Применение интерферометрической обработки для локализации малозумных источников звука // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4 (30). С. 49–57.
14. Казначеева Е.С., Кузькин В.М., Матвиенко Ю.В., Пересёлков С.А., Хворостов Ю.А. Оценка дальности обнаружения малогабаритного подводного аппарата по его шумовому полю // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 4 (38). С. 80–84.
15. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Lyakhov G.A., Pereselkov S.A., Prosovetskiy D.Yu. Direction finding of a sound source // Phys. Wave Phenom. 2019. V. 27. No. 3. P. 237–241.

Об авторах

МАТВИЕНКО Юрий Викторович, д.т.н., главный научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Научные интересы: подводная робототехника, гидроакустическая навигация, гидроакустические комплексы и системы

Тел.: +79089821389

E-mail: ymat33@yandex.ru

ORCID ID: 0000-0002-4486-3719

ХВОРОСТОВ Юрий Анатольевич, ведущий конструктор

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Научные интересы: акустика океана, прикладная гидроакустика, векторно-скалярные гидроакустические системы, локация и обнаружение источников звука

Тел.: +79147036723

E-mail: oss.dvfu@mail.ru

ORCID ID: 0000-0002-4805-3051

КАМОРНЫЙ Александр Валерьевич, старший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Научные интересы: подводная робототехника, гидроакустическая навигация, гидроакустические комплексы и системы

Тел.: +79242327605

E-mail: greatsanial@mial.ru

ORCID ID: 0000-0002-9851-2826



ГЛУЩЕНКО Михаил Юрьевич, к.т.н., главный конструктор - заместитель руководителя Бюро морских робототехнических систем.

Акционерное общество «Концерн ГРАНИТ»

Адрес: 119019, г. Москва, ул. Гоголевский бульвар, д. 31, стр. 2

Научные интересы: роботизированные системы, прикладная гидроакустика, векторно-скалярные гидроакустические системы, локация и обнаружение источников звука

E-mail: glushchenko.m@granit-concern.ru

ORCID ID: 0000-0002-4908-9742

КУЗЬКИН Венедикт Михайлович, д.ф.-м.н., ведущий специалист Бюро морских робототехнических систем

Акционерное общество «Концерн ГРАНИТ»

Адрес: 119019, г. Москва, ул. Гоголевский бульвар, д. 31, стр. 2

Научные интересы: прямые и обратные задачи, распространение и рассеяние звука, гидроакустические волноводы, интерференция звуковых волн, акустическая голография

E-mail: kumiov@yandex.ru

ORCID ID: 0000-0002-4136-3081

ПЕРЕСЕЛКОВ Сергей Алексеевич, д.ф.-м.н., заведующий кафедрой Математической физики и информационных технологий, профессор

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет»

Адрес: 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1

Научные интересы: прямые и обратные задачи, распространение и рассеяние звука, гидроакустические волноводы, интерференция звуковых волн, акустическая голография

E-mail: pereselkov@yandex.ru

ORCID ID: 0000-0003-4083-8046

Для цитирования:

Матвиенко Ю.В., Хворостов Ю.А., Каморный А.В., Глущенко М.Ю., Кузькин В.М., Переселков С.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОШУМНЫХ ПОДВОДНЫХ ЦЕЛЕЙ В МЕЛКОВОДНЫХ АКВАТОРИЯХ // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 3 (41). С. 4–14. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_41_03_01. EDN: CUYKTZ.

