

на правах рукописи



Ткаченко Сергей Александрович

**ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИИ
МАЛОШУМНЫХ ПОДВОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЗВУКА**

Специальность 1.3.7. Акустика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный университет»

Научный руководитель:

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», кафедра математической физики и информационных технологий, заведующий кафедрой, доктор физико-математических наук, профессор
Пересёлков Сергей Алексеевич

Официальные оппоненты:

Институт прикладной физики имени А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН), отдел геофизической акустики, лаборатория акустических методов в гидрофизике, заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук, профессор
Хилько Александр Иванович

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», (МГУ им. М.В. Ломоносова), кафедра акустики, кандидат физико-математических наук, доцент
Шуруп Андрей Сергеевич

Защита диссертации состоится 12.10 2023 г. в 12-00 на заседании диссертационного совета ЮФУ801.02.04 техническим наукам при ИНЭП ЮФУ по адресу Ростовская область, г. Таганрог, ул. Шевченко, д. 2, "Точка кипения".

Отзывы на автореферат (укажите дату, полностью свои фамилию, имя, отчество, ученую степень со специальностью, звание, организацию, подразделение, должность, адрес, телефон, e-mail, с обязательной нумерацией страниц) с заверенной подписью рецензента и печатью учреждения просим направлять в 2 экз. учёному секретарю диссертационного совета ЮФУ801.02.04 при ЮФУ по адресу: 347922, Ростовская область, г. Таганрог, ул. Шевченко, д. 2, Е301, а также в формате .pdf - на e-mail: kravchukda@sfedu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. Ю.А. Жданова Южного федерального университета по адресу: 244090, г. Ростов-на-Дону, ул Зогра, 21Ж и на сайте по ссылке: <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1317386/>

Автореферат разослан «___» _____ 20___ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ЮФУ801.02.04



Д.А. Кравчук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одной из наиболее ярких и важных проблем в области гидроакустики является, безусловно, создание контроля подводной обстановки акватории в течение заданного времени, способного обеспечить обнаружение и локализацию движущихся малошумных подводных источников звука. Под локализацией источника понимается определение его параметров: пеленга, радиальной скорости (проекции скорости по направлению к приемнику), удаления и глубины. Трудности решения задачи вытекают из ограниченности применяемых методов обработки гидроакустической информации, не учитывающих особенности интерференционной картины, формируемой широкополосным источником. Как показали теоретические исследования, численные и натурные эксперименты последних лет, решение проблемы делает возможным голографическая обработка интерференционной картины (интерферограммы), вызванной волноводной дисперсией и многомодовым распространением. Интерферограмма представляет собой распределение в частотно-временной области квадрата модуля поля, регистрируемого приемником. В случае векторных компонент поля под интерферограммой понимается модуль из произведения или модуль квадрата суммы различных их составляющих.

Применение голографического подхода позволяет накапливать спектральную плотность квазикогерентным способом по интерференционным полосам интерферограммы. Двумерное преобразование Фурье интерферограммы (голограмма) позволяет сконцентрировать спектральную плотность в области голограммы в виде нескольких фокальных пятен сформированных интерференцией мод звукового поля. Помеха накапливается не когерентно и распределена во всей области голограммы. Под квазикогерентным накоплением спектральной плотности понимается процесс, при котором энергия результирующего процесса не равна сумме энергий интерферирующих волн (мод) и зависит от их разности фаз. Вдоль локализованных полос интерферограммы разность фаз между интерферирующими модами сигнала в различные моменты времени можно приблизительно считать постоянной. Способ обработки, по сравнению с другими известными методами, характеризуется большой помехоустойчивостью и позволяет осуществлять обнаружение и локализацию шумового источника в условиях зашумленной интерферограммы при малом входном отношении сигнал/помеха (с/п).

В настоящее время успешное применение голографической обработки широкополосных сигналов продемонстрировано в цикле узловых численных и натурных экспериментах низкочастотного диапазона (десятки и сотни герц) с применением одиночных векторно-скалярных приемников (ВСП). Во многих практических случаях, однако, обработка должна проводиться в высокочастотном (килогерцовом) диапазоне с применением антенн, которые увеличивают дальность обнаружения и повышают помехоустойчивость. Остается открытым вопрос об эффективности голографической обработки в таких условиях. При этом реалистические оценки размера контролируемой акватории должны основываться на экспериментальных данных о спектральных

характеристиках шумоизлучения подводных источников и фонового шума акватории. Таким образом, рассмотрение голографического метода обнаружения и локализации малозумных источников, основываясь на их спектрах шумоизлучения, в высокочастотном диапазоне с использованием антенн представляет собой сложную, но весьма актуальную задачу. Сложность усугубляется тем, что, во-первых, спектральные уровни звукового давления шумоизлучения зависят от режима и условий движения подводного аппарата и, во-вторых, изменяется механизм формирования интерферограммы по сравнению с низкочастотным диапазоном.

Цель и задачи

Целью диссертационной работы является апробация в высокочастотном диапазоне голографического метода обнаружения и локализации малозумных подводных источников с использованием одиночных ВСП, а также изучение и разработка голографических методов локализации спектральной плотности в области частота-время-расстояние с применением линейных антенн.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Определение спектров шумоизлучения малогабаритного автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) в дальней зоне акустического поля. Спектральные уровни звукового давления исследовались при различных режимах и условиях движения аппарата. Оценки предельной дальности обнаружения АНПА в высокочастотном диапазоне.

2. Апробация в натуральных экспериментах голографического метода обнаружения и локализации подводных источников в высокочастотном диапазоне с применением одиночных ВСП.

3. Разработка теории голографической обработки гидроакустической информации с использованием линейных антенн.

4. Решение задачи обнаружения сигнала шумового источника на основе критерия Неймана–Пирсона с использованием одиночного приемника и линейных антенн.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования диссертационной работы является голографический метод обнаружения и локализации малозумных подводных аппаратов. Предметом исследования являются оценки дальности обнаружения и определение параметров шумового источника в высокочастотном диапазоне, полученные с применением одиночных ВСП и линейных антенн.

Методы исследования

При выполнении поставленных в диссертации задач применялись теоретический анализ и численное моделирование в рамках модового описания структуры звукового поля, а также разработанные методы голографической обработки натуральных данных, полученных в ходе реальных экспериментов, проведенных в различных акваториях.

Научная новизна

1. Впервые получены и проанализированы спектры шумоизлучения малогабаритного

АНПА в дальней зоне акустического поля при различных режимах и условиях движения аппарата в мелководной акватории.

2. Разработана и реализована частотно-временная обработка широкополосных гидроакустических сигналов, согласованная с интерференционной картиной поля источника, которая дает возможность обнаруживать и локализовать источник в высокочастотной области.

3. Впервые с использованием одиночных ВСП выполнена голографическая обработка обнаружения и локализации малогабаритного АНПА в высокочастотном диапазоне в мелководной акватории.

4. Представлена теория голографической обработки гидроакустической информации с использованием линейных антенн. Получена связь спектральной плотности голограммы, формируемой широкополосным источником, с апертурой и угловой зависимостью принимаемого поля. Оценены коэффициент усиления, характеристика направленности и помехоустойчивость обработки.

5. Для голографической обработки с применением одиночных ВСП и линейных антенн решена задача обнаружения шумового источника на основе критерия Неймана–Пирсона.

Практическая значимость

Результаты, полученные в диссертации, существенно дополняют качественные и количественные представления о работоспособности голографической обработки гидроакустической информации. Более конкретно можно отметить следующие моменты.

1. Алгоритмы голографического метода обнаружения и локализации малошумных подводных источников в настоящее время подготовлены к внедрению в практику, что подтверждается защищенными свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ и патентом.

2. Спектральные характеристики АНПА в дальней зоне позволяют получать реалистические оценки дальности обнаружения аппарата и, как следствие, оценивать размеры контролируемой зоны исследуемой акватории.

3. Предложенная частотно-временная обработка высокочастотных сигналов, согласованная с интерференционной картиной поля источника, дает возможность восстанавливать временные зависимости пеленга, удаленности, глубины, скорости и траекторию движения.

4. На основе экспериментальных данных показана эффективность голографического метода обнаружения и локализации малогабаритных АНПА в высокочастотном диапазоне в мелководных акваториях на фоне интенсивного судоходства.

5. Разработанная теория голографической обработки с использованием линейных антенн позволяет увеличить дальность обнаружения и повысить помехоустойчивость.

6. При фиксированном числе элементов антенны и входном отношении с/п построенная в рамках голографической обработки на базе критерия Неймана–Пирсона статистическая теория обнаружения позволяет получить зависимость вероятности

правильного обнаружения от вероятности ложной тревоги.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Экспериментальные спектральные характеристики шумоизлучения АНПА в дальней зоне, позволяющие получать реалистические оценки дальности обнаружения малогабаритного АНПА по их шумовому полю в широком диапазоне частот и при разных режимах работы и скоростях движения.

2. Результаты численного эксперимента определения предельной дальности обнаружения малогабаритного АНПА и восстановления расстояния на этих дальностях с применением одиночного ВСП.

3. Частотно-временная обработка, согласованная с интерференционной картиной, формируемой шумовым источником, в высокочастотном диапазоне с применением одиночного ВСП восстанавливает временные зависимости пеленга, скорости, удаленности и глубины.

4. В мелководной акватории с применением одиночных ВСП голографическая обработка в высокочастотном диапазоне на расстоянии одного километра обеспечивает обнаружение и пеленгование малогабаритного АНПА на фоне надводных судов.

5. Теория голографической обработки гидроакустической информации с использованием линейных антенн.

6. Аналитические зависимости кривых обнаружения шумового сигнала, полученные в рамках голографической обработки на основе критерия Неймана–Пирсона с применением одиночного приемника и линейных антенн.

Достоверность результатов

Результаты, полученные в диссертационной работе, согласуются с независимыми результатами других исследователей. Оценки, полученные в рамках теоретического анализа, согласуются с результатами численных экспериментов и результатами обработки натуральных экспериментов.

Апробация работы

Основные материалы диссертации доложены на следующих конференциях: XVII школа-семинар им. акад. Л.М. Бреховских, совмещенная с XXXIII сессией РАО. Москва, ИО РАН, 2020 г., 19–23 октября; XXVI Международная научно-техническая конференция «Радиолокация. Навигация. Связь». Воронеж, ВГУ, 2020 г., 29 сентября–01 октября; XXVIII Международная научно-техническая конференция «Радиолокация. Навигация. Связь», посвященная памяти Б.А. Осипова. Воронеж, 2022 г., 27–29 сентября.

Работа подготовлена в рамках плановых НИР кафедры математической физики и информационных технологий Воронежского государственного университета, а также при частичной финансовой поддержке грантов: Президента РФ (проект МК-4846.2022.4), РФФИ (проекты 19-29-06075, 19-08-00941) и РНФ (проект 23-61-10024).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, из них 9 статей в журналах из «Перечня рецензируемых научных изданий ... » (Приказ N 234-ОД от 27 сентября 2022 г.,

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»), 1 статья в журнале из перечня ВАК, 8 статей в журналах из международных баз цитирования Web of Science и Scopus. По теме диссертации С.А. Ткаченко имеет 5 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ и 1 патент на изобретение.

Личный вклад автора

Автор диссертационной работы принимал непосредственное участие в проведении теоретического анализа, численных экспериментов, обработке экспериментальных данных. Постановка задач диссертационного исследования и методы их решения были сформулированы научным руководителем. Результаты диссертационной работы получены либо при непосредственном участии соискателя, либо им лично.

Структура и объем работы

По своей структуре диссертационная работа состоит из пяти содержательных глав, введения, заключения и списка литературы. Объем диссертации – 106 страниц. Она содержит 66 рисунков и 2 таблицы. Первый параграф каждой главы содержит список рассматриваемых вопросов, в нем указаны работы соискателя по этим вопросам. Заключительная часть каждой главы содержит перечень основных результатов. В диссертационной работе используется сквозная нумерация: формула (2.5) – пятая формула второй главы, рис. 1.2 – второй рисунок первой главы, табл. 2.3 – третья таблица из второй главы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено выбору научного направления исследований, актуальности решаемой проблемы, целям и задачам диссертации, положениям, выносимым на защиту. В этом разделе обоснована научная новизна и практическая значимость исследования. Представлены публикации и доклады соискателя по теме диссертации. Во введении приведено краткое содержание работы.

Первая глава носит обзорный характер.

На сегодняшний день можно выделить два основных направления решения проблемы обнаружения и локализации малошумных подводных источников звука. Одно из них, которое имеет длительную историю, основано на согласованной со средой распространения пространственной обработке гидроакустических сигналов. Другое направление, предложенное за последние несколько лет, основано на голографической обработке интерферограмм, формируемых широкополосным источником. В данной главе описано состояние вопроса по двум этим направлениям и практической их реализуемости, ориентируясь в первую очередь на второе направление, являющимся предметом исследования диссертационной работы.

В параграфе 1.2 рассмотрено современное состояние вопроса по локализации подводного источника звука на основе согласованной со средой распространения пространственной обработке гидроакустических сигналов.

В параграфе 1.3 описано состояние применения голографической обработки для

обнаружения и локализации малозумных подводных источников с использованием ВСП.

В параграфе 1.4 кратко изложены физико-математические принципы голографического метода обнаружения и локализации движущихся подводных источников шума с применением одиночных ВСП, которые представляют непосредственный физический интерес при интерпретации результатов численных и натуральных экспериментов, представленных в диссертации.

Голографическая обработка реализуется следующим образом. За время наблюдения Δt в полосе Δf накапливаются J независимых шумовых реализаций звукового давления $P(t)$ и горизонтальных компонент колебательных скоростей частиц жидкости $V_{x,y}(t)$ длительностью δt_1 и с временным интервалом между ними δt_2

$$J = \Delta t / (\delta t_1 + \delta t_2). \quad (1)$$

Преобразованием Фурье восстанавливаются комплексные текущие спектры $P(f, t)$, $V_{x,y}(f, t)$. Формируются интерферограммы $I(f, t) = |P(f, t)|^2$, $X(f, t) = V_x(f, t)P^*(f, t)$, $Y(f, t) = V_y(f, t)P^*(f, t)$. Применением к интерферограммам $I(f, t)$, $X(f, t)$, $Y(f, t)$ двумерного преобразования Фурье вычисляются голограммы $F_I(\tau, \nu)$, $F_X(\tau, \nu)$, $F_Y(\tau, \nu)$. Например, применительно к интерферограмме $X(f, t)$ голограмма имеет вид

$$F_X(\tau, \nu) = \int_0^{\Delta t} \int_{f_1}^{f_2} X(f, t) \exp[i2\pi(\nu t - f\tau)] df dt, \quad (2)$$

где ν и τ – частота и время голограммы; $f_{1,2} = f_0 \mp (\Delta f/2)$, f_0 – средняя частота.

Спектральные плотности голограмм локализованы в двух узких полосах плоскости (τ, ν) , зеркально перевернутых относительно начала координат, в виде отдельных фокальных пятен, обусловленных интерференцией мод различных номеров. Они расположены в первом и третьем квадрантах голограммы, если источник приближается к приемнику (радиальная скорость $w < 0$), и во втором и четвертом квадрантах, когда источник удаляется от приемника ($w > 0$). При неподвижном источнике и движении по дуге окружности фокальные пятна расположены на оси времени τ . Ширина полосы ограничена прямыми

$$\nu = \varepsilon\tau + \delta\nu, \quad \nu = \varepsilon\tau - \delta\nu. \quad (3)$$

Здесь $\delta\nu = 2/\Delta t$ – ширина фокальных пятен в направлении оси ν ; ε – угловой коэффициент прямой, на которой расположены координаты пиков фокальных пятен. Вне этой полосы спектральная плотность практически подавлена. В направлении оси τ ширина фокальных пятен $\delta\tau = 2/\Delta f$.

В качестве критерия обнаружения источника принимается условие, согласно которому максимум функции углового распределения спектральной плотности голограммы (функции обнаружения) при входном отношении с/п q_0 (по мощности)

$$G_I[\chi, q_0] = \int_0^{\Delta\tau} |F_I[\tau, \chi, q_0]| d\tau \quad (4)$$

в направлении $\chi = \varepsilon$ расположения пиков фокальных пятен сигнальной информации в два и более число раз превышает помеховый уровень в направлениях $\chi \neq \varepsilon$

$$G_I[\varepsilon, q_0] \geq 2G_I[\chi, q_0]. \quad (5)$$

Здесь $\Delta\tau$ – линейный размер области концентрации по оси времени τ ; χ – варьируемое значение углового коэффициента при интегрировании вдоль прямых $v = \chi\tau$. При выполнении неравенства (5) оценки радиальной скорости и удаленности источника, определяемые координатами максимумов фокальных пятен, близки реальным значениям. Информация о передаточной функции среды не требуется.

С применением одиночного ВСП определение пеленга ϕ (угла между осью x ВСП и горизонтальной составляющей $\mathbf{r} = (x, y)$ радиус-вектора положения источника) состоит в следующем. Вычисляется отношение максимумов функций обнаружения

$$\operatorname{tg}\phi(q_0) = \frac{G_Y(\varepsilon, q_0)}{G_X(\varepsilon, q_0)}. \quad (6)$$

Определение направления на источник неоднозначно: значения пеленгов ϕ , $\pi + \phi$ равнозначны. Области голограмм $F_X(\tau, v)$, $F_Y(\tau, v)$, $F_I(\tau, v)$ за пределами зоны концентрации спектральной плотности очищаются от помехи и выполняются обратные двумерные преобразования Фурье по восстановлению двумерных интерферограмм $X(f, t)$, $Y(f, t)$, $I(f, t)$.

Неоднозначность пеленга устраняется при рассмотрении в фиксированный момент времени t_* на частоте f_* знака отношений нормированных интерферограмм (отмечены сверху диакритическим знаком «крышка»), очищенных от помехи

$$\frac{\hat{X}(f_*, t_*)}{\hat{I}(f_*, t_*)} = \gamma_x, \quad \frac{\hat{Y}(f_*, t_*)}{\hat{I}(f_*, t_*)} = \gamma_y. \quad (7)$$

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

Во второй главе приведены результаты исследований предельной (максимальной) дальности обнаружения движущегося малогабаритного АНПА в высокочастотном диапазоне с применением одиночного ВСП, опираясь на численные оценки звукового поля и экспериментальные спектральные характеристики шумоизлучения источника и фонового шума (помехи) акватории. На основе критерия Неймана–Пирсона рассмотрена задача обнаружения шумового сигнала на фоне помехи.

В параграфе 2.2 представлены экспериментальные спектральные характеристики звукового давления шумоизлучения малогабаритного АНПА в частотном диапазоне 50–1000 Гц в дальней зоне акустического поля для различных режимов и условий работы.

В параграфе 2.3 для высокочастотного диапазона 900–950 Гц приведены результаты численного моделирования оценки предельной дальности обнаружения малогабаритного АНПА, движущегося со скоростью $w = 2$ м/с, используя данные спектра шумоизлучения аппарата в дальней зоне (удаление $r_0 = 200$ м) и фона помехи акватории (рис. 1). На

расстоянии $r_0 = 200$ м в полосе $\Delta f = 900 - 950$ Гц входное отношение с/п $q_0(r_0) = 8$ дБ. Здесь и далее децибелы отсчитываются относительно произвольного конкретного уровня.

Для модельного волновода глубиной $H = 60$ м, скоростью звука $c = 1480$ м/с, отношением плотности грунта и воды $\rho = 1.8$, комплексным показателем преломления в дне $n = 0.88(1 + i0.022)$ результаты голографической обработки на предельных расстояниях обнаружения малогабаритного АНПА приведены на рис. 2.

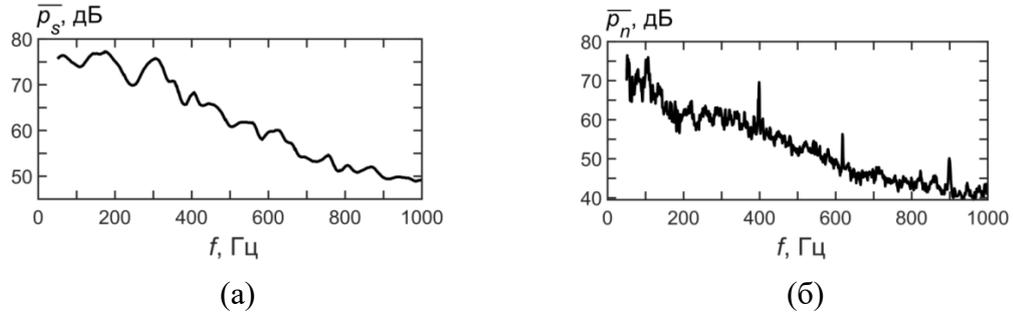


Рис. 1. Спектры звукового давления: (а) шумоизлучения АНПА; (б) фоновой помехи.

Время наблюдения $\Delta t = 30$ с, длительность шумовой реализации $\delta t_1 = 1.5$ с, временной интервал между ними $\delta t_2 = 0.5$ с, число временных интервалов $J = 15$. АНПА, согласно критерию (5), на расстоянии $r_1 = 6$ км обнаруживается, а на расстоянии $r_2 = 7$ км не обнаруживается. На расстоянии $r_1 = 6$ км входное отношение с/п $q_0 = -8.99$ дБ.

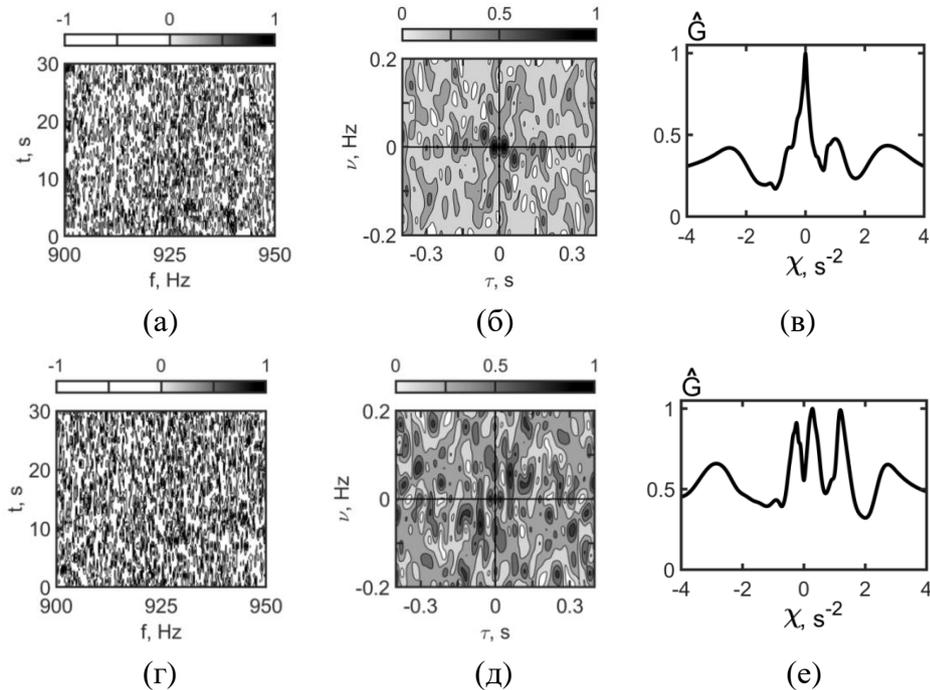


Рис. 2. Нормированные интерферограммы (а, г), голограммы (б, д) и функции обнаружения (в, е) звукового давления. Расстояния: (а–в) – $r_1 = 6$ км, (г–е) – $r_2 = 7$ км.

В параграфе 2.4 предложена оценка отношения с/п на выходе голографической обработки поля шумового источника. На основе критерия Неймана–Пирсона рассмотрено обнаружение сигнала шумового источника. Получены выражения для вероятностей ложной тревоги и правильного обнаружения, приведены расчеты кривых обнаружения.

Полагая, что помеха равномерно распределена в области голограммы, отношение с/п на выходе голографической обработки оценивается как

$$q_{\text{вых}} = J\gamma q_0, \quad (8)$$

где J – число независимых реализаций шумоизлучения источника за время наблюдения Δt ; $\gamma = S_n/S_s$ – коэффициент концентрации, $S_{n,s}$ – площадь области голограммы, занимаемой помехой и сигналом соответственно; q_0 – входное отношение с/п.

В предположении $J \gg 1$ вероятности ложной тревоги p_2 и правильного обнаружения p_1 равны

$$p_2 = 1 - 0.5[\Phi(\kappa_n - 0.5) + \Phi(\kappa_n + 0.5)], \quad (9)$$

$$p_1 = 1 - 0.5[\Phi(\eta_1) + \Phi(\eta_2)], \quad (10)$$

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (11)$$

– интеграл ошибок. Здесь $\kappa_n = g/2M_n$, g – пороговый уровень, M_n – математическое ожидание помехи на выходе траекторного накопления за время наблюдения Δt ;

$$\eta_1 = \frac{2\kappa_n - 1 - q_{\text{вых}}}{2(1 + q_{\text{вых}})}, \quad \eta_2 = \frac{2\kappa_n + 1 + q_{\text{вых}}}{2(1 + q_{\text{вых}})}. \quad (12)$$

На рис. 3 приведены кривые обнаружения шумового сигнала в зависимости от входного отношения с/п q_0 для коэффициента концентрации $\gamma = 7$.

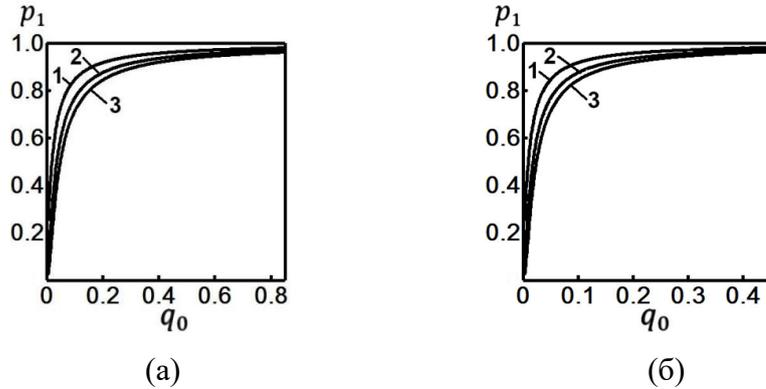


Рис. 3. Зависимость вероятности правильного обнаружения p_1 от входного отношения с/п q_0 для разных значений вероятности ложной тревоги p_2 : (а) $J = 10$; (б) $J = 20$. Кривая 1 – $p_2 = 10^{-1}$, кривая 2 – $p_2 = 10^{-2}$, кривая 3 – $p_2 = 10^{-3}$.

С уменьшением вероятности ложной тревоги, при заданном входном отношении с/п, вероятность правильного обнаружения уменьшается. С увеличением числа временных интервалов эффективность обнаружения сигнала возрастает. Взаимосвязь критерия оценки дальности обнаружения (5) с вероятностью правильного обнаружения (10) заключается в следующем. На основе критерия дальности обнаружения определяется входное отношение с/п q_0 . Для входного отношения с/п q_0 и заданной вероятности ложной тревоги p_2 вычисляется вероятность правильного обнаружения p_1 .

В третьей главе представлены результаты высокочастотного эксперимента по локализации буксируемого имитатора шумового источника в мелководной акватории Ладожского озера. Прием осуществлялся одиночным ВСП. Применялась частотно-временная обработка, согласованная с интерференционной картиной, формируемой источником. Восстановлены временные зависимости пеленга, скорости, удаленности и глубины.

В параграфе 3.2. приведено описание эксперимента. Эксперимент проводился в мелководной акватории глубиной $H \approx 87$ м и скоростью звука $c \approx 1400$ м/с. Обработывался сигнал с одиночного ВСП антенны, расположенного на глубине $z_q = 30$ м. Интерферограмма источника регистрировалась в полосе $\Delta f = 1 - 15$ кГц. Длительность принимаемой шумовой реализации $\delta t_1 = 0.2$ с. Входное отношение с/п $q_0 \approx 9$ дБ. Схема движения буксируемого источника относительно расположения ВСП в окрестности траверса показана на рис. 4. Из начальной точки A источник приближался к ВСП, проходил точку B траверса и далее от нее удалялся по направлению к точке C . После прохождения точки C источник совершал петлеобразные траектории (на рис. они не показаны). Продолжительность эксперимента $T = 275$ с.

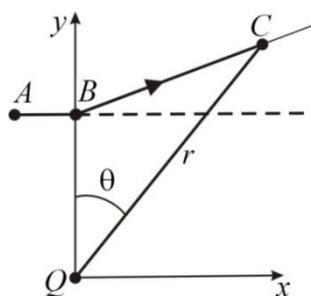
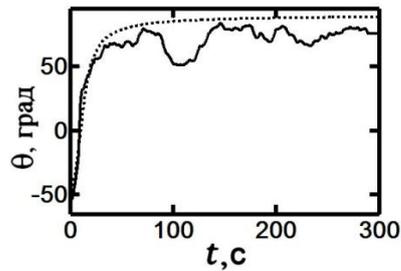


Рис. 4. Геометрия задачи. Угол $\theta = 90^\circ - \phi$, где ϕ – пеленг.

В параграфе 3.3 изложена частотно-временная обработка широкополосных сигналов, согласованная с интерференционной картиной шумового источника, и представлены результаты эксперимента по восстановлению временной зависимости параметров источника.

Направление на источник реализовывалось применением голографического метода пеленгования с применением одиночного ВСП (6) в фиксированные моменты времени t_i . На рис. 5 экспериментальная временная зависимость $\theta(t)$ изображена сплошной линией, пунктиром – модельная зависимость в предположении движения источника вдоль прямой, параллельной оси x (рис. 4, пунктир). Мелкомасштабные осцилляции обусловлены колебаниями приемной системы в вертикальной плоскости, крупномасштабные осцилляции – петлеобразными траекториями источника (см. рис. 7).

Рис. 5. Временная зависимость $\theta(t)$.

Восстановление остальных параметров источника осуществлялась с использованием согласованной обработки по отношению к интерферограмме, формируемой движущимся источником. Горизонтальное расстояние до приемника r , глубина z и скорость w оценивались как координаты основного максимума трехмерной взаимнокорреляционной функции экспериментальной I_e и модельной I_m интерферограмм

$$E(r_*, z_*, w_*) = \sum_k \sum_i I_e(f_k, t_i) I_m^*(f_k, t_i), \quad (13)$$

т.е. $\max E(r_*, z_*, w_*) = E(r, z, w)$. Варьируемые величины обозначены нижним индексом звездочка (*). Априори считалось, что источник расположен на глубине $1 \text{ м} \leq z \leq 70 \text{ м}$, удален от ВСП на расстояние $50 \text{ м} \leq r \leq 3 \text{ км}$, скорость $2 \text{ м/с} \leq w \leq 35 \text{ м/с}$. Перебор параметров осуществлялся с шагом: расстояние – $\delta r = 25 \text{ м}$, глубина – $\delta z = 0.5 \text{ м}$, скорость – $\delta w = 1 \text{ м/с}$. Шаг дискретизации по частоте $\delta f = 0.5 \text{ Гц}$, по времени $\delta t = 2 \text{ с}$. Обработка проводилась во временном интервале $\Delta t = 20 \text{ с}$ и полосе $\Delta f = 1 - 15 \text{ кГц}$.

На рис. 6 приведены экспериментальная $I_e(f, t)$ и модельная $I_m(f, t)$ интерферограммы $I_{e,m}(f, t) = |P_{e,m}(f, t)|^2$ звукового давления P поля источника. Модельная интерферограмма строилась на основе интерференции полей двух лучей. Считалось, что в течение $\Delta t = 20 \text{ с}$ источник двигался по прямолинейной траектории.

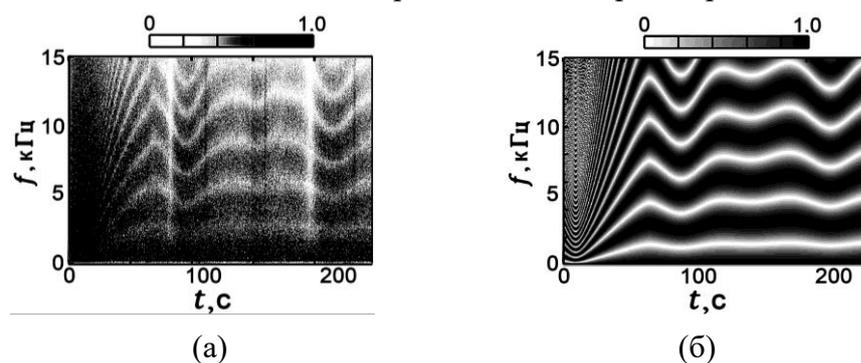


Рис. 6. Нормированные интерферограммы: (а) экспериментальная, (б) модельная.

Для временного восстановления параметров источника использовалось каскадное вычисление взаимнокорреляционной функции (13). В начальный момент времени $t_0 = 0$ осуществлялась обработка во временном интервале $\Delta t = 20 \text{ с}$. В момент времени $t_1 = t_0 + \delta t'$ проводилась следующая обработка в течение времени Δt , $\delta t' = 5 \text{ с}$, и т.д.

На рис. 7,8 показаны временные зависимости параметров источника. Во время эксперимента глубина источника изменялась в пределах $\approx 1.5 \text{ м}$ и в среднем оценивается

как $z = 11.4$ м. Осцилляции глубины приходятся на петлеобразные траектории. Согласно рис. 7 точка траверса была удалена от ВСП на расстояние $r = 188$ м. После прохождения точки траверса источник перемещался по прямой, не параллельной оси x . В интервале $0 < t < 58$ с источник двигался по прямолинейной траектории практически с постоянной скоростью $w = 27.4$ м/с. В течение времени $58 < t < 275$ с, когда источник двигался по петлеобразным траекториям, скорость имеет изрезанный характер. С уменьшением размера петли скорость снижалась.

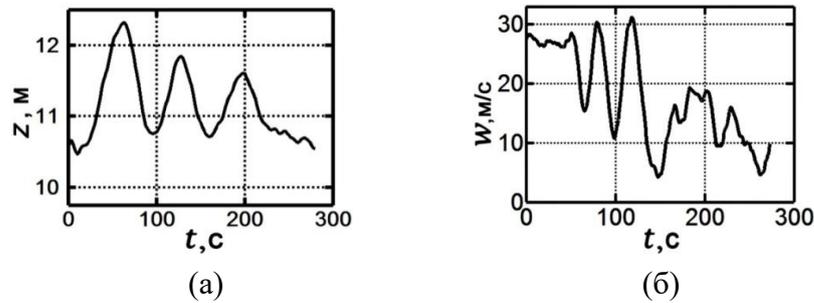


Рис. 7. Временные зависимости: (а) глубина $z(t)$, (б) скорость $w(t)$.

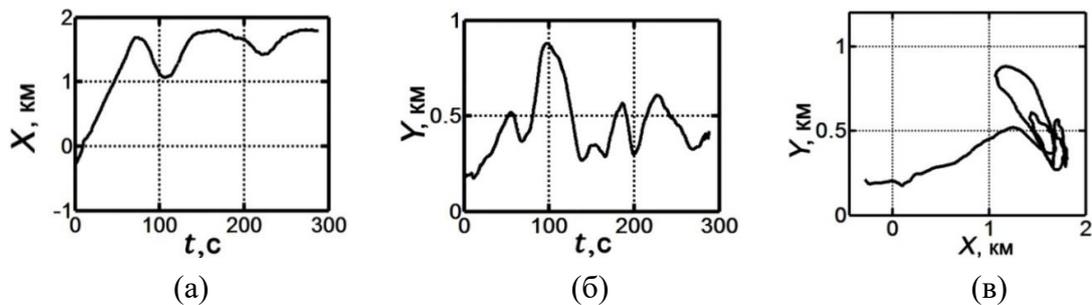


Рис. 8. Временные траекторные зависимости: (а) $X(t)$, (б) $Y(t)$, (в) $Y(X)$.

В параграфе 3.4 дано качественное и количественное объяснение экспериментальным данным на основе двухлучевой интерферограммы, образованной прямым лучом и лучом, отраженным от свободной поверхности.

В четвертой главе представлены результаты голографической обработки высокочастотного эксперимента по обнаружению и локализации движущегося малогабаритного АНПА в мелководной акватории Черноморского побережья на фоне интенсивного судоходства. Прием шумоизлучения подводного аппарата осуществлялся тремя одиночными ВСП, расположенными на дне. Для различных моментов времени зарегистрированы интерферограммы, голограммы и функции обнаружения. Измерены временные зависимости функции обнаружения и пеленга подводного аппарата.

В параграфе 4.2 приведено описание эксперимента. Глубина акватории $H = 8 - 10$ м, удаление от района интенсивного судоходства $r = 1 - 2$ км. Три ВСП (ВСП1–ВСП3) располагались на дне. В качестве подводного источника использовался малогабаритный АНПА, спектральные характеристики шумоизлучения которого приведены во второй главе. Скорость подводного аппарата $w = 1.5$ м/с, глубина погружения $z = 4$ м. Были выполнены два пуска АНПА (рис. 9).

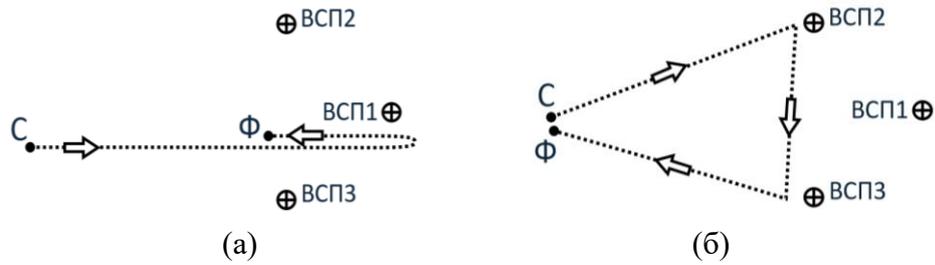


Рис. 9. Схема движения АНПА (пунктир) относительно расположения ВСП: (а) первый пуск; (б) второй пуск. С – точка старта, Ф – точка финиша.

Расстояния между характерными точками: С–ВСП1 ≈ 990 м, С–ВСП2 ≈ 740 м, С–ВСП3 ≈ 810 м, ВСП1–ВСП2 ≈ 450 м; ВСП1–ВСП3 ≈ 440 м; ВСП2–ВСП3 ≈ 410 м; ВСП1–линия ВСП2–ВСП3 ≈ 390 м. Здесь С – точка старта. Первый пуск: прямой галс – начало 14:13, окончание 14:23:30; обратный галс – начало 14:24, окончание 14:31. Второй пуск: начало 15:18:35, окончание 15:39:40. Шумовой сигнал обрабатывался в частотном диапазоне $f = 0.8\text{--}1.7$ кГц. В полосе частот $\Delta f = 0.9$ кГц для каждой шумовой реализации сигнала выполнялась частотно-временная обработка с шагом по частоте $\delta f = 1$ Гц. Параметры обработки: время наблюдения $\Delta t = 60$ с, длительность шумовой реализации $\delta t_1 = 1.5$ с, интервал между ними $\delta t_2 = 0.5$ с. Обработки повторялась для последующих временных интервалов той же длительности, но сдвинутых относительно предыдущего на интервал $\delta t = 60$ с.

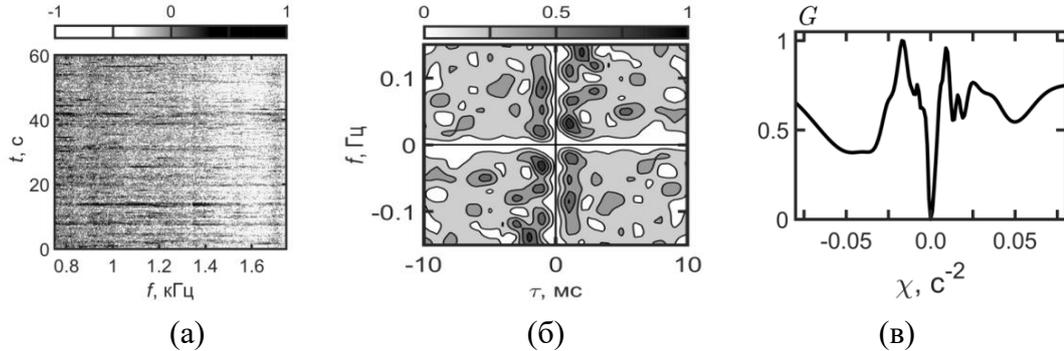


Рис. 10. Нормированные интерферограмма (а), модуль голограммы (б), функция обнаружения (в). Время 14:15. Две минуты после начала эксперимента.

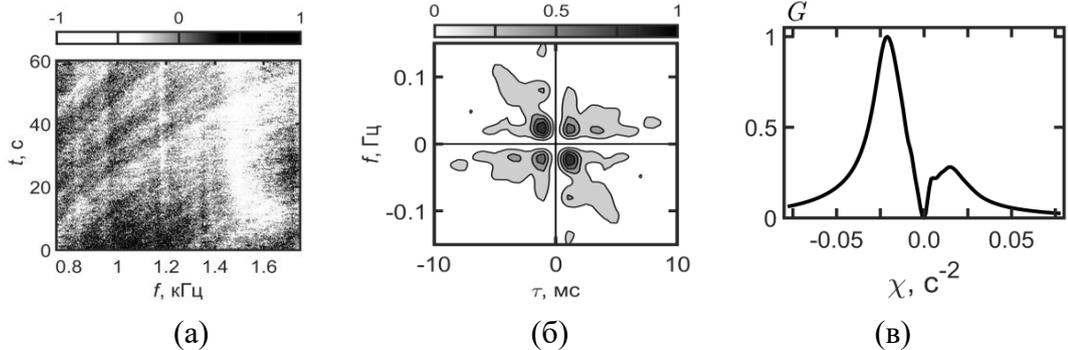


Рис. 11. Нормированные интерферограмма (а), модуль голограммы (б), функция обнаружения (в). Время 14:21. Область траверса, удаление АНПА от ВСП1. Прямой галс.

В параграфе 4.3 представлены результаты эксперимента по обнаружению и пеленгованию АНПА. Обработка выполнена по всем четырем каналам трех ВСП для двух пусков. Для двух моментов времени первого пуска результаты обработки по каналу звукового давления для ВСП1 приведены на рис. 10, 11.

Интерферограммы не позволяют идентифицировать отдельные источники шумоизлучения, однако на голограммах и функциях обнаружения регистрируются фокальные пятна и пики, отвечающие АНПА и надводным судам в районе интенсивного судоходства.

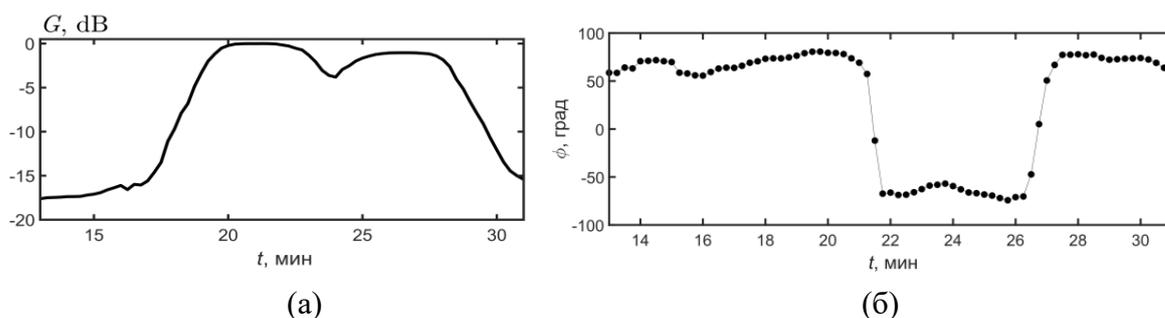


Рис. 12. Временная зависимость: (а) нормированной функции обнаружения; (б) пеленга.

На рис. 12а и рис. 12б приведены временная нормированная функция обнаружения $G(t)$ и временная зависимость пеленга $\phi(t)$ АНПА по отношению ВСП1 во время первого пуска. Нормировка выполнена на максимальное значение функции обнаружения во время эксперимента. Максимальные уровни спектральной плотности приходятся на области траверса. В области траверса отношение с/п на входе ВСП1 оцениваются как $q_0 = 9.2$ дБ (прямой галс), $q_0 = 8.2$ дБ (обратный галс). Полученные оценки указывают на нестационарность и анизотропность помехи в акватории движения подводного аппарата, вызванной интенсивным судоходством в районе проведения эксперимента. Крупномасштабные скачки пеленга связаны с прохождением областей траверса при прямом и обратном галсах. Мелкомасштабные осцилляции пеленга обусловлены двумя факторами: а) наличием помехи; б) не прямолинейным движением подводного аппарата в горизонтальной плоскости (x, y) .

В пятой главе изложена голографическая обработка широкополосного сигнала с применением линейных горизонтальных и вертикальных антенн. По критерию Неймана–Пирсона рассмотрена задача обнаружения шумового сигнала на фоне помехи.

В параграфах 5.2, 5.3 представлена теория голографической обработки широкополосного сигнала с применением линейных горизонтальных и вертикальных антенн. Установлена связь спектральной плотности голограммы, формируемой движущимся шумовым источником, с апертурой и угловой зависимостью принимаемого поля. Оценены коэффициент усиления и характеристика направленности антенны. Приведены и обсуждены результаты численного моделирования формирования голограмм антенн, коэффициентов усиления и характеристик направленности в зависимости от числа их элементов.

В параграфе 5.4 рассмотрена помехоустойчивость обработки. Показано, что по сравнению с одиночным приемником помехоустойчивость возрастает примерно в B раз, где B – число элементов антенны.

В параграфе 5.5 на основе критерия Неймана–Пирсона рассмотрено обнаружение сигнала шумового источника. Получены выражения для вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги в зависимости от отношения с/п и числа элементов антенны. Выполнены численные расчеты. Приведены кривые обнаружения шумового сигнала. Оценена эффективность обнаружения сигнала с использованием антенны по отношению к одиночному приемнику.

В случае линейных антенн выражения для вероятностей ложной тревоги p_2 (9) и правильного обнаружения p_1 (10) сохраняются, изменяются лишь параметры, которые их характеризуют. При фиксированной вероятности ложной тревоги, $p_2^{(an)} = p_2^{(r)} = p_2$, безразмерный параметр κ_n сохраняется, $\kappa_n^{(r)} = \kappa_n^{(an)} = \kappa_n$. Индексы «an» и «r» относятся к антенне и одиночному приемнику.

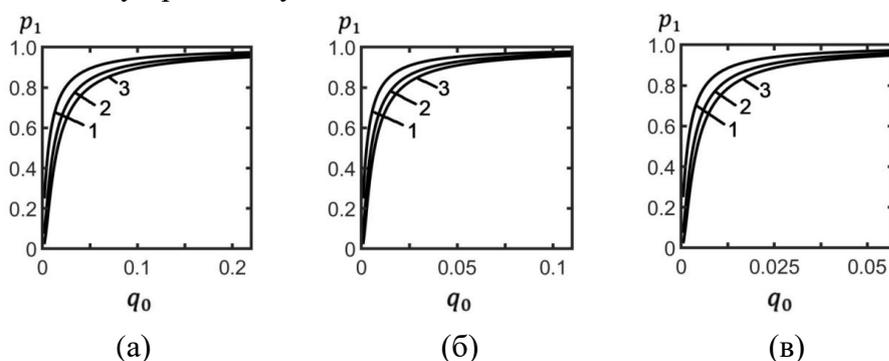


Рис. 13. Зависимость вероятности правильного обнаружения p_1 от входного отношения с/п q_0 для различных значений вероятностей ложной тревоги p_2 и числа элементов антенны B . Кривая 1 – $p_2 = 10^{-1}$, кривая 2 – $p_2 = 10^{-2}$, кривая 3 – $p_2 = 10^{-3}$. $B = 3$ (а), $B = 7$ (б), $B = 11$ (в). Число реализаций $J = 12$, коэффициент концентрации $\gamma = 6$.

По сравнению с одиночным приемником математическое ожидание помехи на выходе обработки возрастает в B раз, $M_n^{(an)} = BM_n^{(r)}$. Это приводит к увеличению порогового уровня также в B раз по отношению к одиночному приемнику, $g_{an} = Bg_r$. Выходное отношение с/п $q_{\text{ВЫХ}}^{(an)} = (\chi/B)q_{\text{ВЫХ}}^{(r)}$. Здесь χ – коэффициент усиления, $\chi \approx B^2$.

Кривые обнаружения шумового сигнала приведены на рис. 13. Они демонстрируют тенденцию возрастания вероятности правильного обнаружения p_1 с увеличением числа элементов антенны B при заданной вероятности ложной тревоги p_2 .

Степень различия в вероятностях правильного обнаружения между одиночным приемником и антенной в зависимости от входного отношения с/п q_0 и числа элементов B антенны при заданной вероятности ложной тревоги характеризуется коэффициентом эффективности

$$\beta(q_0, B) = p_1^{(an)}(q_0, B) / p_1^{(r)}(q_0). \quad (14)$$

На рис. 14 показаны зависимости коэффициента эффективности $\beta(q_0)$ при различных значениях вероятностей ложной тревоги p_2 и числа элементов антенны B . Различие в вероятностях правильного обнаружения между одиночным приемником и антенной сосредоточено преимущественно в области малых входных отношений с/п q_0 . С повышением числа элементов B различие увеличивается. С возрастанием значений входного отношения с/п q_0 различие уменьшается и асимптотически стремится к нулю.

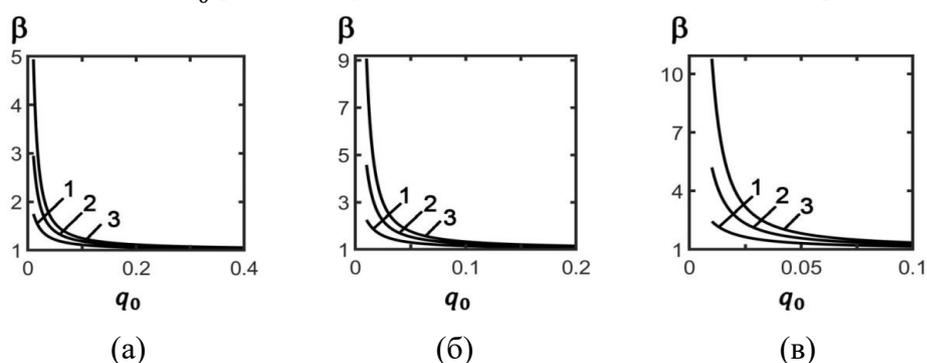


Рис. 14. Зависимость коэффициента эффективности β от входного отношения с/п q_0 для различных значений вероятностей ложной тревоги p_2 и числа элементов антенны B . Кривая 1 – $p_2 = 10^{-1}$, кривая 2 – $p_2 = 10^{-2}$, кривая 3 – $p_2 = 10^{-3}$. $B = 3$ (а), $B = 7$ (б), $B = 11$ (в). Число реализаций $J = 12$, коэффициент концентрации $\gamma = 6$.

В Заключение сформулированы основные результаты работы.

1. Предложена экспериментальная зависимость, устанавливающая связь между спектрами шумоизлучения АНПА в ближней и дальней зонах. Установленная связь позволяет получать реалистические оценки дальности обнаружения АНПА в широком диапазоне частот при разных режимах работы и скоростях движения подводного аппарата.

2. В рамках численного эксперимента, опираясь на экспериментальные спектральные характеристики шумового источника и шумового фона акватории, оценена предельная дальность обнаружения АНПА на скорости движения 2 м/с в высокочастотном диапазоне 900–950 Гц с применением одиночного ВСП. На предельной дальности обнаружения восстановлены расстояние аппарата до приемника.

3. Предложена и апробирована на основе данных натурального эксперимента в мелководной акватории Ладожского озера частотно-временная обработка, согласованная с интерференционной картиной, формируемой шумовым источником, восстановления временных зависимостей пеленга, скорости, удаленности и глубины шумового подводного источника в высокочастотном диапазоне, 2–5 кГц, с применением одиночного ВСП.

4. Экспериментально апробирован голографический метод обнаружения и пеленгования малогабаритного АНПА в высокочастотном диапазоне, 0.8–1.7 кГц, в мелководной акватории Черноморского побережья на фоне надводных судов на расстоянии порядка одного километра.

5. Развита теория голографической обработки гидроакустической информации с использованием линейных антенн. Установлена связь между спектральной плотностью голограммы, формируемой движущимся источником, с апертурой и угловой зависимостью принимаемого поля. Оценены коэффициент усиления, характеристика направленности антенны и помехоустойчивость обработки. Приведены и обсуждены результаты численного моделирования.

6. Получено выражение для отношения с/п на выходе голографической обработки с применением одиночного приемника и линейных антенн. На основе критерия Неймана–Пирсона построена теория обнаружения шумового сигнала. Получены выражения для вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги в зависимости от отношения с/п и числа элементов антенны. Выполнены численные расчеты. Оценена эффективность обнаружения сигнала с использованием антенны по отношению к одиночному приемнику.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах.

Статьи в журналах из перечня изданий ЮФУ801.02.04, в международной наукометрической базе SCOPUS.

1. Source detection in dispersive environment / V. M. Kuz'kin, S. A. Pereselkov, Yu. V. Matvienko, S. A. Tkachenko // Radioelektronika, Nanosistemy, Informacionnye Tehnologii. – 2019. – Vol. 11, No. 3. – P. 337-344. – DOI 10.17725/rensit.2019.11.337
2. Noise-Source Detection in an Oceanic Waveguide Using Interferometric Processing / V. M. Kuz'kin, G. A. Lyakhov, S. A. Pereselkov [et al.] // Physics of Wave Phenomena. – 2020. – Vol. 28, No. 1. – P. 68-74. – DOI 10.3103/S1541308X20010057
3. Interference Method for Estimating the Coordinates of a Moving Noise Source in Shallow Water Using High-Frequency Signals / S. A. Pereselkov, V. M. Kuzkin, G. N. Kuznetsov [et al.] // Acoustical Physics. – 2020. – Vol. 66, No. 4. – P. 416-424. – DOI 10.1134/S1063771020040089
4. Interferometric processing of acoustic information by using extended antennas in dispersing media / Kuz'kin V. M., Pereselkov S.A., Tkachenko S. A., Kaznacheev I. V. // Radioelektronika, Nanosistemy, Informacionnye Tehnologii. – 2020. – Vol. 12, No 4. – P. 483-494. - DOI: 10.17725/rensit.2020.12.483.
5. Detection of a Noise Signal in an Oceanic Waveguide Using a Vertical Array / V. M. Kuz'kin, S. A. Pereselkov, Yu. V. Matvienko, S. A. Tkachenko // Physics of Wave Phenomena. – 2021. – Vol. 30, No. 4. – P. 323-329. – DOI 10.3103/S1541308X21040051
6. Noise signal detection by horizontal antenna in ocean waveguide / V. M. Kuz'kin, S. A. Pereselkov, Y. V. Matvienko, S. A. Tkachenko, D. Yu. Prosovetskii // Radioelektronika, Nanosistemy, Informacionnye Tehnologii. – 2022. – Vol. 14, No 1. – P. 65-72. – DOI: 10.17725/rensit.2022.14.065
7. Holographic signal processing for estimation of sound source direction by a vector receiver in shallow water / S. A. Pereselkov, V. Kuz'kin, I. Kaznacheev, S. Tkachenko, P. Rybyanets //

Journal of the Acoustical Society of America. – 2022. – Vol. 152, No 4. – P. A194.- DOI 10.1121/10.0015999

8. Hologram formation by using vertical antenna in a shallow water waveguide / Sergey A. Pereselkov, Venedikt Kuz'kin, Ilya Kaznacheev, Sergey Tkachenko, Pavel Rybyanets // Journal of the Acoustical Society of America. – 2022; . – Vol. 152, No 4. – P. A297. – DOI 10.1121/10.0016337

Публикации в журналах, включенных в перечень ВАК РФ, ЮФУ 801.02.04.

9. Спектральные характеристики шумового поля малогабаритного автономного необитаемого подводного аппарата в дальней зоне / Ю. А. Хворостов, Ю. В. Матвиенко, В. М. Кузькин [и др.] // Подводные исследования и робототехника. – 2022. – № 4(42). – С. 84-88. – DOI 10.37102/1992-4429_2022_42_04_08

Публикации в изданиях, входящих в базу данных научного цитирования РИНЦ.

10. Обнаружение шумового источника / С. А. Переселков, В. М. Кузькин, Е. С. Казначеева, С. А. Ткаченко // Акустика океана : доклады XVII Школы-семинара им. акад. Л. М. Бреховских, совмещенной с XXXIII сессией Российского акустического общества. – Москва : ИО РАН, 2020. – С. 271-275. – DOI 10.29006/978-5-9901449-5-8-43
11. Идентификация высокочастотного шумового источника / Г. Н. Кузнецов, В. М. Кузькин, С. А. Переселков, С. А. Ткаченко, Д. Ю. Просовецкий // Радиолокация, навигация, связь : сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции, (г. Воронеж, 29 сентября – 1 октября 2020 г.) : в 6 т. Т. 4. – Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2020. – С. 163-174
12. Использование горизонтальной линейной антенны для формирования голограммы в океаническом волноводе / С. А. Переселков, И. В. Казначеев, В. М. Кузькин [и др.] // Радиолокация, навигация, связь : сборник трудов XXVIII Международной научно-технической конференции, посвященной памяти Б. Я. Осипова (г. Воронеж, 27-29 сентября 2022 г.). : в 6 т. Т. 3. – Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2022. – С. 372-381
13. Формирование голограммы источника звука с использованием горизонтальной линейной антенны / С. А. Переселков, В. М. Кузькин, И. В. Казначеев [и др.] // Сборник Трудов XXXV сессии Российского акустического общества, 13-17 февраля 2023 г., Москва. – Москва : ГЕОС, 2023. – С. 310-315.
14. Оценка дальности обнаружения малозумного источника / Ю. В. Матвиенко, Ю. А. Хворостов, В. М. Кузькин [и др.] // Сборник Трудов XXXV сессии Российского акустического общества, 13-17 февраля 2023 г., Москва. – Москва : ГЕОС, 2023. – С. 322-327

Результаты интеллектуальной деятельности

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020619052 Российская Федерация. Интерферометрическая частотно-временная обработка низкочастотных гидроакустических сигналов векторно-скалярного приемника : №

- 2020615374 : заявл. 28.05.2020 : опубл. 10.08.2020 / С. А. Переселков, И. В. Казначеев, С. А. Ткаченко, Е. С. Казначеева ; правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ВГУ»)
16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020660790 Российская Федерация. Интерферометрическая частотно-временная обработка высокочастотных гидроакустических сигналов векторно-скалярного приемника : № 2020619964 : заявл. 03.09.2020 : опубл. 11.09.2020 / С. А. Переселков, Д. Ю. Просовецкий, И. В. Казначеев, С. А. Ткаченко, Е. С. Казначеева ; правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ВГУ»)
17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021681297 Российская Федерация. Расчет акустической голограммы шумового поля источника звука, движущегося в мелководном гидроакустическом волноводе на основе модового описания : № 2021680532 : заявл. 10.12.2021 : опубл. 20.12.2021 / С. А. Переселков, И. В. Казначеев, С. А. Ткаченко, Е. С. Казначеева, Д. Ю. Просовецкий ; правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет»
18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021681355 Российская Федерация. Обнаружение АНПА в мелководном волноводе на основе голографической обработки шумовых сигналов каналов одиночного векторно-скалярного приемника : № 2021680514 : заявл. 10.12.2021 : опубл. 21.12.2021 / С. А. Переселков, И. В. Казначеев, С. А. Ткаченко, Е. С. Казначеева ; правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет»
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021681587 Российская Федерация. Расчет частотно-временной интерферограммы движущегося источника в океаническом мелководном волноводе на основе модового описания звукового поля : № 2021680484 : заявл. 10.12.2021 : опубл. 23.12.2021 / С. А. Переселков, И. В. Казначеев, С. А. Ткаченко, Е. С. Казначеева ; правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет»
20. Патент № 2787951 С1 Российская Федерация, МПК G01S 3/80. Способ обнаружения подводного источника широкополосного шума : № 2022102801 : заявл. 07.02.2022 : опубл. 13.01.2023 / С. А. Переселков, В. М. Кузькин, Ю. В. Матвиенко, И. В. Казначеев, С. А. Ткаченко, Е. С. Казначеева ; правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет»