

ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Ткаченко Сергей Александрович

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

Специальность 1.3.7. Акустика

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук, профессор
Пересёлков Сергей Алексеевич

Воронеж – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. Методы обработки сигналов в гидроакустическом волноводе (обзор)	13
§ 1.1. Краткое введение.....	13
§ 1.2. Согласованная со средой обработка.....	13
§ 1.3. Голографическая обработка	17
§ 1.4. Физические основы голографической обработки	20
§ 1.5. Выводы	26
Глава 2. Обнаружение и локализация АНПА с применением одиночных приемников ...	28
§ 2.1. Краткое введение.....	28
§ 2.2. Спектральная плотность шумоизлучения.....	28
§ 2.3. Дальность обнаружения.....	34
§ 2.4. Обнаружение по критерию Неймана–Пирсона	41
§ 2.5. Выводы.....	48
Глава 3. Эксперимент в мелководной акватории с имитатором шумового источника.....	50
§ 3.1. Краткое введение.....	50
§ 3.2. Описание эксперимента.....	50
§ 3.3. Экспериментальные результаты	51
§ 3.4. Интерпретация результатов эксперимента	57
§ 3.5. Выводы	60
Глава 4. Эксперимент в мелководной акватории с АНПА.....	61
§ 4.1. Краткое введение.....	61
§ 4.2. Описание эксперимента.....	61
§ 4.3. Обнаружение и пеленгование АНПА.....	62
§ 4.4. Выводы	76
Глава 5. Голографическая обработка с применением линейных антенн.....	78
§ 5.1. Краткое введение.....	78
§ 5.2. Горизонтальная антенна	78
§ 5.3. Вертикальная антенна	86
§ 5.4. Помехоустойчивость обработки	90
§ 5.5. Обнаружение по критерию Неймана–Пирсона.....	91
§ 5.6. Выводы.....	95
Заключение.....	96
Литература	97

ВВЕДЕНИЕ

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

одинокных 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 малошумных 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 малошумных подводных источников с использованием одноканальных ВСП, а также изучение и разработка голографических методов локализации энергии 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 натурных экспериментах голографического метода обнаружения и локализации подводных источников в высокочастотном диапазоне с применением одноканальных 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 одноканального приемника и линейных антенн.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования диссертационной работы является голографический метод

обнаружения и локализации малошумных 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, применяемые в научном исследовании

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.

Новизна научного исследования

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 исследования

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 экспериментальных данных.

Апробация результатов исследования

Результаты исследования представлены на конференциях:

1. XXXIII сессия РАО, совмещенная с XVII школой-семинаром акад. Бреховских Л.М. ИО РАН, Москва, 2020 г., 19-23 октября.

2. XXVI Международная научно-техническая конференция «Радиолокация. Навигация. Связь». Воронеж, ВГУ, 2020 г., 29 сентября–01 октября.

3. XXVIII Международная научно-техническая конференция «Радиолокация. Навигация. Связь», посвященная памяти Б.А. Осипова. Воронеж, 2022 г., 27–29 сентября.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

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:

7. 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

8. 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

9. 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

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.

Свидетельства регистрации РИД:

1. 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»)

2. 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»)

3. 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»

4. 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»

5. 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»

6. 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».

Результаты диссертационной работы получены при частичной финансовой поддержке: гранта Президента РФ (МК-4846.2022.4), РФФИ (19-29-06075-мк, 19-08-00941), РНФ (23-61-10024). Научно-исследовательская работа над диссертацией проводилась согласно плану научно-исследовательских работ кафедры математической физики и информационных технологий Воронежского государственного университета.

Личный вклад автора диссертационной работы

Автор диссертационной работы принимал непосредственное участие при 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 диссертационной 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 диссертационной 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 содержит обзор методов обработки сигналов в гидроакустическом волноводе.

В параграфе 1.2 рассмотрено современное состояние вопроса по обнаружению и 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, которые представляют непосредственный интерес при интерпретации результатов численных и натурных экспериментов, представленных в диссертации.

Во второй главе на основе экспериментальных спектров звукового давления малогабаритного АНПА для высокочастотного диапазона получена оценка предельной дальности обнаружения с применением одиночного ВСП; на базе критерия Неймана–Пирсона построена теория обнаружения источника шума в гидроакустическом волноводе.

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 приведены результаты численного моделирования оценки предельной дальности обнаружения АНПА, опираясь на экспериментальные данные спектра шумоизлучения и шумового фона акватории.

В параграфе 2.4 оценено отношение 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.

В третьей главе представлены результаты высокочастотного эксперимента по локализации движущегося имитатора шумового источника в мелководной акватории Ладожского озера. Прием осуществлялся одиночным ВСП. Использовалась частотно-временная обработка, согласованная с интерференционной картиной, формируемой источником. Характерными моментами эксперимента являлись большая скорость и не прямолинейное движение источника при удалении от приемника.

В параграфе 3.2. приведено описание эксперимента.

В параграфе 3.3. изложены результаты восстановления временных зависимостей пеленга, скорости, удаленности и глубины шумового источника.

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

В четвертой главе изложены результаты высокочастотного эксперимента по обнаружению и локализации малогабаритного АНПА в мелководной акватории Черноморского побережья на фоне интенсивного судоходства. Прием шумоизлучения подводного аппарата осуществлялся тремя одиночными ВСП, расположенными на дне. Использовалась голографическая обработка шумоизлучения АНПА.

В параграфе 4.2 приведено описание эксперимента.

В параграфе 4.3 представлены временные зависимости функции обнаружения и восстановленного пеленга.

В пятой главе приведены результаты исследования голографического метода обнаружения подводного источника с применением линейных антенн.

В параграфе 5.2 изложена теория голографической обработки шумового сигнала подводного источника с применением горизонтальной антенны.

В параграфе 5.3 изложена теория голографической обработки шумового сигнала подводного источника с применением вертикальной антенны.

В параграфе 5.4 рассмотрена помехоустойчивость голографической обработки с применением линейных антенн.

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

В Заключение диссертационной работы представлены основные результаты.

ГЛАВА 1

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДАХ

§ 1.1. Краткое введение

Методы обработки гидроакустических сигналов ориентированы преимущественно на решение проблемы обнаружения и локализации малозумных подводных источников звука. На сегодняшний день можно выделить два основных направлений решения этой проблемы. Одно из них, которое имеет длительную историю, основано на согласованной со средой распространения пространственной обработке гидроакустических сигналов. В англоязычной литературе – *matched field processing* (MFP). Другое направление, предложенное за последние несколько лет, основано на голографической обработке интерференционной картины, формируемой 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. Обзор по первому подходу написан по материалам работы [1], обзор по второму подходу – по материалам работы [2].

§ 1.2. Согласованная со средой обработка

Обработка гидроакустических сигналов, согласованная со средой, обычно рассматривается как способ оценки глубины и горизонтального расстояния до неподвижного источника без определения направления (пеленга). Реализация обработки подразумевает использование многоэлементных приемных антенн, наличие априорной информации о координатах источника, статистических свойствах помехи и характеристиках модельного волновода, позволяющих рассчитать модельную пространственную зависимость принимаемого сигнала [3].

Согласованная со средой обработка базируется на пространственной фильтрации, которая позволяет по принятому сигналу оптимальным (по заданному критерию) образом обнаруживать и локализовывать источник. Одним из существенных факторов, ограничивающим возможности обработки, является неточность модели звукового канала. Наиболее остро проблема стоит в мелководных акваториях, где для построения модели сигнала требуется информация о профиле скорости звука, рельефе дна и параметрах грунта. Поэтому большинство работ по согласованной обработке касаются возможных сценариев рассогласования, а сама проблема рассогласования становится одной из центральных. Несовпадение принятого и ожидаемого сигнала приводит как к ухудшению разрешающей

способности антенны, так и понижению выходного отношения с/п. В этой связи наибольший интерес представляет развитие устойчивых алгоритмов, способных обеспечить пространственную обработку.

Наиболее распространенными алгоритмами построения пространственных фильтров являются методы Бартлетта [4], Кейпона [5], MUSIC [6]. Пространственный фильтр Бартлетта характеризуется простотой реализации и устойчивостью к несоответствию между расчетной моделью среды распространения и реальным каналом. Поэтому, несмотря на известные недостатки, связанные с низкой разрешающей способностью и высоким уровнем боковых лепестков функции неопределенности, эта процедура оценивания находит свое практическое применение в гидроакустике. Для улучшения пространственного разрешения и адаптации к шумовой помехе разработаны процессоры Кейпона и MUSIC, сигнальные весовые вектора которых минимизируют среднюю мощность на выходе антенны при условии, что соответствующий вектор ориентирован в направлении ожидаемого сигнала.

Сама концепция, основанная на выделении “сигнального” подпространства собственных векторов, предполагает присутствие на входе антенны достаточно мощного (в сравнении с помехой) полезного сигнала. В противном случае полезный сигнал оказывается в “помеховом” подпространстве и обработка осуществляет его подавление. Более того, именно векторы этого подпространства оказываются наиболее чувствительными к какому-либо рассогласованию, что приводит к резкому понижению эффективности методов в условиях приема слабого сигнала. Подобные принципиальные трудности сдерживают практическую реализацию данных методов в натурных условиях при малых входных отношениях с/п.

Одним из ключевых факторов, влияющих на качество пространственной обработки гидроакустических сигналов, является несоответствие или различие между вычислительной моделью среды распространения сигнала и реальным гидроакустическим волноводом. Принято различать детерминированное и статистическое рассогласование. Первое является следствием неточного знания регулярных характеристик канала (профиля скорости звука [7], глубины волновода [8], параметров грунта [9]) или обусловлено техническими причинами, связанными с ошибками измерения положений элементов антенны или их не идентичностью [10]. Второе обусловлено флуктуационными искажениями полезного сигнала, вызванными эффектами рассеяния звука на неоднородностях водной толщи [11, 12] и неровностях границ [11, 13].

Базовые алгоритмы пространственной обработки обладают высокой чувствительностью к различным возмущающим факторам. Для решения проблемы

рассогласования предложен ряд адаптивных методов, позволяющих повысить устойчивость процедуры оценивания.

На относительно коротких трассах, когда пространственный радиус корреляции полезного сигнала превышает апертуру антенны, определяющим является детерминированное рассогласование, методам борьбы с которым посвящено подавляющее число публикаций. Среди них, получивших наибольшее распространение, можно выделить следующие методы.

Процессор с многократными ограничениями. Один из первых адаптивных подходов, сочетающий устойчивость метода Бартлетта с высоким разрешением алгоритма Кейпона предложен в [14]. Обработка обеспечивает минимум выходной мощности при условии, что весовые сигнальные вектора подчиняются не одному, а нескольким дополнительным ограничениям, не превышающих число элементов антенны.

Алгоритмы пониженного ранга. Другой подход, обеспечивающий повышенную устойчивость решения задачи локализации, заключается в переходе от исходной корреляционной матрицы смеси сигнала и помехи к матрице меньшей размерности, не содержащей большого разброса собственных значений, который и приводит к неустойчивости при обращении матрицы. В частности, если число элементов антенны больше числа распространяющихся мод (что возможно, к примеру, в условиях мелкого моря), то в качестве исходной матрицы может быть взята матрица, содержащая лишь наиболее энергонесущие моды сигнала на входе антенны [15].

Адаптация к условиям априорной неопределенности. Предложен алгоритм фокализации, являющийся обобщением традиционного метода согласованной пространственной обработки [16]. Суть его состоит в том, что наряду с искомыми параметрами, описывающими положение источника, вводится в рассмотрение совокупность детерминированных параметров, характеризующих среду распространения, и задача заключается в совместном определении всего набора неизвестных величин на основе байесовской теории оценивания.

Робастный алгоритм Кейпона. Антенна, оптимизированная по методу Кейпона, стремится подавить любой сигнал, направляющий вектор которого отличается от ожидаемого. Поэтому такой метод поиска источника и оценки его координат будет работоспособен, если приемное устройство не вносит искажений в принятый сигнал, а ожидаемый вектор описывается адекватной математической моделью. Однако на практике рассчитанная реплика сигнала всегда отличается от истинной на величину некоторой ошибки, обусловленной тем или иным механизмом детерминированного рассогласования. Общий подход к построению устойчивых алгоритмов пространственной обработки в таких

условиях развит в работах [17, 18]. Он предполагает возможность контроля отклонения между направляющим и выбранным базовым векторами. Задача заключается в нахождении устойчивой процедуры оценивания, позволяющей для заданного отклонения между векторами скомпенсировать эффекты детерминированного несоответствия.

Нестационарность условий распространения акустических полей во флуктуирующем океане значительно затрудняет решение обратной задачи. Эффекты рассеяния звука на неоднородностях водной толщи, взволнованной поверхности и рельефа дна приводят к нарушению пространственной когерентности поля на приемной антенне, в результате чего представление для сигнальной матрицы осложняется. Остановимся на некоторых методах пространственной обработки частично-когерентных сигналов, позволяющих получить решение задачи локализации источника в случайно-неоднородном канале.

Алгоритм Кролика. В работе [19], наряду с искомыми детерминированными параметрами предлагается рассматривать совокупность случайных векторных величин, характеризующих флуктуационные характеристики среды распространения. В этом случае опорный сигнал становится случайной функцией. Алгоритм реализуется методом Монте-Карло, в котором в соответствии с заданной статистикой случайного поля рассчитывается ожидаемый вектор сигнальной матрицы.

Алгоритмы, основанные на максимизации отношения c/p . Более общий подход к рассмотрению адаптивных алгоритмов линейной пространственной обработки сигналов с нарушенной пространственной когерентностью основан на использовании критерия, максимизирующего отношение c/p на выходе процессора антенны. Оптимизация квадратичного процессора по критерию максимума выходного отношения c/p приводит к матричному фильтру, представляющего собой набор парциальных каналов, каждый из которых осуществляет пространственное выбеливание помехи и согласованную фильтрацию когерентной составляющей сигнала [20].

Обобщенный метод MUSIC. Для оценки параметров частично-когерентного сигнала предложены несколько вариантов обобщенного метода MUSIC. Из них наиболее распространенными являются алгоритмы [21, 22], которые, однако, теряют свою эффективность при большом объеме обучающей выборки.

Параметрические методы оценивания. Методы предполагают использование заданной модели корреляционной матрицы вектора наблюдений с последующим подбором параметров, которые наилучшим образом согласуются с результатами измерений. Одним из наиболее популярных параметрических способов обработки является метод максимального правдоподобия [23, 24].

В последнее время все больше внимания уделяется использованию широкой полосы

частот. При обнаружении и оценивании параметров широкополосного источника процедура пространственной обработки сводится к нахождению оптимальных весовых коэффициентов для отдельных узкополосных компонент в полосе полезного сигнала, с последующим некогерентным суммированием выходных сигналов по каждой из них. В этом случае качество восстановления координат источника заметно повышается [25, 26]. Это связано с тем, что пространственное положение боковых максимумов функции неопределенности частотно зависимо, поэтому дополнительное усреднение по частоте приводит к сглаживанию результирующей функции, устраняя тем самым проблему неоднозначности. При этом снижаются требования к апертуре антенны. Разработан также ряд когерентных методов частотного накопления, основанных на использовании фокусирующих матриц [27, 28].

§ 1.3. Голографическая обработка

Из-за волноводной дисперсии и многомодового режима распространения, океаническая среда способна формировать характерную интерферограмму широкополосного источника. В результате этого процесса образуется устойчивая структура локализованных интерференционных полос в частотно-временной области. Основным параметром формируемой интерферограммы является интерференционный (или волноводный) инвариант. По сути, он задает угловой наклон интерференционных полос в частотно-временной области. Этот угловой коэффициент определяет связь между временным интервалом и частотным сдвигом, сохраняющим разницу фаз между интерферирующими модами. Структура локализованных интерференционных полос определяется параметрами волновода и характеристиками источника (скорость и траекторию). По сути, интерферограмма представляет собой математическую модель шумоизлучения источника и передаточной функции волновода. Это открывает возможности для разработки новых методов обработки гидроакустических сигналов для решения широкого спектра прикладных задач. В частности, для решения задачи определения местоположения источников на основе их шумового поля.

На основе понятия интерференционного инварианта первые шаги в этом направлении предприняты в работах [32–41], где рассмотрены частные решения задачи локализации источника. С применением ВСП [42] помехоустойчивый голографический подход решения комплексной задачи локализации подводных источников (разрешение, обнаружение, определение пеленга, радиальной скорости, удаленности и глубины) на фоне малого входного отношения с/п впервые теоретически рассмотрен и апробирован на данных численных и натурных экспериментов в [43–70].

Голографическая обработка основана на квазикогерентном накоплении комплексных амплитуд принимаемого широкополосного сигнала вдоль интерференционных полос в течение заданного времени наблюдения. Накопление помехи не когерентно. Формируется интерферограмма в переменных частота-время и к ней применяется двумерное преобразование Фурье, т.е. записывается голограмма временного фрагмента излучения источника. На голограмме сигнальная спектральная плотность сконцентрирована в узкой полосе в форме фокальных пятен, спектральная плотность помехи распределена по всей области. Такая обработка реализует высокую помехоустойчивость. По расположению спектральных плотностей голограммы и некоторых априорных данных о канале распространения решаются задачи восстановления радиальной скорости и удаленности. Для решения задач обнаружения и пеленгования информация о гидрофизических характеристиках среды распространения не требуется. Устойчивость обработки при вариациях скорости звука и глубины волновода рассмотрена в [69].

За пределами области концентрации спектральной плотности источника голограмма очищается от помехи и выполняется обратное двумерное преобразование Фурье. По восстановленной интерферограмме регистрируется огибающая сигнала и через отношение амплитуд соседних мод оценивается глубина источника [71–73]. Метод оценки глубины источника имеет две уникальные особенности. Во-первых, уменьшение входного сигнал-шумового отношения не приводит к экспоненциальному различию между фактической и оценочной глубинами источника. Разница между ними начинает стремиться к некоторому постоянному значению. При этом, максимальная погрешность в определении глубины источника не превышает четверти длины волны. Во-вторых, этот метод имеет низкую чувствительность к погрешности в знании собственных функций и неточности в определении отношений амплитуд мод. Данный факт позволяет вместо собственных функций реального волновода использовать функции идеального волновода. В результате, мы можем определить глубину источника, даже когда информация о характеристиках среды распространения отсутствует.

Голографическая обработка представляет собой линейное преобразование информации из одной формы в другую, более удобную для решения тех или иных задач. Такое, казалось бы, несущественное отличие от классической интерферометрии, как двумерное разложение интерферограммы, приводит к важным аспектам.

Во-первых, возможности реализации адаптивных алгоритмов, позволяющих решать проблему определения радиальной скорости и удаленности малошумного источника в отсутствие информации о гидроакустических характеристиках океанической среды [55–58]. Адаптивные методы строятся на основе измерений направления на источник

[51–53, 62] и частотных смещений интерференционных пиков между двумя горизонтально разнесенными приемниками [74, 75]. Такой подход существенным образом повышает эффективность использования методов голографической обработки, применяя их в ситуациях, не доступных для других типов обработки. Например, обработки, которая привязана к специфике среды.

Во-вторых, разрешение нескольких источников различной интенсивности, когда их интерферограммы перекрываются по частоте и времени, и маскируются помехой. Результирующая голограмма в этом случае формируется путем последовательного наложения голограмм нескольких источников. Параметры разрешенных источников на фоне помехи измеряются с такой же точностью, как если бы другие источники отсутствовали. Возможность идентификации малошумного источника на фоне фоновой помехи и интенсивных шумовых локализованных помех определяется исключительно уровнем фоновой помехи [49, 50, 62].

Далее, в-третьих, устойчивость обработки по отношению к гидродинамической изменчивости океанической среды. В присутствии интенсивных внутренних волн оценки радиальной скорости и удаленности источника близки к значениям в их отсутствие [67].

И, наконец, в-четвертых, оценить предельное входное отношение с/п, при котором восстанавливаемые параметры источника близки к реальным значениям [41, 43–47, 52, 62].

Интерес к голографической обработке, основанной на двумерном преобразовании Фурье исходной информации, не исчерпывается только ее применением в области обнаружения и локализации малошумных подводных источников. Она позволяет по-новому осмыслить исследования и в других областях акустики океана, где играет роль интерференция волн широкополосного источника.

В ряде случаев, которые имеют практическую значимость, передача акустических данных через океанскую среду происходит при условиях гидродинамических нарушений, вызывающих искажение передаваемой информации. Уникальную возможность избежать (существенно уменьшить) эти искажения предоставляет голографический метод записи и восстановления интерферограммы, основанный на разделении спектральных плотностей голограммы невозмущенного и возмущенного полей [76–84].

В современной акустике океана, применение одиночного приемника для разделения мод звукового поля базируется на методе деформированного времени (time-warping). Этот подход использует выравнивание дисперсионных кривых развертывающим преобразованием. Данный подход является точным только для идеального волновода. В реальных мелководных волноводах он может использоваться приближенно. В рамках метода деформированного времени можно реконструировать групповые скорости

отдельных мод звукового поля. Реконструирование фазовых скоростей мод остается нерешенной задачей. Это затрудняет реконструкцию передаточной функции волновода и применять этот метод для формирования теоретической модели распространения звуковых волн в волноводе.

Голографический метод разрешения мод [90–92], основанный на применении двумерного преобразования Фурье к вещественной составляющей поля источника, лишен этого недостатка и позволяет регистрировать амплитуду, фазовую и групповую скорости, модальный коэффициент затухания выделяемых мод. Это открывает широкие возможности для восстановления передаточной функции волновода и построения теоретических моделей распространения звуковых волн в реальном волноводе в отсутствие априорной информации о среде распространения.

§ 1.4. Физические основы голографической обработки

В данном разделе кратко рассмотрены физико-математические принципы голографического метода обнаружения и локализации шумового источника с применением одиночных ВСП.

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

$$J = \Delta t / (\delta t_1 + \delta t_2). \quad (1.1)$$

Реализации независимы, если $\delta t_2 > 1/\Delta f$. Преобразованием Фурье восстанавливаются комплексные текущие спектры $P(f, t)$, $V_{x,y}(f, t)$. Формируются интерферограммы квадрата модуля звукового давления

$$I(f, t) = P(f, t)P^*(f, t) \quad (1.2)$$

и горизонтальных составляющих потока мощности

$$X(f, t) = V_x(f, t)P^*(f, t) = \cos(\phi)T(f, t), \quad (1.3)$$

$$Y(f, t) = V_y(f, t)P^*(f, t) = \sin(\phi)T(f, t), \quad (1.4)$$

где ϕ – угол (пеленг) в горизонтальной плоскости (x, y) между осью x ВСП и направлением на источник. Верхний индекс звездочка «*» означает комплексное сопряжение.

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 $X(f, t)$ (1.3) интегральное преобразование имеет вид

$$F_X(\tau, \nu) = \int_0^{\Delta t} \int_{f_1}^{f_2} X(f, t) \exp[i2\pi(\nu t - f\tau)] df dt, \quad (1.5)$$

Здесь ν и τ – частота и время голограммы; $f_{1,2} = f_0 \mp (\Delta f/2)$, f_0 – средняя частота спектра. Голограммы $F_X(\tau, \nu)$ и $F_Y(\tau, \nu)$, в силу соотношений (1.3), (1.4) различаются лишь постоянными множителями, определяемыми пеленгом, так что их нормированные зависимости идентичны.

Голограмма состоит из совокупности фокальных пятен, соответствующих интерференции между различными модами звукового поля. Фокальные пятна сконцентрированы в двух локальных областях пространства (τ, ν) , расположенных симметрично относительно начала координат. Если источник приближается к приемнику (т.е. радиальная скорость источника $w < 0$), то локальные области фокальных пятен расположены в квадрантах с номерами I и III. Если источник удаляется от приемника (т.е. радиальная скорость источника $w > 0$), то локальные области фокальных пятен расположены в квадрантах с номерами II и IV.

Фокальные пятна, расположенные в первом и четвертом квадрантах, являются действительным изображением источника, а расположенные во втором и третьем квадрантах – мнимым изображением. При неподвижном источнике и движении по дуге окружности фокальные пятна расположены на оси времени τ . В пространстве голограммы находится $(M - 1)$ фокальных пятен (τ_μ, ν_μ) , находящихся на прямой $\nu = \varepsilon\tau$. Здесь M – количество мод звукового поля, $\mu = \overline{1, M - 1}$ – индекс локального максимума голограммы. Фокальное пятно, которое расположено ближе к началу координат в точке (τ_1, ν_1) , соответствует интерференции только соседних мод звукового поля. В точке (τ_2, ν_2) расположено фокальное пятно, которое соответствует интерференции мод с номерами $(m, m + 2)$, и т.д. В точке (τ_{M-1}, ν_{M-1}) находится самое дальнее фокальное пятно, которое соответствует интерференции первой и последней моды. В каждой точке (τ_μ, ν_μ) аккумулируются $(M - \mu)$ интерференционных фокальных пиков [43].

Данная структура локализации голограммы описана в предположении положительного волноводного инварианта (придонное распространение звука). При отрицательных значениях волноводного инварианта (приповерхностное распространение звука) голографическая обработка остается справедливой, при этом спектральные плотности источника отображаются симметрично относительно оси времени по отношению к случаю положительного значения волноводного инварианта.

При условии $r_* \gg w\Delta t$, r_* – расстояние между источником и приемником в начальный момент времени $t_0 = 0$, радиальная скорость и начальное удаление источника от приемника пропорциональны координатам максимумов фокальных пятен [43]

$$\dot{w} = -2\pi\kappa_{w\mu}v_\mu, \quad \dot{r}_* = \kappa_{r\mu}\tau_\mu, \quad (1.6)$$

где

$$\kappa_{w\mu} = [\overline{h_{m(m+\mu)}(f_0)}]^{-1}, \quad \kappa_{r\mu} = [\overline{dh_{m(m+\mu)}(f_0)/2\pi df}]^{-1} \quad (1.7)$$

– коэффициенты, определяющие временные (пространственные) и частотные масштабы изменчивости передаточной функции волновода. Здесь $h_{m(m+\mu)} = h_m - h_{m+\mu}$, h_m – вещественная часть горизонтального волнового числа (постоянная распространения) m -й моды. Усреднение по модовой структуре звукового поля обозначает линия сверху выражения. Точка сверху параметра означает оценочное значение параметра источника.

Голографическая обработка сохраняет фазовую информацию о передаточной функции волновода в форме коэффициентов (1.7). Для первого фокального пятна, $\mu = 1$, соотношение (1.7) упрощается

$$\kappa_{w1} = (M - 1)[h_{1M}(f_0)]^{-1}, \quad \kappa_{r1} = (M - 1)[dh_{1M}(f_0)/2\pi df]^{-1}. \quad (1.8)$$

Спектральная плотность голограммы сосредоточена в полосе, ограниченной прямыми

$$v = \varepsilon\tau + \delta v, \quad v = \varepsilon\tau - \delta v, \quad (1.9)$$

где $\delta v = 1/\Delta t$ – полуширина фокальных пятен в направлении оси v ; ε – угловой коэффициент прямой, на которой расположены координаты пиков фокальных пятен. Вне этой полосы спектральная плотность практически подавлена. Ширина полосы не зависит от гидроакустических характеристик среды распространения и определяется условиями приема: временем наблюдения и шириной полосы. В направлении оси τ полуширина фокальных пятен $\delta\tau = 1/\Delta f$. Угловые коэффициенты ε и интерференционных полос $\delta f/\delta t$ связаны соотношением

$$\varepsilon = -\frac{\delta f}{\delta t}, \quad (1.10)$$

где δf – частотный сдвиг максимума волнового поля за время δt [43].

Независимость шумовых реализаций нужна для того, чтобы реализации помехи были не коррелированы. В этом случае спектральная плотность помехи на голограмме распределяется равномерно. В противном случае, на голограмме может формироваться структурированная область фокальных пятен помехи, что нежелательно, так как это приводит к снижению помехоустойчивости обработки. Передаточную функцию океанического волновода можно рассматривать как двумерный частотно-временной (пространственный) линейный фильтр. В этом смысле голографический метод

обнаружения и локализации малошумного источника является не чем иным, как двумерная оптимальная фильтрация при приеме известного сигнала. Ее реализация основана на частотно-временной квазикогерентности поля широкополосного источника, т.е. способности различных мод интерферировать друг с другом в широкой полосе.

Структура интерференции звукового поля описывается частотными $\Lambda_f^{(mn)}$ и временными $\Lambda_t^{(mn)}$ квазипериодами, которые соответствуют интерференции мод с номерами m и n [93]:

$$\Lambda_f^{(mn)} = \frac{2\pi}{r|dh_{mn}(f_0)/df|}, \quad \Lambda_t^{(mn)} = \frac{1}{|wh_{mn}(f_0)|}. \quad (1.11)$$

Геометрия интерферограммы сохраняется, если выполняется следующее условие. Величина частотной полосы Δf и временной интервал наблюдения Δt больше частотного и временного квазипериодов интерференции пары (m, n) мод

$$\Delta f > \Lambda_f^{(mn)}, \quad \Delta t > \Lambda_t^{(mn)}. \quad (1.12)$$

Условия (1.12) определяют ограничения на частотный диапазон и продолжительность наблюдения, в соответствии с расстоянием, радиальной скоростью и частотно-временными квазипериодами передаточной функции волновода в рамках интерферограммы. Увеличивая частотный диапазон и понижая среднюю частоту, возможно уменьшить минимальное расстояние, при котором интерферограмма сохраняет свою структуру. Несоблюдение условий (1.12) ведет к изменчивости структуры интерферограммы и размытию фокальных точек. Это приводит к увеличению ошибки в определении параметров источника (1.6). Условия (1.12) особенно важны для соседних мод, формирующих первое фокальное пятно голограммы. Невыполнение первого условия связано с номерами мод, для которых интерференционное пятно голограммы не обнаружено. При нарушении второго условия интервал наблюдения становится недостаточно длительным для того, чтобы источник мог пересечь масштабы изменчивости интерференционной структуры. В этом случае вступают в силу другие закономерности. Пик фокальной точки голограммы, созданный интерференцией мод, сдвигается к временной оси голограммы. Интерферограмма формируется для этой пары мод, как будто источник неподвижен.

В рамках данного анализа принимается критерий обнаружения источника, который предполагает, что максимум функции углового распределения голограммы (функция обнаружения) при входном отношении с/п q_0 (по мощности)

$$G_I[\chi, q_0] = \int_0^{\Delta\tau} |F_I[\tau, \chi, q_0]| d\tau \quad (1.13)$$

превышает помеховый уровень более чем в два раз:

$$G_I[\varepsilon, q_0] \geq 2G_I[\chi, q_0]. \quad (1.14)$$

Здесь $\Delta\tau$ – ширина области фокальных пятен вдоль оси времени τ ; величина χ задает угловой коэффициент при интегрировании вдоль прямой $v = \chi\tau$. Оценка параметра ε это то его значение, которое соответствует максимальному пику, $\max G_I(\chi) = G_I(\varepsilon)$, согласно условиям (1.14) [43, 48]. Информация о передаточной функции среды не требуется. При выполнении условия (1.12) оценки параметров источника (пеленг, радиальная скорость, удаленность, глубина) близки реальным/модельным значениям. Если неравенство (1.14) не выполняется, то принимаемый сигнал маскируется помехой, и источник не обнаруживается. Будем трактовать предельную (максимальную) дальность обнаружения $r_{\max}$ как дальность, которая реализуется при выполнении равенства (1.14) для входного отношения с/п q_0 . Теория статистического обнаружения источника шума на фоне помехи, построенная в работах [54, 63] базируется на критерии Неймана–Пирсона.

Основу алгоритма (1.14) составляют следующие положения. Волноводная передаточная функция работает как двумерный линейный фильтр в частотно-временной (или пространственной) области. Интерферограмма может быть интерпретирована как двумерный сигнал на выходе двумерного оптимального фильтра. Применение двумерного преобразования Фурье позволяет локализовать сигнал на фоне помех. Процесс углового сканирования распределения голограммы (1.13) предоставляет алгоритмический подход к выделению двумерного сигнала из помех.

После обнаружения источника проводится итерационная процедура оценки пеленга [51–53]. Ограничимся изложением случая одиночного ВСП [53] (в работах [51, 52] использовались два одиночных ВСП).

Первый этап - вычисление отношения пиковых значений функций обнаружения

$$\text{tg}\phi(q_0) = \frac{G_Y(\varepsilon, q_0)}{G_X(\varepsilon, q_0)}. \quad (1.15)$$

При этом значения пеленгов ϕ , $\phi + \pi$ равнозначны. Таким образом, определение пеленга источника неоднозначно. Второй этап – очищение от помехи области голограмм $F_X(\tau, v)$, $F_Y(\tau, v)$, $F_I(\tau, v)$ за пределами локализации фокальных пятен. Третий этап - обратные двумерные преобразования Фурье по восстановлению очищенных интерферограмм $X(f, t)$, $Y(f, t)$, $I(f, t)$.

Однозначность значения пеленга источника возникает при рассмотрении очищенных от помехи интерферограмм в момент времени t_* на частоте f_*

$$\gamma_x = \frac{X(f_*, t_*)}{I(f_*, t_*)} = \cos\phi \frac{T(f_*, t_*)}{I(f_*, t_*)}, \quad (1.16)$$

$$\gamma_y = \frac{Y(f_*, t_*)}{I(f_*, t_*)} = \sin\phi \frac{T(f_*, t_*)}{I(f_*, t_*)}, \quad (1.17)$$

По определению множители $T(f_*, t_*)$ и $I(f_*, t_*)$ одного знака. Частота f_* должна удовлетворять условиям: $T(f_*, t_*) \neq 0$, $I(f_*, t_*) \neq 0$. 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. Правило знаков на втором шаге итерации позволяет выбрать однозначное направление на источник, оцененное на первом шаге по отношению функций обнаружения. Следует отметить, что при обнаружении и при пеленговании источника в рамках голографического подхода не требуется априорной информации о среде распространения.

Для более эффективного применения голографического метода были разработаны адаптивные алгоритмы, в которых коэффициенты (1.7) оцениваются с использованием измеряемых величин. Важно отметить, что для оценивания коэффициентов (1.7) не требуется о параметрах океанического волновода [55–58]. При низком отношении сигнал/помеха прямыми измерениями в рамках голографического подхода могут быть определены пеленг источника [51–53] и частотное смещение интерференционного пика волнового поля в двух горизонтально разнесенных точках наблюдения [74, 75].

Пределом помехоустойчивости при голографической обработке является предельное входное отношение с/п q_{lim} . При значении с/п на входе, которое превышает предельное ($q_0 > q_{\text{lim}}$), происходит квазикогерентная аккумуляция вдоль интерференционных линий спектральной интенсивности интерферограммы [43, 46, 48]. Данный процесс позволяет устойчиво обнаруживать и оценивать параметры источника близкие к истинным значениям [43, 44, 48, 62]. В случае, когда помеха изотропная, для звукового давления шумового источника, значение $q_{\text{lim}} \approx 1.5/J^2$. Здесь J - количество некоррелированных реализаций шумовых сигналов источника, обработанных за время наблюдения (1.1) [45]. Использование каналов ВПС позволяет снизить значение q_{lim} в 2–5 раз [46, 48].

Если при фиксированном времени наблюдения шумовой реализации Δt , которое ограничивается минимальной длительностью $\min\delta t_1$, входное отношение с/п q_0 уменьшается, то требуется увеличить число временных интервалов J . При этом [55]:

$$\min\delta t_1 = \frac{5r}{2\pi} |dh_{1M}(f_0)/df|. \quad (1.18)$$

Таким образом, при увеличении расстояния r и средней частоты спектра f_0 , на величину минимального времени регистрации шумового сигнала влияют два фактора. Первый увеличивает значение за счет роста расстояния. Второй уменьшает значение, из-за

стремления групповых скоростей мод к постоянному значению, не зависящему от номера моды [93]. Если условие $(1/\Delta f) \ll (5r/2\pi)|dh_{1M}(f_0)/df|$ удовлетворяется, то количество временных шумового сигнала, на основе (1.1), (1.18), можно определить выражением:

$$J_{\max} = 2\pi \frac{\Delta t}{5r|dh_{1M}(f_0)/df|}. \quad (1.19)$$

Оценка потенциальной (максимальной) дальности обнаружения, согласно (1.18), равна

$$r_{\lim} = \frac{2\pi}{5\sqrt{1.5}} \sqrt{q_0} \frac{\Delta t}{|dh_{1M}(f_0)/df|}. \quad (1.20)$$

Особенностью соотношения (1.20) является то, что оно включает параметры передаточной функции волновода, и поэтому их физическое значение различается в зависимости от выбранной акватории. Оценка потенциальной дальности обнаружения $r_{\lim}$ имеет принципиальное значение: в рамках голографической обработки бессмысленно пытаться строить прогнозы на дальности обнаружения, превышавшие значения $r_{\lim}$.

Таким образом, представленная голографическая обработка адекватно передает основные особенности обнаружения и локализации малошумных подводных объектов, не будучи ни чересчур сложной, ни чересчур упрощенной.

§ 1.5. Выводы

Основными причинами низкой эффективности практического использования метода согласованного поля для локализации источника являются два важных фактора. Первый – отсутствие априорных знаний о среде распространения, позволяющих построить достаточно точные математические модели гидроакустических сигналов, прошедших эту среду. Второй – малый уровень принимаемого гидроакустического сигнала по сравнению с уровнем фонового шума акватории и других локализованных помех. Именно такая ситуация и представляет практический интерес. По существу, все предложенные алгоритмы в большей или меньшей степени теряют свою эффективность в таких условиях. Дополнительные трудности связаны с использованием протяженных антенн, со сложностью моделирования звуковых полей при реалистичном описании среды распространения, и математическими проблемами при решении многомерной обратной задачи восстановления координат источника. К тому же обработка не позволяет оценивать пеленг и радиальную скорость источника, а также рассматривать локализацию движущихся источников. Результаты апробации алгоритмов на основе методов согласованного поля в рамках численных и натурных экспериментов свидетельствуют об их слабой помехоустойчивости и нестабильности по отношению к изменчивости характеристик гидроакустических волноводов. В настоящее время, несмотря на длительную историю,

согласованная со средой обработка не вышла за рамки модельных и экспериментальных исследований, и не получила практического применения.

Преодоление отмеченных трудностей возможно голографическим методом обнаружения и локализации источника. По сравнению с методом согласованного поля он не только более содержателен физически, но и проще с математической стороны, так как позволяет – в рамках явных математических соотношений – установить простую и прозрачную связь между измеряемыми характеристиками голограмм и очищенными от помехи интерферограмм с параметрами шумового источника.

Плодотворность голографической обработки объясняется квазикогерентным накоплением шумового поля вдоль интерференционных полос и локализацией спектральной интенсивности шумового источника на голограмме. Голографический метод локализации широкополосного источника, как показывают численные и натурные эксперименты, характеризуется высокой помехоустойчивостью, реализующей восстановление параметров источника при малом входном отношении c/p и в условиях пространственно-временной изменчивости океанической среды; возможностью восстановления зашумленных интерферограмм; способностью разрешения нескольких малозумных источников в акваториях, не требующих знания о передаточной функции; установлением предельного входного отношения c/p , при превышении которого оценки параметров источника близки реальным значениям. Именно эти стороны голографической обработки, заложенные в ее физико-математических принципах, не оставляют сомнений в перспективности данного направления.

Преимущества, даваемые использованием голографической обработки, проявляются не только в решении обратных задач локализации малозумных источников. Она позволяет также реализовать передачу неискаженной информации при наличии неконтролируемых гидродинамических возмущений и разрешать моды, восстанавливая амплитуду, фазовую и групповую скорости, модальный коэффициент затухания выделяемых мод. В последнем случае на голограмме регистрируется фурье-образ вещественной части распределения поля широкополосного источника, а не фурье-образ спектральной плотности интерферограммы.

ГЛАВА 2

ОБНАРУЖЕНИЕ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ АНПА С ПРИМЕНЕНИЕМ ОДИНОЧНЫХ ПРИЕМНИКОВ

§ 2.1. Краткое введение

Во второй главе представлены результаты анализа высокочастотных шумовых сигналов, создаваемых движущимся малогабаритным АНПА в мелководной акватории. В ней разработан подход, позволяющий на основе численного моделирования звукового поля и спектральных характеристик шумоизлучения, зарегистрированных в эксперименте, проводить оценку дальности обнаружения источника. Также рассмотрена задача обнаружения полезного шумового сигнала на фоне помехи на основе критерия Неймана–Пирсона.

В параграфе 2.2 для мелководной акватории Тихоокеанского побережья представлены спектры помехи и шумоизлучения малогабаритного АНПА в дальней зоне аппарата в частотном диапазоне от 50 до 1000 Гц [94]. Спектральные уровни звукового давления АНПА получены при различных режимах и условиях движения. В параграфе 2.3, опираясь на критерий обнаружения источника (1.14) и спектральные характеристики аппарата и помехи, приведены результаты численного моделирования оценки предельной дальности АНПА для высокочастотного диапазона 900–950 Гц. В параграфе 2.4 приведено решение задачи обнаружения шумового сигнала на фоне помехи по критерию Неймана–Пирсона [54, 63, 95]. Оценено отношение с/п на выходе голографической обработки, получены явные выражения для вероятностей ложной тревоги и правильного обнаружения, выполнены численные расчеты кривых обнаружения. В параграфе 2.5 приведены основные результаты.

§ 2.2. Спектральная плотность шумоизлучения

В настоящее время с применением малогабаритных АНПА, обладающих низким уровнем шумоизлучения, решается широкий круг задач подводных исследований: патрулирование и охрана морских акваторий [96, 97], отслеживание перемещения морских животных [98], поисковые и инспекционные операции [99, 100] и т.д. Контроль подводной обстановки охраняемых территорий предполагает информацию о дальности обнаружения подводных аппаратов. Как следствие этого, для получения реалистической оценки размера контролируемой акватории необходимы данные о спектральных характеристиках

шумоизлучения источников в дальней зоне, где отсутствует реактивная составляющая поля, и помехи в различных частотных диапазонах.

В качестве объекта исследования выбран малогабаритный АНПА «ММТ-3000», разработанный и изготовленный ИПМТ ДВО РАН [101], который способен функционировать как в режиме АНПА (включенные движители), так и в режиме глайдера (подводного планера) с выключенными движителями. Цель исследований – оценить спектры шумоизлучения АНПА «ММТ-3000» в диапазоне частот 50–1000 Гц на расстоянии 200 м от него (дальняя зона) при различных режимах и скоростях движения.

Структура поля у корпуса аппарата сложна, поскольку шумоизлучение АНПА обусловлено рядом разнесенных в пространстве и взаимодействующих между собой источников: несколько винтов с различными и изменяющимися скоростями вращения; область водной среды, где сходятся турбулентные струи от винтов; вибрирующие части корпуса; зоны турбулентности при гидродинамическом обтекании корпуса и прочее. Акустическое поле вблизи корпуса АНПА содержит как активную составляющую, так и значительную реактивную составляющую, не участвующую в формировании распространяющейся волны от аппарата, поэтому уровень звукового давления собственного шумоизлучения у корпуса АНПА может достигать больших значений.

Основной источник шума подводного аппарата связан с кавитационным шумом, который возникает от вращающихся винтов, работающих на высоких скоростях. Этот шум является широкополосным. Скорость вращения винтов АНПА определяет частотный диапазон создаваемого шумоизлучения. Частоты вращения лопастей АНПА модулируют уровень шума, формируя при этом частотный лопастной ряд. Частоты валов двигателей не являются явно выраженными в шуме АНПА из-за динамической балансировки винтов аппарата и этих валов. Также значительной причиной шумоизлучения аппарата при движении является поток воды обтекающий его корпус. Данный фактор вызывает широкополосный акустический шум из-за турбулентности потока воды. Также он приводит к колебаниям корпуса аппарата, которые имеют резонансный характер и создают дополнительные дискретные составляющие в шум АНПА.

При движении в режиме глайдера аппарат перемещается в толще воды без использования движителей за счет циклического изменения плавучести и угла дифферента, движение принимает циклический характер относительно заданной глубины. Шум у корпуса аппарата обусловлен гидродинамическими шумами обтекания низкоскоростным потоком воды, а также вибрациями его корпуса.

Натурные эксперименты по оценке шумоизлучения в ближней зоне (расстояние 15 см от днища корпуса) АНПА на глубине 10 м при разных режимах работы и условиях

движения были проведены в акватории бухты Патрокл глубиной 20 м при низком уровне шумов моря и наличии ближнего маломерного судоходства [102].

На рис. 2.1–2.3 приведены экспериментальные усредненные спектры звукового давления шумоизлучения АНПА в ближней зоне при включенных движителях и скоростях 2, 1.7 и 1.2 м/с прямолинейного движения аппарата. Спектры получены с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) и частотным разрешением 0.977 Гц, окном Ханнинга и осреднением по 20 спектрам [94]. Здесь и далее децибелы отсчитываются относительно произвольного конкретного уровня.

Спектр шума содержит частотные области с повышенной величиной спектральных уровней, центральные частоты которых различны для разных скоростей движения. Это приводит к тому, что отсутствует монотонный спад уровня спектра с увеличением частоты и как следствие, с уменьшением скорости аппарата. Тем не менее, спектральные зависимости на рис. 2.1–2.3 показывают, что уровни спектра спадают на 4–5 и 9–10 дБ со снижением скорости движения аппарата от 2 до 1.7 и 1.2 м/с, соответственно.

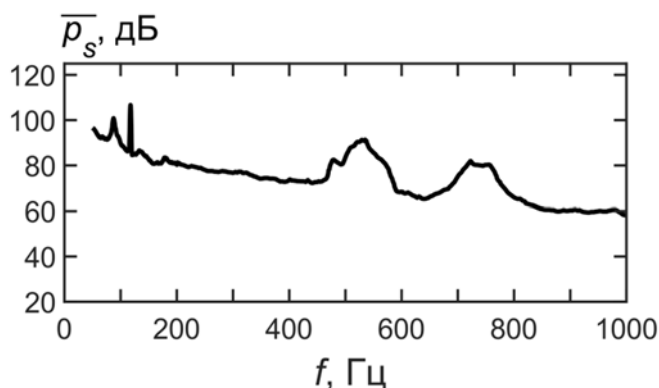


Рис. 2.1. Спектр звукового давления у корпуса аппарата, скорость движения 2 м/с.

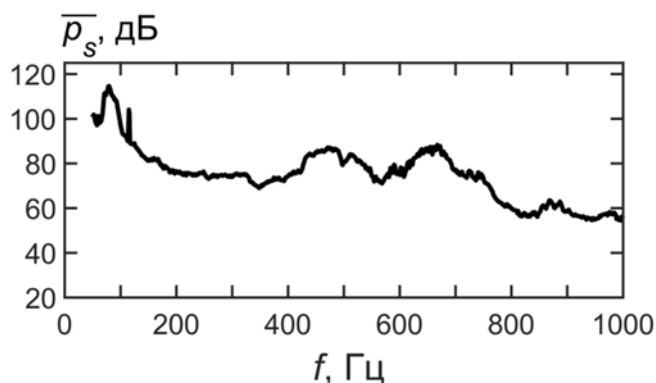


Рис. 2.2. Спектр звукового давления у корпуса аппарата, скорость движения 1.7 м/с.

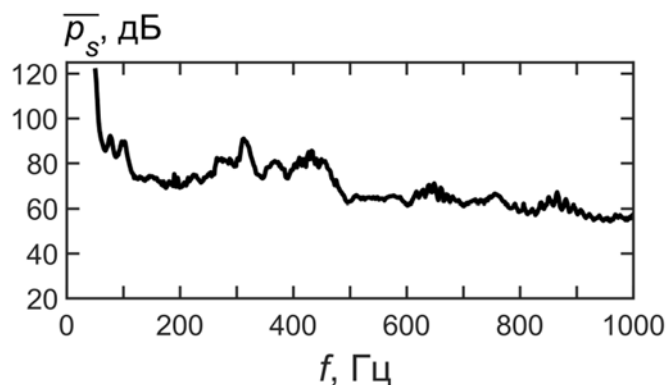


Рис. 2.3. Спектр звукового давления у корпуса аппарата, скорость движения 1.2 м/с.

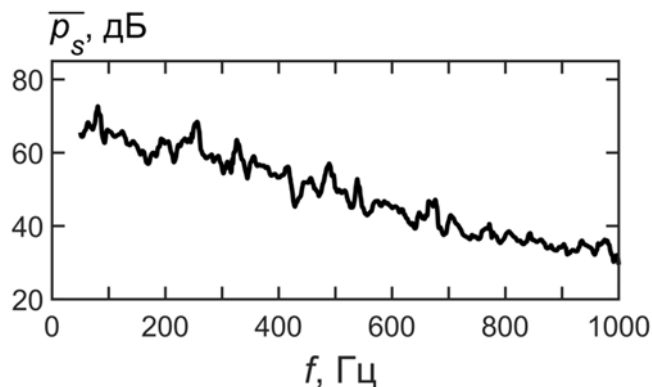


Рис. 2.4. Спектр звукового давления у корпуса аппарата в режиме зависания.

Уровень спектральной плотности в области частот 0.8–1 кГц составляет ≈ 60 дБ, обнаруживая весьма слабую чувствительность к скорости движения. При изменении условий измерения, например, близости аппарата к отражающим границам волновода (поверхности, дну) полученные спектральные кривые могут незначительно отличаться от представленных на рис. 2.1–2.3.

На рис. 2.4 представлен спектр шума на расстоянии 15 см от корпуса АНПА, свободно всплывающего со скоростью около 7 см/с при отключенных движителях [94]. Спектр вычислялся БПФ с частотным разрешением 3.906 Гц, окном Ханнинга и линейным осреднением по 20 спектрам. Уровень шума, как видно, на 20–30 дБ меньше, чем при движении аппарата с включенными движителями. Шумы обусловлены как гидродинамическим обтеканием низкоскоростным потоком воды поднимающегося на поверхность аппарата, так и вибрациями его корпуса.

Эксперимент по определению спектра АНПА в дальней зоне проводился в мелководной акватории глубиной места 44 м [102]. Шумоизлучение регистрировалось приемными модулями, размещенными на глубине 22 м в вершинах равностороннего треугольника со сторонами около 300 м. Точное местоположение модулей определялось GPS навигацией в момент их установки. Аппарат на глубине 20 м двигался со скоростью 2

м/с по прямолинейной траектории, проходящей вблизи каждой точки приема. Текущие координаты аппарат определял по счислению, корректируя после всплытий на поверхность по GPS навигации начало следующего галса. Шумовой фон практически штилевого моря оценивался осреднением синхронных по времени спектров сигналов трех модулей на временных интервалах, когда аппарат был максимально удален от модулей с отключенными движителями. После анализа всех проходов АНПА у приемных модулей были получены средние спектры шумоизлучения аппарата на различных фиксированных удалениях от точек приема. Средний спектр на удалении $r_0 = 200$ м приведен на рис. 2.5 [94]. При обработке экспериментальных данных шумоизлучения аппарата применялось осреднение спектров на временном интервале 2 с, за который аппарат изменял свое местоположение на 4 метра, что являлось допустимым. Спектральный анализ проводился БПФ с частотным разрешением 15.6 Гц, что позволяло несколько сгладить осцилляции спектральной плотности, обусловленные интерференцией мод звукового поля. При этом частотные области повышенного/пониженного шумоизлучения аппарата сохранялись. Применялось частотное окно Ханнинга и линейное осреднение по 30 спектрам.

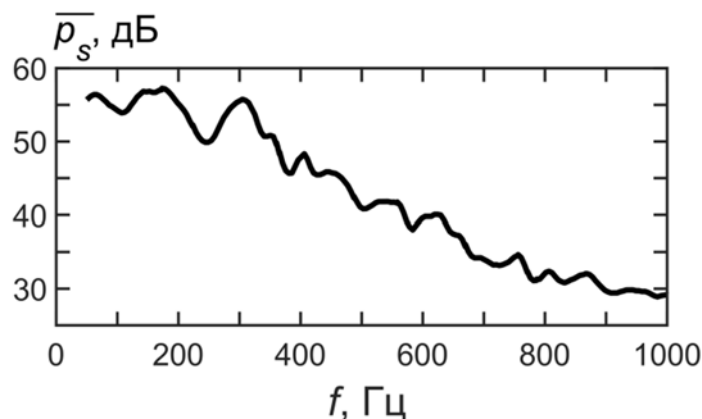


Рис. 2.5. Спектр звукового давления аппарата в дальней зоне, скорость 2 м/с.

На рис. 2.6 показана зависимость

$$\Delta \overline{p_s}(f) = \overline{p_{sn}}(f) - \overline{p_{sf}}(f) \quad (2.1)$$

переноса спектра звукового давления из ближней зоны, $\overline{p_{sn}}(f)$, в дальнюю зону, $\overline{p_{sf}}(f)$, рассчитанная по экспериментальным данным для скорости движения 2 м/с. Зависимость (2.1) не зависит от режима работы и скорости движения аппарата. Она определяется гидроакустическими характеристиками мелководных акваторий, в которых измерены зависимости $\overline{p_{sn}}(f)$ и $\overline{p_{sf}}(f)$, и размером дальней зоны, в которой сформирована модовая структура звукового поля. Кривая на рис. 2.6 показывает, что уровень спектральной плотности аппарата в дальней зоне, по сравнению с ближней зоной, снижается на 29–43 дБ. Такое значительное спадание уровня спектра на расстоянии $r_0 = 200$ м объясняется,

пренебрегая модальным затуханием, затуханием реактивной составляющей спектра, а также сферическим и цилиндрическим расхождением поля с расстоянием.

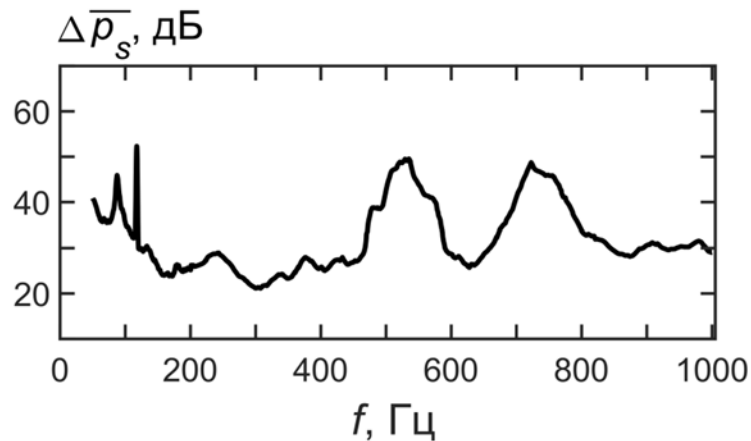


Рис. 2.6. Функция $\Delta \bar{p}_s(f)$, скорость 2 м/с.

На рис. 2.7–2.9 приведены средние спектры АНПА в дальней зоне на расстоянии 200 м для скоростей движения 1.2, 1.7 м/с и режима зависания, рассчитанные с применением (2.1).

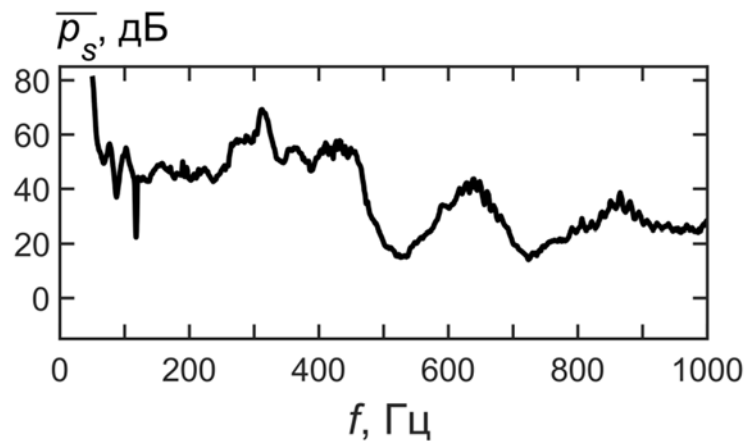


Рис. 2.7. Спектр звукового давления аппарата в дальней зоне, скорость 1.2 м/с.

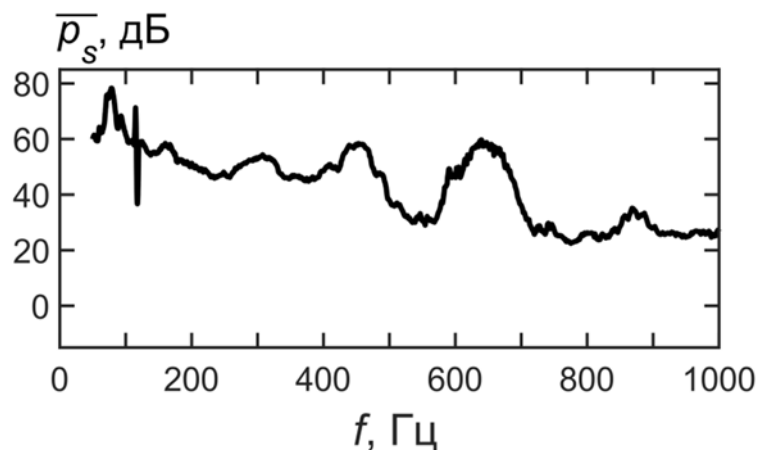


Рис. 2.8. Спектр звукового давления аппарата в дальней зоне, скорость 1.7 м/с.

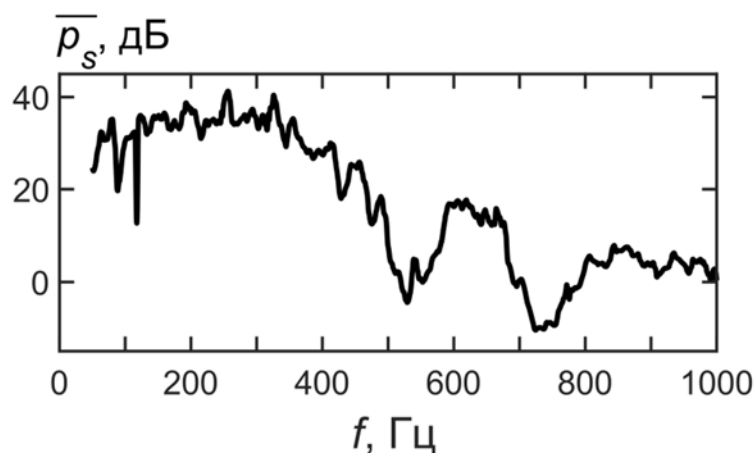


Рис. 2.9. Спектр звукового давления аппарата в дальней зоне, режим зависания.

На рис. 2.10 представлена усредненная спектральная плотность звукового давления фона шума мелководной акватории, где проводились измерения спектра шумоизлучения аппарата в дальней зоне. Сравнение рис. 2.5, 2.7–2.9 и рис. 2.10 показывает, что на расстоянии 200 м от АНПА имеются частотные диапазоны, в которых уровень спектра подводного аппарата превышает уровень фоновой помехи.

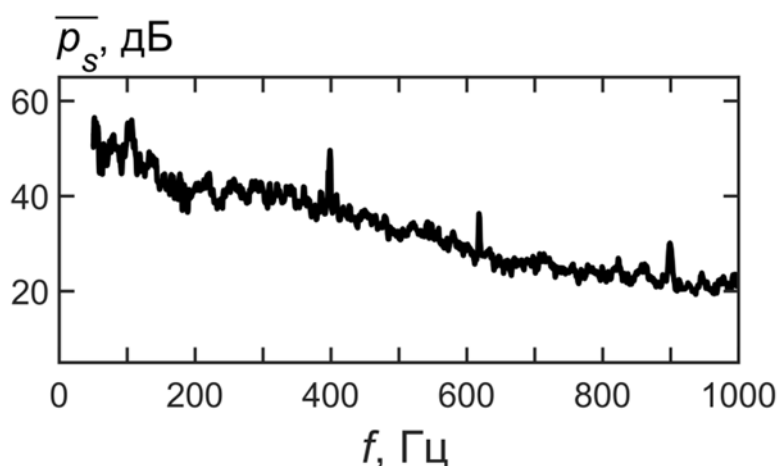


Рис. 2.10. Спектр шумового фона моря.

§ 2.3. Дальность обнаружения

При рассмотрении вопроса о предельной дальности обнаружения АНПА в высокочастотном диапазоне $f = 900 - 950$ Гц будем следовать работе [64], где та же задача была рассмотрена для частотного диапазона $f = 300 - 350$ Гц.

В частотной полосе Δf шумовой гидроакустический сигнал источника, усредненный по реализациям в точке наблюдения на расстоянии r , можно представить в рамках модового описания звукового поля в виде суммы мод и суперпозиции K гармонических

составляющих на частотах f_k . Гармонические составляющие характеризуются с случайной мощностью E_k [93]:

$$\overline{P_{\Delta f}}(r) = \sqrt{\rho c} \left| \sum_m \sum_k \sqrt{E_k} S_{mk}(r) \right|, \quad (2.2)$$

где

$$S_{mk}(r) = \frac{\psi_m(z_s, f_k) \psi_m(z_q, f_k)}{\sqrt{h_m(f_k) r}} \exp[ih_m(f_k)r + \gamma_m(f_k)r]. \quad (2.3)$$

В выражениях (2.2), (2.3) ψ_m и γ_m – мода и коэффициент затухания m -й моды; глубины z_s и z_q соответствуют источнику и приемнику; ρ и c – плотность и скорость звука.

Следует отметить, формула (2.2) также справедливо для источника протяженного в пространстве. Для применимости (2.2.) достаточно чтобы горизонтальный размер L был мал относительно расстояния r ($L \ll r$). Это требование выполняется для типичных АНПА и расстояниях наблюдений более нескольких десятков метров.

Будем считать, что значения мощностей гармоник, усредненные по реализациям, примерно одинаковые, $\overline{E_k} = \overline{E}$. В результате сделанного предположения спадание (2.2) для наблюдения в дальней зоне ($r \geq r_0$), принимает вид:

$$\overline{P_{\Delta f}}(r) = \overline{P_{\Delta f}}(r_0) \sqrt{\frac{r_0}{r}} \frac{R(r)}{R(r_0)}, \quad (2.4)$$

Здесь

$$R(r) = \sum_m \sum_k S_{mk}(r). \quad (2.5)$$

В выражении (2.4) экспериментально определяемое амплитудное значение, обозначено $\overline{P_{\Delta f}}(r_0) = \overline{p_s}(r_0, f_0) \sqrt{\Delta f}$. Заметим, что значение средней мощности в полосе Δf равно:

$$\overline{P_{\Delta f}^2}(r) = |\overline{P_{\Delta f}}(r)|^2. \quad (2.6)$$

Определим критерием (1.14) максимальное расстояние обнаружения источника шума $r_{\max}$. Входное отношение с/п, соответствующее расстоянию r находится по формуле

$$q_0(r) = \frac{\overline{P_{\Delta f}^2}(r)}{N_{\Delta f}^2}. \quad (2.7)$$

В выражении (2.7) величины $\overline{P_{\Delta f}^2}(r)$ и $N_{\Delta f}^2$ представляют собой мощность сигнала и мощность помехи.

В рамках численного эксперимента [64], применялся гидроакустический волновод со следующими параметрами. Глубина $H = 60$ м. Скоростью звука в водном слое $c = 1480$ м/с. Отношение плотностей донного и водного слоев $\rho = 1.8$. Показатель преломления

донного слоя – комплексный: $n = 0.88(1 + i0.022)$. По сравнению с частотным диапазоном $f = 300\text{--}350$ Гц [64] мнимая часть показателя преломления увеличена в 1.69 раз, что соответствует корню квадратному из отношения частот $\sqrt{925/325}$. Глубина АНПА $z_s = 30$ м, глубина ВСП $z_q = 50$ м. В начальный момент времени $t_0 = 0$ расстояние между источником и приемником равно дальней зоне $r_0 = 200$ м. Источник удалялся от одиночного приемника по прямолинейной траектории с радиальной скоростью $w = 2$ м/с. Полоса $\Delta f = 900\text{--}950$ Гц, средняя частота спектра $f_0 = 925$ Гц.

В табл. 2.1 представлены горизонтальные волновые числа мод $h_m(f_0)$ и их производных $dh_m(f_0)/2\pi df$ для частоты $f_0 = 925$ Гц.

Таблица 2.1.

Номера мод, m	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$h_m, \text{м}^{-1}$	3.9266	3.9256	3.9239	3.9216	3.9185	3.9148	3.9104	3.9052	3.8994
$(dh_m/2\pi df)10^4$ с/м	6.7573	6.7590	6.7618	6.7658	6.7709	6.7772	6.7847	6.7933	6.8031
Номера мод, m	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$h_m, \text{м}^{-1}$	3.8930	3.8858	3.8779	3.8693	3.8599	3.8499	3.8391	3.8276	3.8154
$(dh_m/2\pi df)10^4$ с/м	6.8142	6.8265	6.8401	6.8550	6.8712	6.8888	6.9077	6.9281	6.9499
Номера мод, m	19	20	21	22	23	24	25	26	27
$h_m, \text{м}^{-1}$	3.8024	3.7887	3.7742	3.7589	3.7428	3.7260	3.7083	3.6899	3.6706
$(dh_m/2\pi df)10^4$ с/м	6.9732	6.9981	7.0245	7.0526	7.0823	7.1138	7.1472	7.1823	7.2194
Номера мод, m	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$h_m, \text{м}^{-1}$	3.6505	3.6295	3.6076	3.5849	3.5613	3.5368	3.5114	3.4850	3.4577
$(dh_m/2\pi df)10^4$ с/м	7.2585	7.2996	7.3428	7.3883	7.4359	7.4857	7.5377	7.5916	7.6476
Номера мод, m	37	38	39	40					
$h_m, \text{м}^{-1}$	3.4295	3.4001	3.3695	3.3378					
$(dh_m/2\pi df)10^4$ с/м	7.7087	7.7842	7.9429	7.9429					

Дискретизация по частоте $\delta f = 0.2$ Гц. Полоса частот $\Delta f = 50$ Гц. Количество гармоник $K = 251$. Количество мод $M = 40$. Шумовые реализации $\delta t_1 = 1.5$ с. Интервал между ними $\delta t_2 = 0.5$ с. Количество реализаций $J = 15, 30$ (1.1). Длительность наблюдения $\Delta t = 30, 60$ с.

Спектры звукового давления шумоизлучения АНПА в дальней зоне и шумового фона акватории (помехи) приведены на рис. 2.5 и 2.10. На частоте $f_0 = 925$ Гц средняя спектральная плотность: АНПА $\overline{p_s}(f_0, r_0) = 30$ дБ, помехи $\overline{p_n}(f_0) = 22$ дБ. В полосе $\Delta f = 900 - 950$ Гц: средняя мощность сигнала $\overline{P_{\Delta f}^2}(r_0) = -53.01$ дБ; средняя мощность помехи $\overline{N_{\Delta f}^2} = -61.01$ дБ. На расстоянии $r_0 = 200$ м входное отношение с/п $q_0(r_0) = 8$ дБ.

Зависимость мощности шума АНПА от расстояния показана на рис. 2.11. Учет модовой интерференции приводит к вариации мощности шумового сигнала относительно результата некогерентного сложения мод. Величина этих вариаций ≈ 5 дБ наблюдается в диапазоне расстояний до 15 км. Значения мощностей шума $-61.15, -71.15$ и -81.15 дБ показаны горизонтальными пунктирами линиями. Им соответствуют входные отношения с/п (2.7) $q_0 = 0.14, -10.14, -20.14$ дБ. Расстояния $r = 1.95, 7.31$ км, соответствующие входным значениям с/п $q_0 = 0.14, -10.14$ дБ показаны на графике вертикальными пунктирными линиями.

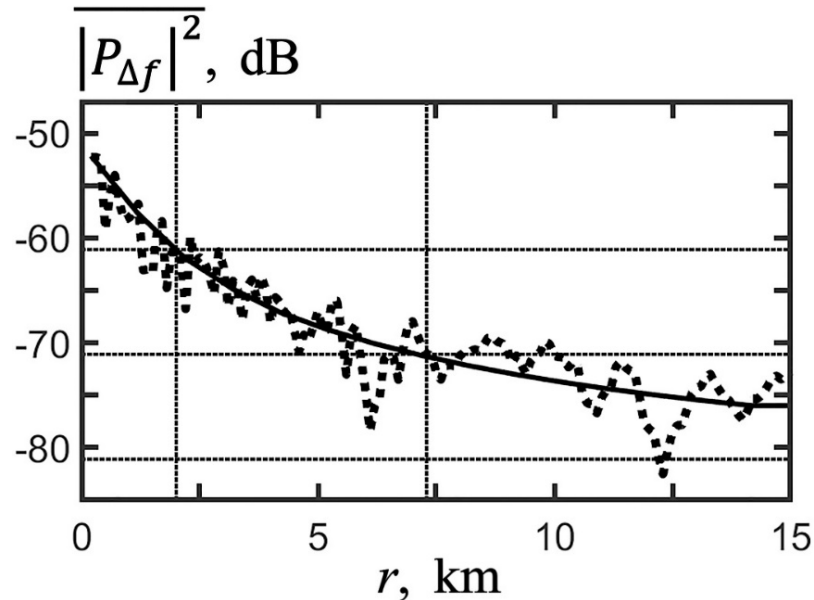


Рис. 2.11. Спадание мощности шума АНПА $\overline{P_{\Delta f}^2}(r)$ с расстоянием. Пунктир – результат интерференции мод. Сплошная линия – некогерентное сложение мод. Радиальная скорость $w = 2$ м/с.

На рис. 2.12, 2.13 приведены результаты, полученные в рамках голографической обработки для интервала наблюдения $\Delta t = 30, 60$ с ($J = 15, 30$) и расстояний близких к

предельным. На графиках показана нормированная функции обнаружения G . Нормировка отмечена с помощью диакритического знака «крышка».

На рис. 2.12(а–в), 2.13(а–в) представлены результаты численного моделирования в отсутствие помехи. На предельных расстояниях обнаружения $r_1 = 6,9$ км угловые коэффициенты локализованных интерференционных полос $\delta f/\delta t$ и положения χ_m максимумов функции обнаружения совпадают по абсолютным значениям и различаются знаками: $\delta f/\delta t = |\chi_m| = 0.2854, 0.1753 \text{ с}^{-2}$. Из рис. 2.12б, 2.13б следует, что регистрируемые голограммы, следовательно, и интерферограммы, искажены, поскольку координата $\tau_1 = 2.2222 \cdot 10^{-2}$ с максимума первого фокального пятна расположена на оси времени. Для соседних мод, согласно данным табл. 2.1, первое (левое) неравенство (1.12) выполняется для мод номеров $m = \overline{23, 40}$ ($J = 15$), $m = \overline{17, 40}$ ($J = 30$); второе (правое) неравенство выполняется для мод номеров $m = \overline{23, 40}$. Поэтому можно считать, искаженное первое фокальное пятно обусловлено интерференцией мод с номерами $m = 23, 24$ ($J = 15$) и $m = \overline{17, 23}$ ($J = 30$). Согласно (1.6), (1.8), оценки предельных расстояний равны $\dot{r}_* = 7.05, 8.65$ км, что близко к модельным значениям $r_1 = 6, 9$ км.

Результаты представленные на рис. 2.12(г–и), 2.13(г–и) демонстрируют помехоустойчивость голографической обработки. Увеличение уровня помехи маскирует интерференционные структуры. В результате наблюдаются хаотические структуры, на которых интерференционные линии не проявляются (рис. 2.12(г, ж), 2.13(г, ж)). В тоже время структурированная картина фокальных пятен остается в области голограммы даже для предельных расстояний (рис. 2.12д, 2.13д). Положения максимумов фокальных пятен практически не изменяются, так что предельные расстояния регистрируются с той же погрешностью, что и в отсутствие помехи. Это наиболее ярко проявляется на рис. 2.12е, 2.13е функций обнаружения. Согласно критерию (1.14), шумовой источник обнаруживается, максимальные дальности оцениваются как $r_{\max} = 6, 9$ км. Для предельного расстояния $r_1 = 6$ км при добавлении помехи отмечается сдвиг положения максимума функции обнаружения по отношению к случаю отсутствия помехи (рис. 2.12(в, е)). С увеличением числа временных интервалов возрастает дальность обнаружения и повышается устойчивость обработки. Данным расстояниям, как следует из рис. 2.11, соответствуют входные отношения с/п $q_0 = -8.99, -12.07$ дБ. Повышение числа временных интервалов в два раза приводит к возрастанию в два раза выходного отношения с/п, или что тоже самое, снижает входное отношение с/п на 3 дБ, при котором увеличивается предельная дальность обнаружения. Возрастание числа временных интервалов в два раза повысило дальность обнаружения с 6 до 9 км. Согласно рис. 2.11 это

соответствует повышению выходного отношения с/п на 3.8 дБ. Этот результат подтверждает предположение о квазикогерентном накоплении спектральной плотности вдоль интерференционных полос.

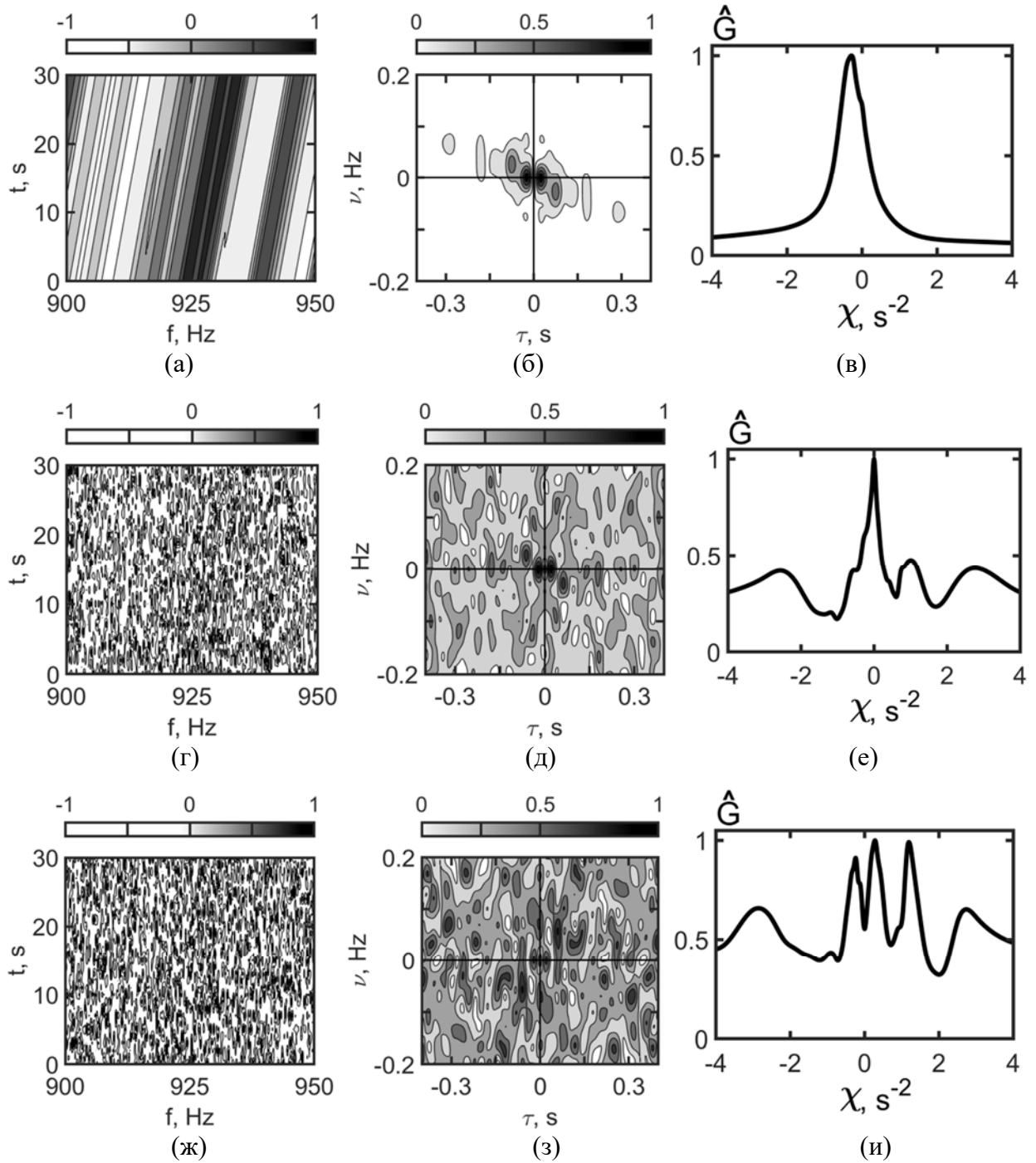


Рис. 2.12. Нормированные интерферограммы (а, г, ж), голограммы (б, д, з) и функции углового распределения спектральной плотности (в, е, и) звукового давления. Число шумовых реализаций $J = 15$. Расстояния: (а-е) – $r_1 = 6$ км, (ж, з, и) – $r_2 = 7$ км. Рис. 2.12 (а, б, в) – отсутствие помехи, рис. 2.12 (г-и) – наличие помехи.

При дальнейшем снижении уровня сигнала, при сохранении уровня помехи, сигнал на голограмме полностью маскируется помехой, что приводит к неоднозначности в

определении положения χ_m максимумов функции обнаружения (рис. 2.12(з, и), 2.13(з, и)). Обнаружение источника на расстояниях $r_2 = 7, 10$ км становится невозможным. Расстояниям $r_2 = 7, 10$ км соответствуют входные отношения с/п $q_0 = -10.14, -12.84$ дБ.

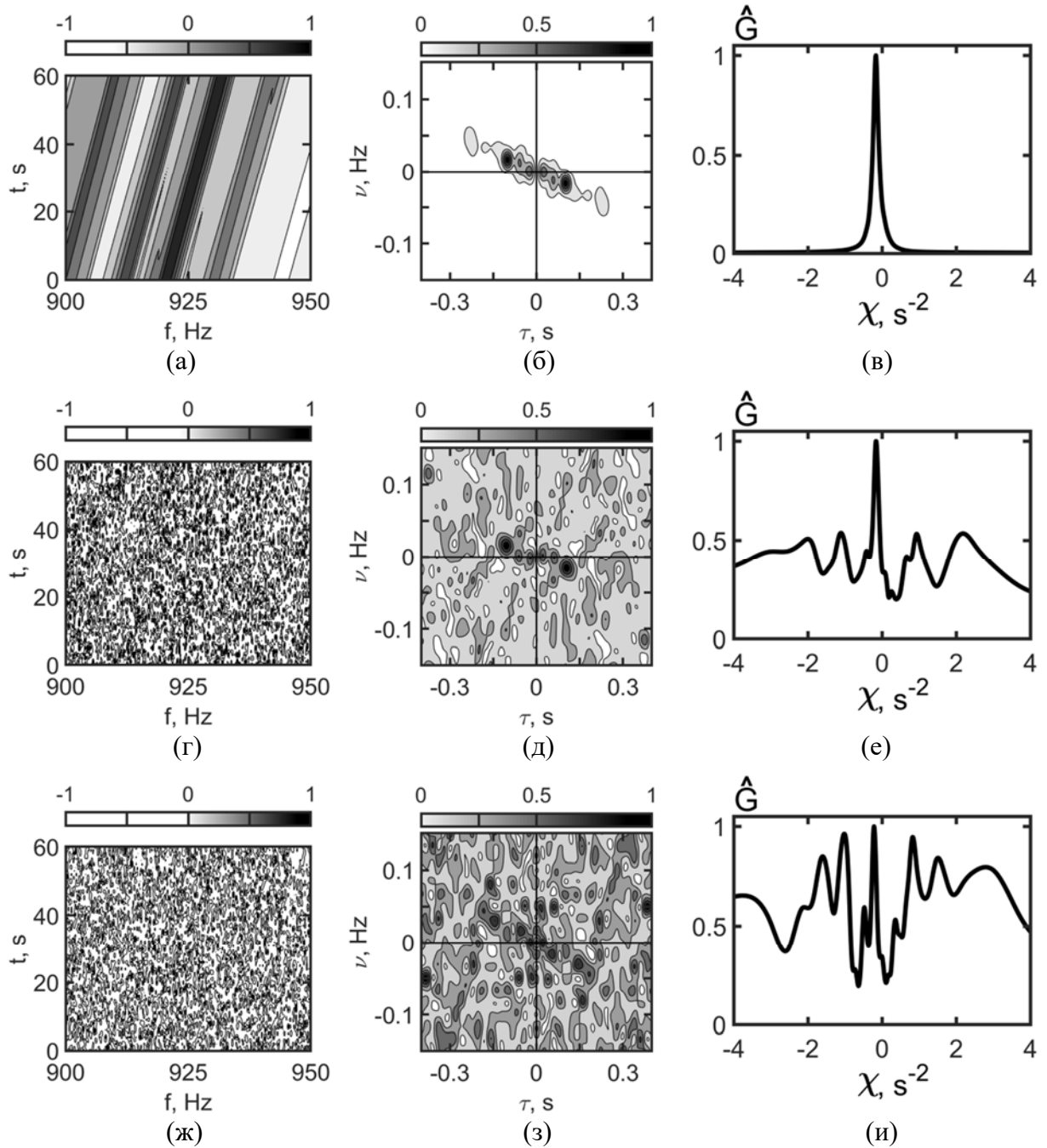


Рис. 2.13. Нормированные интерферограммы (а, г, ж), голограммы (б, д, з) и функции углового распределения спектральной плотности (в, е, и) звукового давления. Число шумовых реализаций $J = 30$. Расстояния: (а–е) – $r_1 = 9$ км, (ж, з, и) – $r_2 = 10$ км. Рис. 2.13 (а, б, в) – отсутствие помехи, рис. 2.12 (г–и) – наличие помехи.

Оценим потенциальную дальность обнаружения r_{lim} (1.20) при оптимальном выборе числа временных интервалов J . Пусть входное отношение с/п $q_0 = -10$ дБ, время наблюдения $\Delta t = 30$ с, число мод $M = 40$, $f_0 = 925$ Гц, $|dh_{1M}(f_0)/2\pi df| = 1.1856 \cdot 10^{-4}$

с/м. В этом случае, согласно (1.20), $r_{\text{lim}} = 13.07$ км, т.е. в 2.18 раз превышает дальность 6 км, зарегистрированную в численном эксперименте.

§ 2.4. Обнаружение по критерию Неймана–Пирсона

Качественный критерий обнаружения шумового сигнала источника на фоне помехи (1.14), основанный на наличии выделяемого над уровнем помех пика функции обнаружения, нельзя признать универсальным. Общая постановка задачи должна оценивать как вероятность правильного обнаружения – превышения некоторого порога на выходе обработки приемного устройства при наличии сигнала, так и вероятность ложной тревоги, т.е. превышения порога в отсутствие сигнала. В данном разделе оценено отношение с/п на выходе голографической обработки и приведено решение задачи обнаружения источника на основе критерия Неймана–Пирсона, который максимизирует вероятность правильного обнаружения при заданной вероятности ложной тревоги [103].

На статистических характеристиках обнаружения и восстановленных параметров источника в зависимости от входного отношения с/п q_0 можно наблюдать три области, типичные для голографической обработки [43].

Область I, интервал значений $0 < q_0 < q'$. Входные отношения с/п q_0 слишком малы и шумовой сигнал полностью маскируется помехой. Обнаружение и локализация источника невозможны. Область следует рассматривать как помеховую.

Область II, интервал значений $q' < q_0 < q_{\text{lim}}$. Здесь q_{lim} – предельное входное отношение с/п, при превышении которого реализуется квазикогерентное накопление спектральных максимумов шумового поля источника вдоль интерференционных полос. С увеличением значения q_0 растет степень достоверности того, что принимаемый сигнал обусловлен шумовым источником, однако значения q_0 еще недостаточно высоки, чтобы надежно обнаруживался источник и его параметры восстанавливались с малой погрешностью. Область можно рассматривать как переходную.

Область III, интервал значений $q_0 > q_{\text{lim}}$. В структуре функции G уменьшается величина побочных помеховых экстремумов. Существенно преобладающим становится экстремум полезного шумового сигнала. При этом оцениваемые значения определяемых параметров становятся близкими к их фактическим величинам. Если рассматривать обработку звукового давления шумового источника с изотропной помехой, то $q_{\text{lim}} \approx 1.5/J^2$ [45]. Количество временных интервалов – J . В области III входные отношения с/п удовлетворяют условию

$$q_0 J^2 > 1.5 \quad (2.8).$$

Область можно рассматривать как сигнальную, так как обнаружение и локализация источника реализовываются с высокой надежностью [43, 45, 46, 48, 50, 52]. Переходная область II довольно узкая, например, для числа отсчетов $J = 20$ отношение $q_{\text{lim}}/q' \approx 2.5$ [43]. Далее ограничимся рассмотрением области III, представляющей практический интерес.

Пусть спектры шумового сигнала и помехи, которые обозначим $s(t, f)$ и $n(t, f)$, сосредоточены в полосе Δf_1 . Сигнал и помеха являются взаимонезависимыми гауссовскими случайными процессами с нулевыми математическими ожиданиями. Ограничимся скалярной компонентой поля и значениями q_0 , удовлетворяющими условию (2.8). Положим, что в полосе Δf_1 содержится W локализованных полос шириной Δf_2 и контрастность интерферограммы, т.е. видность полос, равна единице. Вдоль интерференционных полос интенсивность шумового сигнала накапливается когерентно, а помехи – некогерентно. Строго говоря, эти положения не выполняются, однако с качественной и количественной стороны, как показывают данные компьютерного моделирования и натурных экспериментов [43, 45, 46, 48, 50, 52], результаты остаются вполне осмысленными.

Под отношением с/п q_0 на входе одиночного приемника в начальный момент времени $t = 0$ понимается величина

$$q_0 = q(0) = \frac{\overline{E_s(0)}}{\overline{E_n(0)}}, \quad (2.9)$$

где

$$\overline{E_s(0)} = 2 \int_0^\infty \overline{|s(0, f)|^2} df = 2\Delta f_1 \overline{|s(0, f'_s)|^2}, \quad (2.10)$$

$$\overline{E_n(0)} = 2 \int_0^\infty \overline{|n(0, f)|^2} df = 2\Delta f_1 \overline{|n(0, f'_n)|^2} \quad (2.11)$$

– средние энергии сигнала и помехи. Здесь f'_s и f'_n – выделенные частоты сигнала и помехи в полосе Δf_1 . Черта сверху означает усреднение по ансамблю реализаций. В соответствии с (2.10), (2.11) входное отношение с/п (2.9) равно

$$q_0 = \frac{\overline{|s(0, f'_s)|^2}}{\overline{|n(0, f'_n)|^2}}. \quad (2.12)$$

Величины в числителе и знаменателе (2.12) равны математическим ожиданиям интенсивности сигнала и помехи в начальный момент времени

$$M_s(0) = \overline{|s(0, f'_s)|^2}, \quad M_n(0) = \overline{|n(0, f'_n)|^2}. \quad (2.13)$$

Дисперсии сигнала и помехи в начальный момент есть [104]

$$D_s(0) = 2 \left[\overline{|s(0, f'_s)|^2} \right]^2, \quad D_n(0) = 2 \left[\overline{|n(0, f'_n)|^2} \right]^2. \quad (2.14)$$

Средние энергии сигнала и помехи на выходе траекторного накопления за время Δt можно записать в форме сложения энергий на временных интервалах длительностью δt_1 вдоль интерференционных полос

$$\overline{E_s}(\Delta t) = 2 \int_0^\infty \left[\sum_{j=1}^J W s(t_j, f) \right]^2 df, \quad (2.15)$$

$$\overline{E_n}(\Delta t) = 2WJ \sum_{j=1}^J \int_0^\infty \overline{|n(t_j, f)|^2} df. \quad (2.16)$$

Положим, что математические ожидания сигнала и помехи не зависят от момента отсчета t_j , т.е. $\overline{|s(t_j, f)|^2} = \overline{|s(f)|^2}$ и $\overline{|n(t_j, f)|^2} = \overline{|n(f)|^2}$. Тогда выражения (2.15), (2.16) принимают вид

$$\overline{E_s}(\Delta t) = 2W^2 J^2 \overline{|s(f''_s)|^2} \Delta f_2, \quad (2.17)$$

$$\overline{E_n}(\Delta t) = 2WJ \overline{|n(f''_n)|^2} \Delta f_2, \quad (2.18)$$

так что на выходе траекторного накопления отношение с/п равно

$$q(\Delta t) = \frac{\overline{E_s}(\Delta t)}{\overline{E_n}(\Delta t)} = WJ \frac{\overline{|s(f''_s)|^2}}{\overline{|n(f''_n)|^2}}. \quad (2.19)$$

Здесь f''_s и f''_n – выделенные частоты сигнала и помехи в полосе Δf_2 .

Используя входное отношение с/п (2.12), выражение (2.19) представим в форме

$$q(\Delta t) = JW \frac{\overline{|s(f''_s)|^2} \overline{|n(f'_n)|^2}}{\overline{|n(f''_n)|^2} \overline{|s(f'_s)|^2}} q_0. \quad (2.20)$$

В начальный момент времени средние энергии сигнала (2.10) и помехи (2.11) можно также выразить как

$$\overline{E_s}(0) = 2W^2 \overline{|s(f'_s)|^2} \Delta f_2, \quad (2.21)$$

$$\overline{E_n}(0) = 2W \overline{|n(f''_n)|^2} \Delta f_2, \quad (2.22)$$

Из сравнения выражений (2.4), (2.5) и (2.15), (2.16) находим

$$\overline{|s(f'_s)|^2} \Delta f_1 = W^2 \overline{|s(f''_s)|^2} \Delta f_2, \quad (2.23)$$

$$\overline{|n(f'_n)|^2} \Delta f_1 = W \overline{|n(f''_n)|^2} \Delta f_2 \quad (2.24)$$

и тогда выражение (2.14) принимает вид

$$q(\Delta t) = Jq_0, \quad (2.25)$$

так что на выходе траекторного накопления отношение с/п не зависит от числа интерференционных полос W и их ширины Δf_2 и с точностью до множителя J пропорционально входному отношению с/п q_0 . Согласно (2.17), (2.18) на выходе траекторного накопления математические ожидания и дисперсии интенсивности сигнала и помехи равны

$$M_s(\Delta t) = W^2 J^2 \overline{|s(f_s'')|^2}, \quad D_s(\Delta t) = 2W^4 J^4 \left[\overline{|s(f_s'')|^2} \right]^2, \quad (2.26)$$

$$M_n(\Delta t) = WJ \overline{|n(f_n'')|^2}, \quad D_n(\Delta t) = 2W^2 J^2 \left[\overline{|n(f_n'')|^2} \right]^2. \quad (2.27)$$

Таким образом, многократное когерентное сложение интерференционных максимумов волнового поля шумового источника вдоль локализованных полос увеличивает выходное отношение с/п $q(\Delta t)$ в J раз по отношению к входному значению q_0 . Такое увеличение становится совершенно понятным, если провести аналогию с когерентной пространственной обработкой многоэлементной антенны, содержащей J приемников: по отношению к одиночному приемнику отношение с/п возрастает в J раз.

Запись интерферограммы на голограмму и очищение области локализации спектральной плотности от помехи приводит к дополнительному увеличению выходного отношения с/п по сравнению с $q(\Delta t)$. Двумерное преобразование Фурье интерферограммы локализует двумерную спектральную плотность шумового сигнала в пределах узкой полосы голограммы, площадь которой можно оценить как

$$S_s = \frac{\tau_{M-1}}{\Delta t}. \quad (2.28)$$

Здесь τ_{M-1} – положение главного максимума $(M-1)$ -го фокального пятна на оси времени, обусловленного интерференцией между крайними модами (1.4). Вне этой полосы спектральная плотность практически подавлена. Спектральная плотность помехи распределена во всей области голограммы, площадь которой равна

$$S_n = |\nu_{M-1}| \tau_{M-1}, \quad (2.29)$$

где ν_{M-1} – положение главного максимума $(M-1)$ -го фокального пятна на оси частоты, обусловленного интерференцией между крайними модами. При интегральном преобразовании энергия не изменяется.

Полагая мощность помехи равномерно распределенной в области голограммы, отношение с/п на выходе голографической обработки можно представить как

$$q_{\text{вых}} = \gamma q(\Delta t), \quad \gamma = S_n / S_s, \quad (2.30)$$

где коэффициент концентрации, согласно (2.28), (2.29), $\gamma = |v_{M-1}|\Delta t$. Для источника, который не движется, v_{M-1} возможно заменить Δv в пространстве голограммы. Согласно (2.25) формула (2.30) преобразуется к виду

$$q_{\text{вых}} = J\gamma q_0. \quad (2.31)$$

В диапазоне сотен герц и источников движущихся со скоростями $w = 1-10$ м/с значение $|v_{M-1}| = 0.07-0.7$ Гц [43, 45, 46, 48, 50, 52]. Таким образом, предполагая, что временной интервал наблюдения $\Delta t = 100$ с, получаем $\gamma = 7-70$. Значение выходного отношения с/п (2.31) получена при условии, что траекторное накопление спектральной плотности выполняется вдоль интерференционных полос, при этом накопление для шумового сигнала осуществляется когерентно, а для помехи – не когерентно. Условие реализуется при выполнении неравенства $q_0 > 1.5/J^2$. Отличие в механизмах накопления спектральной интенсивности вдоль интерференционных полос и распределения на голограмме спектральной плотности шумового поля источника и помехи обуславливают высокое отношение с/п на выходе голографической обработки.

Критерий Неймана–Пирсона максимизирует вероятность правильного обнаружения p_1 (превышение некоторого порога на выходе обработки при наличии сигнала) при заданной вероятности ложной тревоги p_2 , т.е. превышения порога в отсутствие сигнала за счет одной только помехи [103].

Плотность вероятности $p_{sn,n}(x)$ случайной величины $I_{sn,n}(\Delta t)$ на выходе траекторного накопления спектральной плотности

$$I_{sn,n}(\Delta t) = \sum_{j=1}^J |s_j(t, \omega) + n_j(t, \omega)|^2 \quad (2.32)$$

имеет сложный вид, определяемый композицией обобщенных χ^2 -распределений и плотности вероятности, определяемой функцией Ганкеля нулевого порядка от мнимого аргумента [104]. Здесь нижние индексы «sn» и «n» относятся к случаям присутствия и отсутствия шумового сигнала соответственно. В соответствии с центральной предельной теоремой при большом числе слагаемых J плотность вероятности $p_{sn,n}(x)$ стремится к нормальному закону [104]. Величина $I_{sn,n}(\Delta t) \geq 0$, поэтому $p_{sn,n}(x) = 0$ при $x < 0$ и для плотности вероятности $p_{sn,n}(x)$, когда $J \gg 1$, получаем [104]

$$p_{sn,n}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{sn,n}(\Delta t)}} \left\{ \exp \left[-\frac{(x - M_{sn,n}(\Delta t))^2}{2D_{sn,n}(\Delta t)} \right] + \exp \left[-\frac{(x + M_{sn,n}(\Delta t))^2}{2D_{sn,n}(\Delta t)} \right] \right\}, \quad x \geq 0, \quad (2.33)$$

Здесь $M_{sn,n}(\Delta t)$ и $D_{sn,n}(\Delta t)$ – математическое ожидание и дисперсия случайной величины $I_{sn,n}$ для момента времени Δt . Согласно (2.26), (2.27), (2.32) имеем

$$M_{sn}(\Delta t) = W^2 J^2 \overline{|s(\omega_s'')|^2} + WJ \overline{|n(\omega_n'')|^2}, \quad (2.34)$$

$$D_{sn}(\Delta t) = 2 \left[W^2 J^2 \overline{|s(\omega_s'')|^2} + WJ \overline{|n(\omega_n'')|^2} \right]^2. \quad (2.35)$$

В отсутствие шумового сигнала математическое ожидание $M_n(\Delta t)$ и дисперсия $D_n(\Delta t)$ определяются выражениями (2.26), (2.27). Линейное двумерное преобразование Фурье сохраняет нормальную плотность вероятности, поэтому на голограмме плотность вероятности локализованной энергии будет иметь вид, аналогичный (2.33), но заменой выражений (2.34) и (2.35) соотношениями

$$M_{sn(\text{ВЫХ})} = \gamma W^2 J^2 \overline{|s(\omega_s'')|^2} + WJ \overline{|n(\omega_n'')|^2}, \quad (2.36)$$

$$D_{sn(\text{ВЫХ})} = 2 \left[\gamma W^2 J^2 \overline{|s(\omega_s'')|^2} + WJ \overline{|n(\omega_n'')|^2} \right]^2. \quad (2.37)$$

Вероятность ложной тревоги p_2 на выходе голографической обработки, как вероятность превышения помехой порогового уровня g , равна

$$p_2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_n(\Delta t)}} \int_g^\infty \left\{ \exp \left[-\frac{(x - M_n(\Delta t))^2}{2D_n(\Delta t)} \right] + \exp \left[-\frac{(x + M_n(\Delta t))^2}{2D_n(\Delta t)} \right] \right\} dx. \quad (2.38)$$

После несложных преобразований, учитывая взаимосвязь (2.26), (2.27) между величинами $M_n(\Delta t)$ и $D_n(\Delta t)$, выражение (2.38) приводится к виду

$$p_2 = 1 - 0.5[\Phi(\kappa_n - 0.5) + \Phi(\kappa_n + 0.5)], \quad (2.39)$$

где $\kappa_n = g/2M_n(\Delta t)$, $\Phi(x)$ – интеграл ошибок

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

Максимальное значение параметра κ_n можно оценить из условия, что вероятность ложной тревоги близка нулю, $p_2 \approx 0$. Тогда, согласно (2.39), получаем оценку $\kappa_{n(\text{max})} \approx 4$. Вероятность ложной тревоги однозначно определяется параметром κ_n . Математическое ожидание $M_n(\Delta t)$, согласно (2.11), (2.24), можно представить как

$$M_n(\Delta t) = \frac{1}{2\Delta f_2} J \overline{E_n(0)} = JM_n(0) \frac{\Delta f_1}{\Delta f_2}, \quad (2.40)$$

т.е. плотность энергии помехи на выходе тракторного накопления (для фиксированных мощности на входе и отсчетов) тем выше, чем больше отношение полос спектра сигнала и интерферограммы.

Вероятность правильного обнаружения p_1 на выходе голографической обработки

$$p_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{sn(\text{ВЫХ})}}} \int_g^{\infty} \left\{ \exp \left[-\frac{(x - M_{sn(\text{ВЫХ})})^2}{2D_{sn(\text{ВЫХ})}} \right] + \exp \left[-\frac{(x + M_{sn(\text{ВЫХ})})^2}{2D_{sn(\text{ВЫХ})}} \right] \right\} dx, \quad (2.41)$$

пользуясь соотношениями (2.19), (2.25), (2.31), (2.36), (2.37), можно представить в виде

$$p_1 = 1 - 0.5[\Phi(\eta_1) + \Phi(\eta_2)], \quad (2.42)$$

где

$$\eta_1 = \frac{2\kappa_n - 1 - q_{\text{ВЫХ}}}{2(1 + q_{\text{ВЫХ}})}, \quad (2.43)$$

$$\eta_2 = \frac{2\kappa_n + 1 + q_{\text{ВЫХ}}}{2(1 + q_{\text{ВЫХ}})}. \quad (2.44)$$

Вероятность правильного обнаружения однозначно определяется параметром κ_n и отношением с/п $q_{\text{ВЫХ}}$ (2.31) на выходе голографической обработки.

Выражения для вероятности ложной тревоги (2.39) и правильного обнаружения (2.42) справедливы, как отмечалось выше, для входных отношений с/п $q_0 > 1.5/J^2$, т.е. для выходных значений с/п $q_{\text{ВЫХ}} > 1.5\gamma/J$. По заданной вероятности ложной тревоги p_2 однозначно определяется пороговый уровень g , а зная его, вычисляется вероятность правильного обнаружения p_1 . Таким образом, можно рассчитать кривые обнаружения шумового сигнала, представляющие собой зависимость вероятности правильного обнаружения от выходного (или входного) отношения с/п при фиксированной вероятности ложной тревоги. Как видно, возможность обнаружения шумового сигнала при голографической обработке с заданными вероятностями p_1 и p_2 не зависят от формы сигнала и вида помехи, и определяется только плотностью энергии помехи $M_n(\Delta t)$, числом отсчетов J и коэффициентом концентрации γ .

На рис. 2.14 и 2.15 приведены кривые обнаружения шумового сигнала в зависимости от входного отношения с/п q_0 для коэффициента концентрации $\gamma = 7$ и $\gamma = 10$. Отсчетам $J = 10, 20$ соответствуют допустимые предельные входные отношения $q_{\text{lim}} = 1.5 \cdot 10^{-2}$, $3.75 \cdot 10^{-3}$ (рис. 2.14). Отсчетам $J = 15, 30$ соответствуют предельные входные отношения $q_{\text{lim}} = 6.67 \cdot 10^{-3}$, $1.67 \cdot 10^{-3}$ (рис. 2.15). С уменьшением вероятности ложной тревоги, как и следовало ожидать, при заданном входном отношении с/п, вероятность правильного обнаружения уменьшается. С увеличением отсчетов эффективность обнаружения сигнала возрастает.

Взаимосвязь критерия оценки дальности обнаружения (1.14) с вероятностью правильного обнаружения (2.41) состоит 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

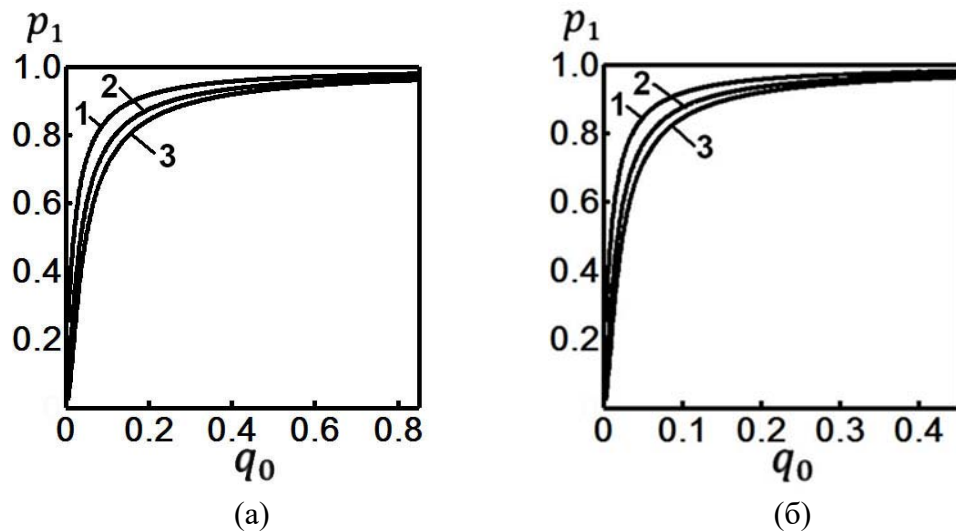


Рис. 2.14. Зависимость вероятности правильного обнаружения p_1 от входного отношения с/п q_0 для разных значений вероятности ложной тревоги p_2 : (а) $J = 10$; (б) $J = 20$. Кривая 1 – $p_2 = 10^{-1}$, кривая 2 – $p_2 = 10^{-2}$, кривая 3 – $p_2 = 10^{-3}$. Коэффициент концентрации $\gamma = 7$.

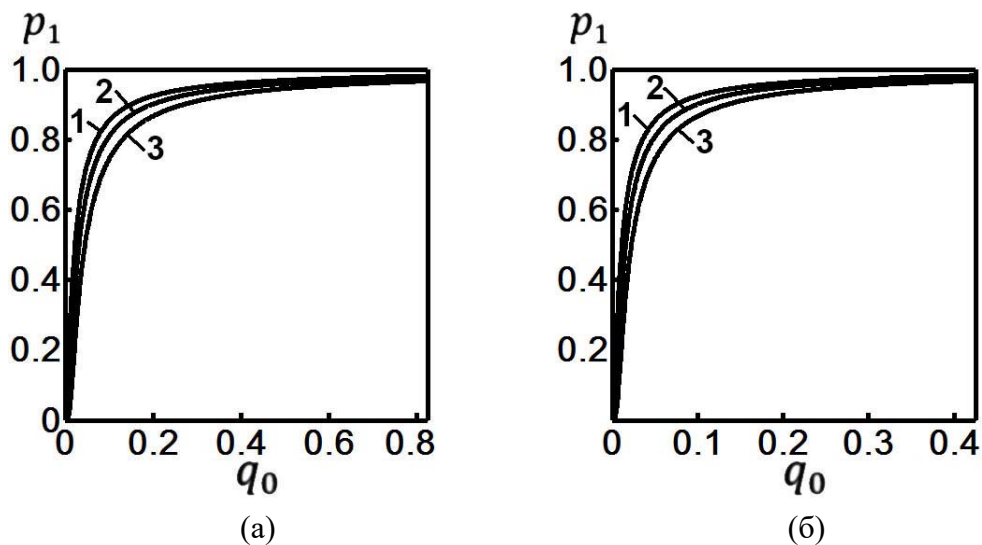


Рис. 2.15. Зависимость вероятности правильного обнаружения p_1 от входного отношения с/п q_0 для разных значений вероятности ложной тревоги p_2 : (а) $J = 15$; (б) $J = 30$. Кривая 1 – $p_2 = 10^{-3}$, кривая 2 – $p_2 = 10^{-6}$, кривая 3 – $p_2 = 10^{-9}$. Коэффициент концентрации $\gamma = 10$.

§ 2.5. Выводы

Представлены спектры шумоизлучения малогабаритного АНПА в частотном диапазоне от 50 до 1000 Гц, зарегистрированные в дальней зоне на расстоянии 200 м мелководной акватории Тихоокеанского побережья. Спектральные уровни звукового давления получены при различных режимах (включенные и выключенные движители) и скоростей движения аппарата. Спектральные характеристики в дальней зоне позволяют

получать реалистические оценки дальности обнаружения аппарата в широком диапазоне частот, и, как следствие, оценивать размер контролируемой зоны исследуемой акватории.

Проведена оценка максимального расстояния обнаружения $r_{\max}$ одиночным приемником для диапазона частот 900–950 Гц при скорости движения шумового источника 2 м/с. При этом использовались, результаты численного моделирования звукового поля в гидроакустическом волноводе и экспериментальные спектральные характеристики АНПА и фоновой помехи. Для числа временных интервалов $J = 15, 30$ величина $r_{\max} = 6, 9$ км. С увеличением числа временных интервалов, на которых реализуется квазикогерентное накопление спектральной плотности шумового сигнала, предельная дальность обнаружения возрастает. На предельных дальностях обнаружения расстояния регистрируются практически с такой же погрешностью, как и в отсутствие помехи.

Оценено отношение с/п на выходе голографической обработки поля шумового источника в океаническом волноводе с применением одиночного приемника. На основе критерия Неймана–Пирсона рассмотрено обнаружение сигнала шумового источника. Получены выражения для вероятностей ложной тревоги и правильного обнаружения. Приведены кривые обнаружения, представляющие собой зависимость вероятности правильного обнаружения от отношения с/п при фиксированной вероятности ложной тревоги для заданных параметров обработки.

ГЛАВА 3

ЭКСПЕРИМЕНТ В МЕЛКОВОДНОЙ АКВАТОРИИ С ИМИТАТОРОМ ШУМОВОГО ИСТОЧНИКА

§ 3.1. Краткое введение

В этой главе приведены результаты эксперимента, проведенного для определения местоположения шумового источника, который буксировался в акватории Ладожского озера. В эксперименте использовался одиночный векторно-скалярный приемник [105, 106]. При обработке использовался метод согласования с интерференционной картиной, создаваемой источником, которая непосредственно соответствует голографической обработке по основным принципам. Важные особенности проведенного эксперимента: высокая скорость источника, значительное отношение с/п, небольшие расстояния между источником и приемником, резкие изменения пеленга. Предложенная обработка позволила определить зависимости направления, скорости движения, расстояния и глубины источника от времени в отличие от традиционной обработки, согласованной средой [3–28].

В параграфе 3.2 приведено описание эксперимента. 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. В параграфе 3.4 дано качественное и количественное объяснение экспериментальным данным. В параграфе 3.5 приведены основные результаты.

§ 3.2. Описание эксперимента

Экспериментальный полигон находился в мелководной акватории. Глубина водного слоя $H \approx 87$ м. Скоростью звука в водном слое одинаковая по глубине $c \approx 1400$ м/с. В рамках голографической обработки использовались сигналы, зарегистрированные каналами ВСП. Глубина ВСП $z_q = 30$ м. На первом этапе в частотном диапазоне $\Delta f = 1 - 15$ кГц формировалась интерферограмма. Продолжительность шумовой реализации принимаемого сигнала $\delta t_1 = 0.2$ с. Величина отношения с/п на входе каналов ВСП $q_0 \approx 9$ дБ. Калибровочные данные о гидроакустических параметрах волновода отсутствовала.

На рис. 3.1. представлена геометрия проведенного эксперимента, которая соответствует моменту движения источника в зоне траверса относительно ВСП. На рис. 3.1. показаны оси x и y ВСП Q . Оси совпадают с положительными направлениями используемой системы координат. Изначально источник двигался к ВСП из начальной точки А. Затем

источник проходил зону траверса по отношению к ВСП (точка В). После зоны траверса источник удалялся от ВСП, двигаясь к точке С. В конечный участок траектории движения источника представлял собой петлеобразные кривые. Расстояние между источником и приемником обозначено r . Дополнительная корректировочная компонента пеленга $\phi - \theta$, $\theta = 90^\circ - \phi$.

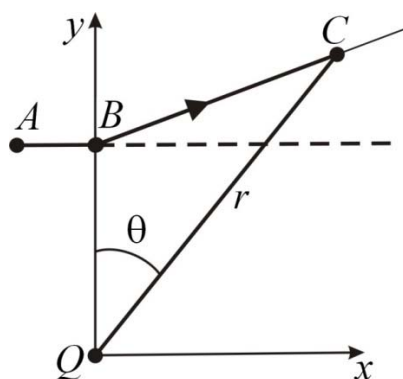


Рис. 3.1. Геометрия задачи (вид сверху).

§ 3.3. Экспериментальные результаты

Интерферограмма $I_e(f, t) = P(f, t)P^*(f, t)$ сформированная на основе экспериментальной записи скалярной компоненты (давление P) поля источника представлена на рис. 3.2. Здесь верхний индекс звездочка «*» обозначает комплексно-сопряженную величину. Из сформированного распределения интерферограммы удалено среднее значение. Это позволило улучшить ее контрастность и повысить информативность графика.

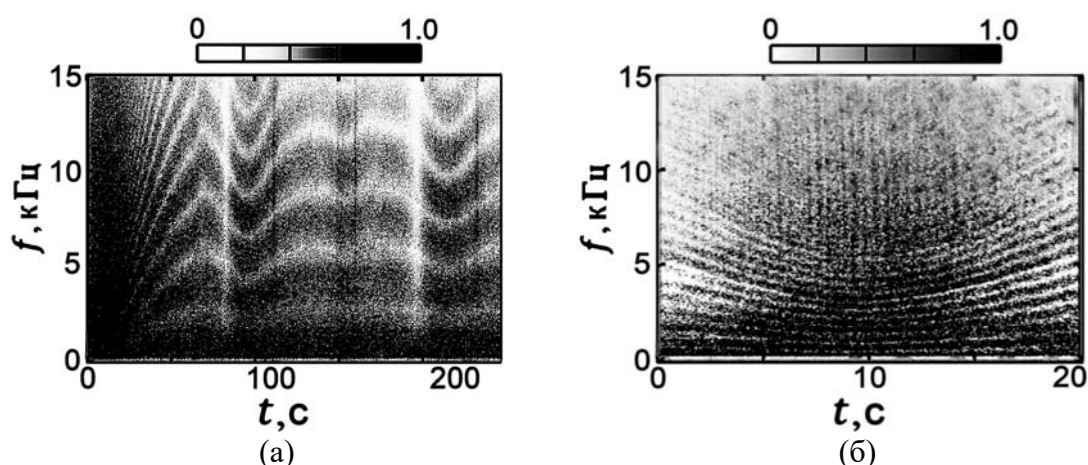


Рис. 3.2. Экспериментальная нормированная интерферограмма (а) и ее фрагмент в области траверса (б).

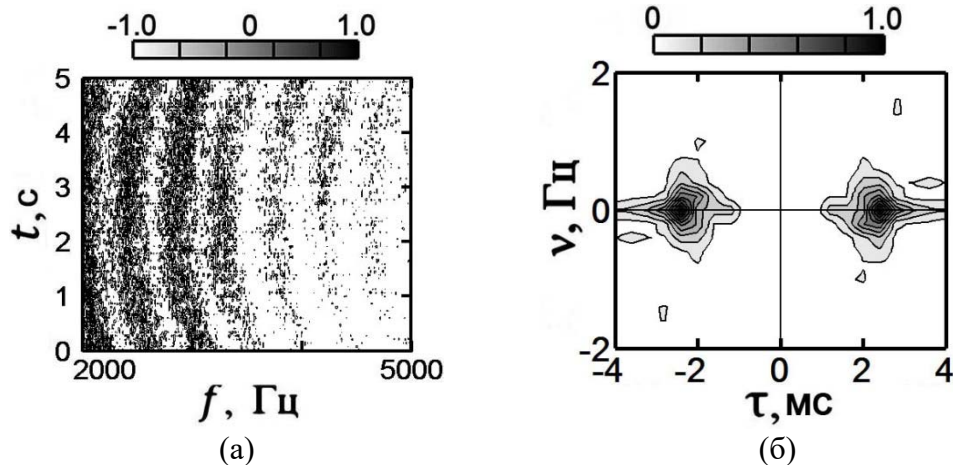
В момент времени $t = 10$ с, который соответствует точке В (траверс по отношению ВСП), квазипериод интерферограммы по частоте равен $\Lambda = 404$ Гц. При удалении от точки

В квазипериод интерферограммы по частоте увеличивается. Это в свою очередь приводит к расширению интерференционных полос в структуре интерферограммы. Как видно из представленного рисунка частотный квазипериод и ширина полосы практически не зависят от частотного диапазона. Временной квазипериод интерферограммы D уменьшается с ростом частоты. При этом D растет с ростом времени наблюдения (т.е. с увеличением расстояния). Например, на частоте $f = 3.5$ кГц в точке В (зона траверса) $D = 2.9$ с. Следует отметить, что крутизна интерференционных линий максимальная в зоне траверса. По мере удаления от точки В крутизна интерференционных линий уменьшается, при этом она возрастает со временем и частотой. Отмеченные особенности интерференционной структуры характерны для времени наблюдения $t' \sim 70$ с после удаления от точки В. Далее для диапазона времен наблюдений $t > t'$ экспериментальная интерферограмма приобретает осциллирующий характер. Он обусловлен петлеобразными траекториями движения источника (см. рис. 3.8).

Голограммы

$$F_i(\nu, \tau) = \int_{t_i - \frac{\Delta t}{2}}^{t_i + \frac{\Delta t}{2}} \int_{f_0 - \frac{\Delta f}{2}}^{f_0 + \frac{\Delta f}{2}} I(f, t) \exp[i2\pi(\nu t - f\tau)] dt df, \quad (3.1)$$

получаемые на основе двумерного преобразования Фурье интерферограммы $I(\omega, t)$ скалярной компоненты поля для двух моментов времени $t_i = 10, 50$ с представлены на рис. 3.3. Голограммы и интерферограммы различных компонент векторно-скалярного поля и их комбинаций когерентны и различаются помехоустойчивостью [48].



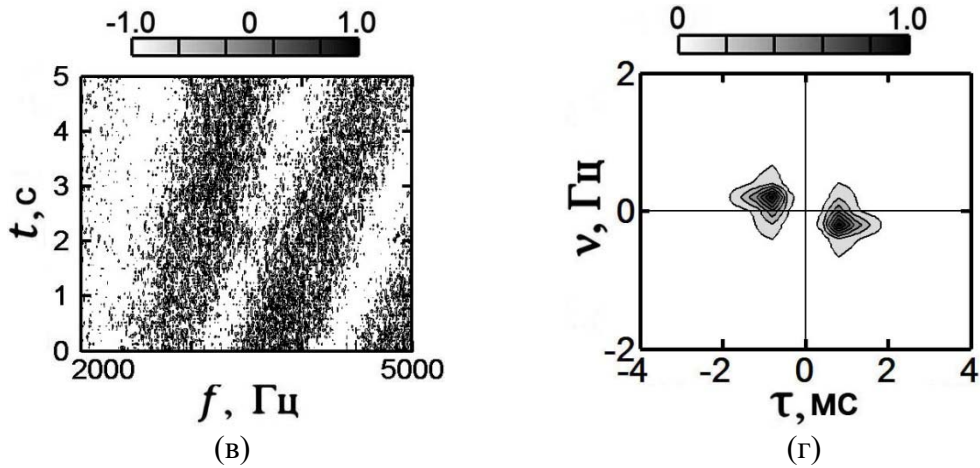


Рис. 3.3. Нормированные интерферограмма и голограмма в различные моменты времени t_i : (а) $t_i = 10$; (б) $t_i = 50$ с.

По своей структуре голограмма источника сформирована в форме двух фокальных пятен. Фокальные пятна расположены зеркально по отношению к началу координат. Количество фокальных пятен голограммы зависит от числа лучей, которые формируют интерферограмму. При этом каждое отдельное фокальное пятно голограммы есть результат интерференции пары лучей. На экспериментальной интерферограмме на протяжении всего времени наблюдения присутствует один ярко выраженный максимум. Из этого можно сделать вывод, что интерферограмма в ходе всего эксперимента формировалась только двумя энергонесущими лучами. Это прямой луч и луч, отраженный от свободной поверхности волновода, $z = 0$. Оценки координат фокальных пятен голограммы следующие: $\tau = 2.4$ мс, $v = 0$ Гц – для $t_i = 10$ с; $\tau = 0.9$ мс, $v = -0.2$ Гц – для $t_i = 50$ с. Согласно рис. 3.2 указанным моментам времени соответствуют частотные квазипериоды $\Lambda = 404$ Гц; $\Lambda = 2.5$ кГц.

Оценка пеленга источника определялась в рамках голографического метода на основе сигналов, зарегистрированных каналами одиночного ВСП (1.15):

$$\operatorname{tg} \phi(t_i) = \frac{G_Y(t_i)}{G_X(t_i)} \quad (3.2)$$

Расчеты проводились для моментов времени t_i . Очищение интерферограммы от шума в области голограммы не использовалось, поскольку уровень полезного сигнала значительно превышал уровень помехи. Зависимость пеленга $\theta(t)$ от времени представлена на рис. 3.4. Результаты моделирования соответствуют пунктирной линии, экспериментальные результаты показаны сплошной линией. Модельная зависимость получена в предположении, что источник движется вдоль прямой, параллельной оси x (пунктирная линия на рис. 3.1).

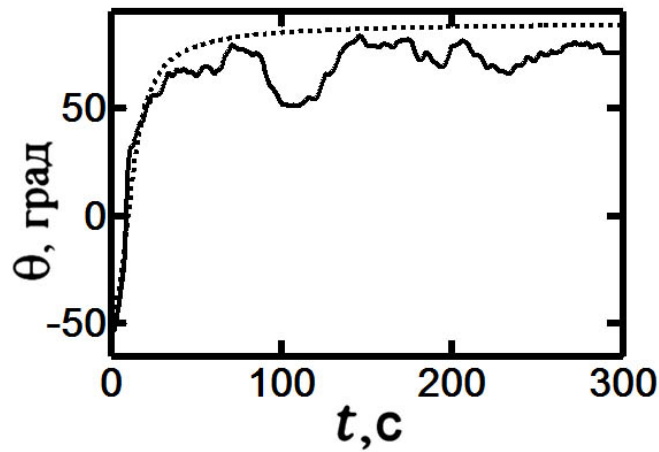


Рис. 3.4. Зависимость пеленга $\theta(t)$ от времени: результаты моделирования – пунктирная линия, экспериментальные результаты – сплошная линия.

Наблюдаемые мелкомасштабные вариации экспериментальной кривой вызваны вертикальными колебаниями ВСП. Крупномасштабные вариации сформированы движением источника по петлеобразным траекториям (рис. 3.8). Следует отметить, что для оценки пеленга движущегося источника в рамках голографического метода априорное знание параметров гидроакустического волновода не требуется.

Оценка параметров движущегося источника (расстояние r , глубина z и скорость w) проводилась в рамках согласования модельной и экспериментальной интерферограммы. При этом вычислялась трехмерной взаимокорреляционной функции экспериментальной I_e и модельной I_m интерферограмм. Параметры источника оценивались по положению главного максимума корреляционной функции.

$$E(r_*, z_*, w_*) = \sum_k \sum_i I_e(f_k, t_i) I_m^*(f_k, t_i), \quad (3.3)$$

Оценочные значения определялись из условия: $E(r, z, w) = \max E(r_*, z_*, w_*)$. Здесь нижним индексом звездочка (*) обозначены варьируемые величины. В рамках согласования экспериментальной I_e и модельной I_m интерферограмм предполагалось, что $1 \text{ м} \leq z \leq 70 \text{ м}$, $50 \text{ м} \leq r \leq 3 \text{ км}$, $2 \text{ м/с} \leq w \leq 35 \text{ м/с}$. Вариация параметров осуществлялась с шагом дискретизации: для скорости – $\delta w = 1 \text{ м/с}$, для глубины – $\delta z = 0.5 \text{ м}$, для расстояния – $\delta r = 25 \text{ м}$. Дискретизация по времени $\delta t = 2 \text{ с}$. Дискретизация по частоте $\delta f = 0.5 \text{ Гц}$. Для согласования использовались фрагменты интерферограмм в прямоугольной области $\Delta t = 20 \text{ с}$, $\Delta f = 1 - 15 \text{ кГц}$.

Отметим, что ранее в килогерцовом диапазоне на стационарной трассе с применением многоэлементных приемных антенн и традиционной согласованной со средой обработкой, экспериментально продемонстрировано восстановление глубины широкополосного излучателя и расстояния от антенны [107–109].

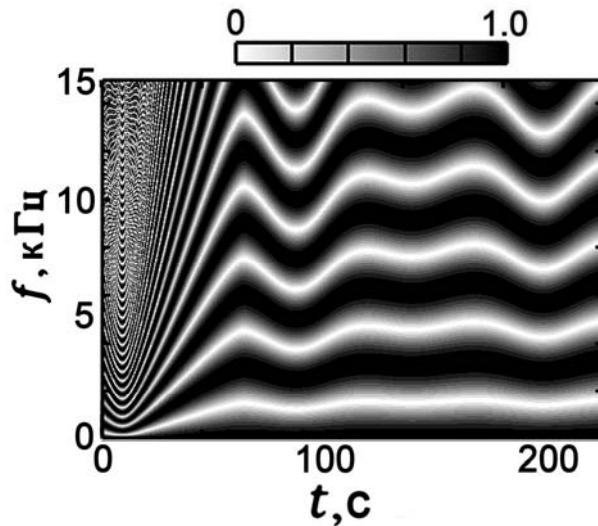


Рис. 3.5. Нормированная модельная интерферограмма.

В рамках согласования экспериментально и модельной интерферограмм применялось каскадное определение взаимокорреляционной функции. Для $t_0 = 0$ взаимокорреляционная функция рассчитывалась во временном промежутке $\Delta t = 20$ с. Последующие вычисления проводились обработка в течение времени Δt для $t_1 = t_0 + \delta t'$, $\delta t' = 5$ с, и т.д. Таким образом за время наблюдения в эксперименте $T = 275$ с проведен расчет $N = [(T - \Delta t)/\delta t'] + 1 = 52$ значений для каждого из параметров источника. Представленная на рис. 3.5 теоретическая интерферограмма $I_m(f, t)$, согласуется по основным свойствам с экспериментальной интерферограммой. Интерферограмма $I_m(f, t)$ получена в рамках двух лучевой модели звукового поля. Интерферограмма $I_m(f, t)$ рассчитывалась в предположении прямолинейного движения источника на протяжении временного интервала $\Delta t = 20$ с.

Двумерные разрезы нормированной трехмерной взаимокорреляционной функции (3.3) для двух моментов времени изображены на рис. 3.6. Анализ данных моделирования показал, что обратная задача имеет однозначное решение при ограничении на скорость источника. Из рис. 3.6 следует, что параметры источника оцениваются как $r = 189$ м, $z = 10.9$ м, $w = 27.6$ м/с – $t_i = 10$ с; $r = 1049$ м, $z = 12.8$ м, $w = 26.9$ м/с – $t_i = 50$ с. За время эксперимента $T = 0 - 275$ с аналогичным образом были обработаны интерферограммы для других временных интервалов и с шагом дискретизации $\delta t' = 5$ с восстановлены временные зависимости параметров источника $z(t)$, $r(t)$, $w(t)$.

На рис. 3.7 показана временная зависимость глубины $z(t)$. Как видно, во время эксперимента глубина источника изменялась в пределах ≈ 1.5 м и в среднем оценивается как $z = 11.4$ м. Осцилляции глубины приходятся на петлеобразные траектории.

Восстановленные зависимости $\theta(t)$ и $r(t)$ позволяют восстановить зависимости от времени координат

$$X(t) = r(t)\sin\theta(t), \quad Y(t) = r(t)\cos\theta(t) \quad (3.4)$$

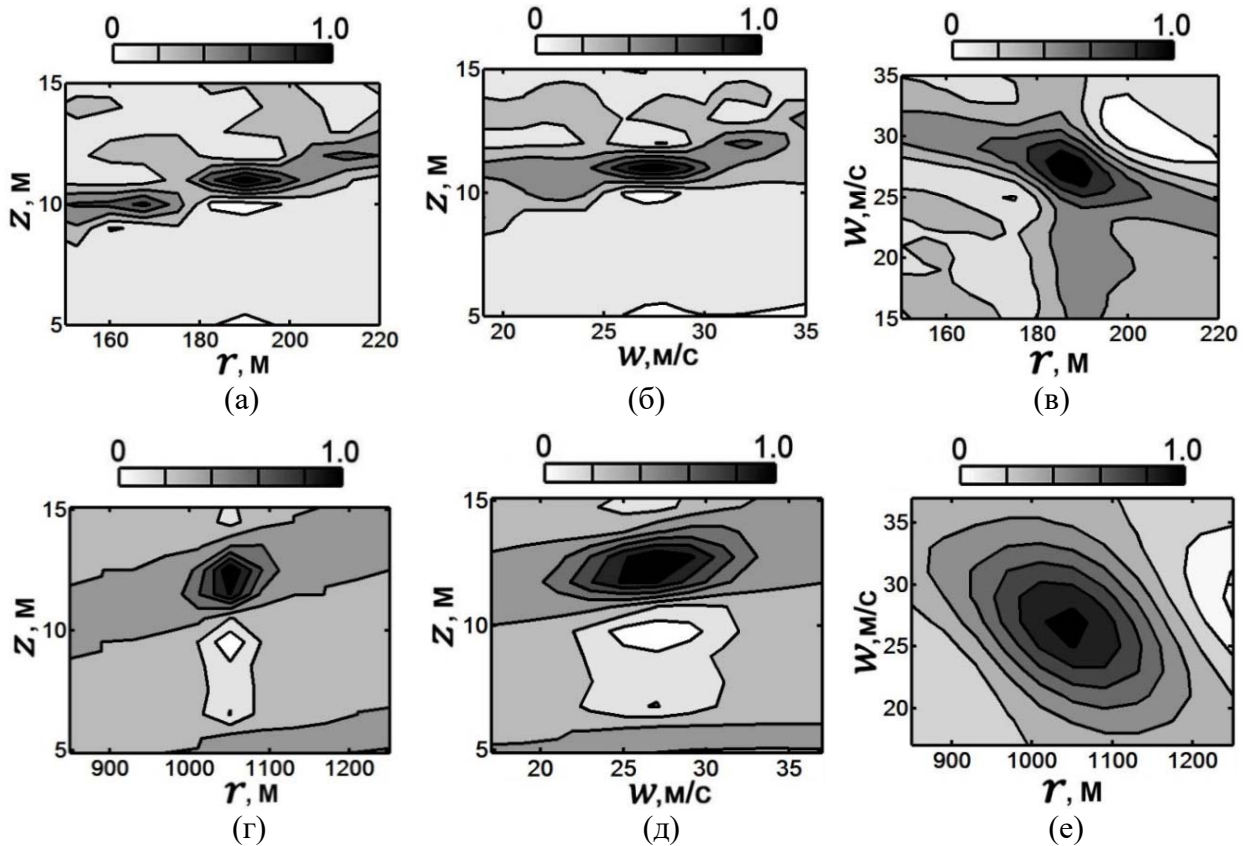


Рис. 3.6. Двумерные коэффициенты корреляции экспериментальной и модельной интерферограмм для двух моментов времени t_i . Глубина–расстояние (а, г) – $t_i = 10, 50$ с. Глубина–скорость (б, д) – $t_i = 10, 50$ с. Скорость– расстояние (в, е) – $t_i = 10, 50$ с.

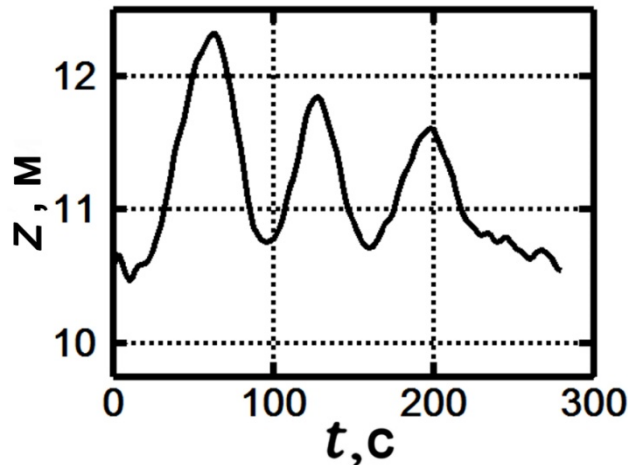


Рис. 3.7. Восстановленная зависимость от времени глубины z источника.

На основе рассчитанных временных зависимостей координат определяются линия движения источника $Y(X)$. Восстановленная траектория представлена на рис. 3.8. Как видно из полученного результата, зона траверса расположена на расстоянии $r = 188$ м от ВСП. Полученная величина согласуется с оценкой, определенной на основе результата на рис. 3.6. Как следует из рис. 3.8. после момента времени $t' \approx 70$ источник совершал петлеобразные движения. Для оценки временной зависимости скорости движения источника w использовалось соотношение:

$$w(\Delta t) = \frac{\sqrt{X^2(\Delta t) + Y^2(\Delta t)}}{\Delta t}. \quad (3.5)$$

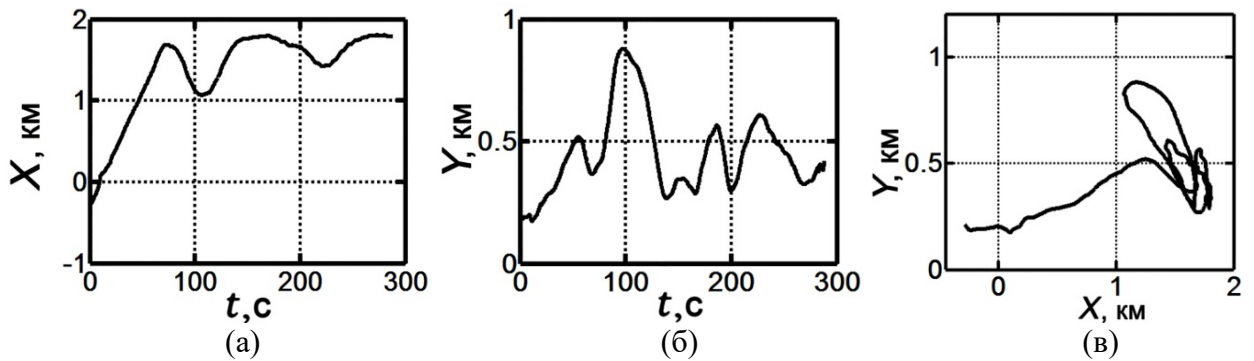


Рис. 3.8. Восстановленные зависимости координат источника: (а) $X(t)$; (б) $Y(t)$; (в) $Y(X)$.

Восстановленная зависимость $w(t)$ представлена на рис. 3.9. На восстановленной зависимости $w(t)$ присутствуют две существенно различные области. В первой области $0 \leq t \leq 58$ с движение источника происходит прямолинейно и практически равномерно $w = 27.4$ м/с (см. рис. 3.8). Далее ($58 < t < 275$ с) источник совершает петлеобразные движения. Зависимость скорость в этой области содержит значительные вариации. При этом меньшей петле соответствует меньшая скорость.

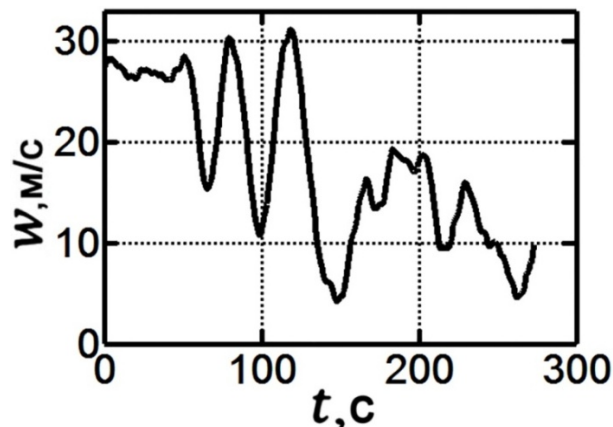


Рис. 3.9. Восстановленная зависимость от времени скорости источника $w(t)$.

§ 3.4. Интерпретация результатов эксперимента

Цель данного теоретического анализа заключалась в изучении связи между структурой интерферограммы (т.е. положениями фокальных пятен голограммы) и параметрами движущегося источника. Пусть источник удаляется от точки траверса B по прямолинейной траектории. Будем считать, что она параллельна оси x . Источник движется постоянной скоростью w и не изменяет глубину погружения z (см. рисунок 3.1). Предположим, что коэффициент отражения от свободной поверхности равен -1 и не зависит от частоты и угла падения.

Пусть источник начинает свое движение из точки траверса в направлении удаления от приемника, тогда двухлучевая интерферограмма принимает вид [93]

$$I_t(t) = \frac{2B^2}{\bar{R}^2(t)} \cos \Phi(f, t), \quad (3.6)$$

где

$$\Phi(f, t) = \eta \frac{f}{r(t)}. \quad (3.7)$$

Здесь $\eta = 2z_q z / c$, c – скорость звука, z_q – глубина приемника; $r(t) = \sqrt{r_0^2 + (wt)^2}$ – горизонтальное расстояние от приемника до источника в момент времени t , r_0 – расстояние в начальный момент времени $t = 0$ от точки траверса до приемника; $\bar{R}(t) = \sqrt{r^2(t) + z_q^2}$; B^2 – коэффициент, характеризующий мощность излучения. Будем полагать, что глубина источника $z = 11$ м. В результате $\eta = 0.47$ м·с.

Линия, формируемая интерференционными максимумами интерферограммы, удовлетворяет уравнению:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial f} df + \frac{\partial \Phi}{\partial t} dt = 0, \quad (3.8)$$

С учетом (3.7), получим для производной по времени линии постоянной фазы следующее выражение

$$\frac{df}{dt} = \frac{fw^2t}{r^2(t)}. \quad (3.9)$$

Как видно из (3.9) наклон интерференционных линий в зоне траверса увеличивается с течением времени, с увеличением частоты и скорости. При удалении от зоны траверса наклон интерференционных линий уменьшается. Данный вывод подтверждается экспериментом. Решение задачи Коши с дифференциальным уравнением (3.9) и условием $f(0) = f_0$ имеет вид:

$$f(t) = \frac{f_0}{r_0} r(t). \quad (3.10)$$

Из (3.7) следует, что частотный квазипериод интерферограммы равен

$$\Lambda_f(t) = \frac{r(t)}{\eta}, \quad (3.11)$$

Частотный квазипериод растет с ростом скорости и расстояния источника. При этом он не зависит от частоты и понижается с ростом глубины. Сделанные выводы подтверждаются результатами эксперимента. Из (3.11) следует $\Lambda_f(0) = 402$ Гц для зоны траверса ($r_0 = 189$ м). Экспериментальный результат $\Lambda_f = 404$ Гц. Будем полагать, что в пределах ширины интерференционной полосы фаза (3.7) меняется на $\pi/2$. Тогда величина ширины полосы

$\Delta f(t) = \Lambda_f(t)/4$. Разность времен прихода отраженного и прямого луча представляет собой величину обратную частотному квазипериоду $\Delta\tau = 1/\Lambda_f$.

Найдем временной квазипериод D интерферограммы используя следующее условие

$$\frac{1}{r(t)} - \frac{1}{r(t+D)} = \frac{1}{\eta f}. \quad (3.12)$$

Рассмотрим следующие предельные случаи для этого уравнения.

1. Случай $r_0^2 \gg (wt)^2$ (зона траверса). Из (3.12) следует,

$$D = -t + \sqrt{t^2 + a}, \quad (3.13)$$

Параметр $a = 2r_0^3/\eta fw^2$. Для менее жесткого условия $r_0^2 \geq 3(wt)^2$ ($t \leq 4$ с) получаем

$$D(0) = \sqrt{2} \frac{r_0 \sqrt{r_0}}{\sqrt{\eta fw}}. \quad (3.14)$$

Для частоты $f = 3.5$ кГц и значений параметров источника ($r_0 = 189$ м, $\eta = 0.47$ м·с, $w = 27.4$ м/с), полученных в рамках согласования интерферограмм, значение $D(0) = 3.3$ с. Это согласуется с экспериментальным результатом $D = 2.9$ с.

2. Случай $r_0^2 \ll (wt)^2$ (расстояние больше траверсного). Из (3.12) следует,

$$D(t) = \frac{bt^2}{1 - bt}, \quad (3.15)$$

Параметр $b = w/\eta f$. Величина bt увеличивается с течением времени. В момент времени $t_{cr} = 1/b$ квазипериод для временной зависимости устремляется к бесконечности. В свою очередь это приводит к горизонтальной локализации линий интерферограммы. Расстояние между до источника $r_{cr} = \eta f$ соответствует предельному моменту времени t_{cr} . Значениям величин $f = 3.5$ кГц, $\eta = 0.47$ м·с, соответствуют: $r_{cr} = 1645$ км и $t_{cr} = 60$ с. Описанный феномен присутствует как на модельной интерферограмме (рис. 3.5), так и на экспериментальной интерферограмме (рис. 3.2а).

Критерием проявления интерференционных структур является следующее требование. Используемый частотный диапазон Δf должен в несколько раз превосходить интерференционный квазипериод интерферограммы по частоте $\Lambda(t)$ (3.11). Из этого, следует условие наблюдаемости интерферограммы

$$\Delta f \geq 2 \frac{r(t)}{\eta}, \quad (3.16)$$

Данное условие согласуется с требованием, что в используемом частотном диапазоне проявляется одна и более интерференционных линий. Этим определяет предельное расстояние до источника. Максимальное расстояние до источника, соответствующее условию (3.16), определяется равенством:

$$r_{\max}(t) = \frac{1}{2} \Delta f \eta, \quad (3.17)$$

Таким образом, с расширением частотного диапазона и с увеличением глубины источника предельное расстояние увеличивается. Значение максимального расстояния для экспериментальных условий $r_{\max} = 3.29$ км.

Положение фокального пятна голограммы (3.1) в зоне траверса определяется соотношениями $\tau = \eta/r_0$, $v = 0$. Для оценочных параметров $\eta = 0.47$ м·с, $r_0 = 189$ м приходим к значению $\tau = 2.5$ мс. Данный результат соответствует экспериментальному значению $\tau = 2.4$ мс.

Из результатов проведенного анализа следует, что теоретическая интерферограмма по основным параметрам хорошо согласуется с экспериментальной интерферограммой до участка траектории с петлеобразными движениями источника.

§ 3.5. Выводы

Разработан высокочастотный интерферометрический метод локализации шумовых источников. В рамках данного метода обрабатываются сигналы одиночного ВСП. Этот метод базируется на частотно-временной обработке, согласованной с интерферограммой, которая формируется источником, движущимся в волноводе. Модельная интерферограмма для согласования рассчитывается в рамках двухлучевой модели звукового поля. Разработанный метод был верифицирован на данных натурного эксперимента. В результате обработки экспериментальных данных были восстановлены зависимости от времени направления, расстояния, скорости движения и глубины источника.

Применение двухлучевой модели интерферограммы обладает важным преимуществом. Она не требует предварительного знания о среде распространения. В результате такая согласованная обработка оказалась эффективной. Она позволила правильно определить зависимости от времени параметров шумового источника. С другой стороны, структура фокальных пятен голограммы предоставляет информацию о количестве лучей, которые формируют поле в точке наблюдения. При удалении источника от приемника количество лучей может увеличиваться. Это ведет к усложнению интерференционной картины волнового поля. Однако, если в области голограммы можно выделять отдельные фокальные пятна на голограмме и выполнять обратное двукратное преобразование Фурье относительно них. Такая возможность позволяет редуцировать обработку к двухлучевой интерферограмме, которая остается устойчивой к вариациям условий распространения.

ГЛАВА 4

ЭКСПЕРИМЕНТ В МЕЛКОВОДНОЙ АКВАТОРИИ С АНПА

§ 4.1. Краткое введение

В данной главе представлены результаты голографической обработки высокочастотного эксперимента по идентификации движущегося малогабаритного АНПА, который проводился в мелководной акватории Черноморского побережья [68]. Прием шумоизлучения подводного аппарата осуществлялся тремя одиночными ВСП, расположенными на дне. Для различных моментов времени представлены интерферограммы и голограммы, обусловленные движением АНПА относительно расположения приемников. С применением голографической обработки зарегистрированы временные зависимости функции обнаружения и пеленга подводного аппарата на фоне интенсивного судоходства в акватории проведения эксперимента. Оценены отношения с/п.

В параграфе 4.2 приведено описание эксперимента. В параграфе 4.3 представлены результаты эксперимента. В параграфе 4.4 изложены основные результаты.

§ 4.2. 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 в [94]. Скорость подводного аппарата $w = 1.5$ м/с, глубина погружения $z = 4$ м. Были выполнены два пуска подводного аппарата (рис. 4.1). 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.

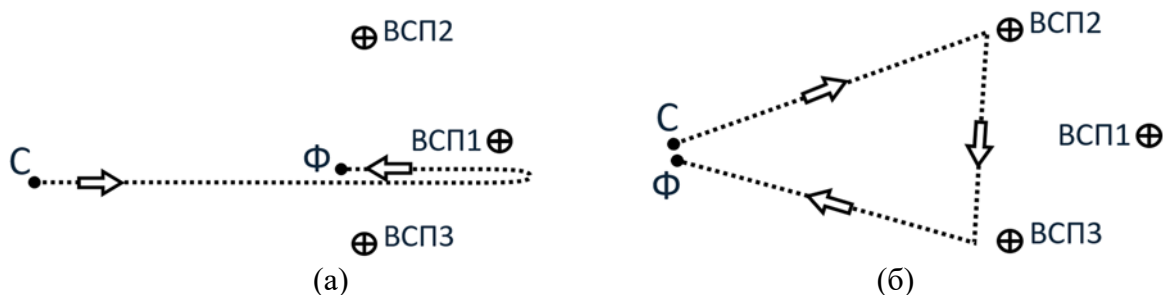


Рис. 4.1. Схема движения АНПА (пунктир) относительно расположения ВСП: (а) первый пуск; (б) второй пуск. С – точка старта, Ф – точка финиша.

Эксперимент проводился в конце октября 2021 г. Первый пуск: прямой галс – начало 14:13, окончание 14:23:30; обратный галс – начало 14:24, окончание 14:31. Продолжительность первого пуска $T_1 = 18$ мин. Второй пуск: начало 15:18:35, окончание 15:39:40. Продолжительность второго пуска $T_2 = 21$ мин 05 с.

ВСП включали в себя скалярный канал звукового давления P и три канала компонент $V_{x,y,z}$ вектора колебательной скорости частиц среды, где $V_{x,y}$ и V_z – горизонтальные и вертикальная компоненты колебательной скорости соответственно. 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. При спектральном анализе использовалось окно Хеннинга. 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. Количество реализаций $J = 30$. Алгоритм (1.1), (1.5), (1.13)–(1.15) циклически реализовывался следующих моментов времени смещенных относительно предшествующего на $\delta t = 60$ с. При этом использовались временные интервалы той же длительности. За время первого и второго пусков АНПА было сформировано $N_{1,2} = T_{1,2}/\Delta t$ временных интервалов, $N_{1,2} = 17, 21$, которые позволили наблюдать динамику поведения интерферограмм, голограмм, функций обнаружения и пеленгов.

§ 4.3. Обнаружение и восстановление пеленга АНПА

По изменениям угла наклона интерференционных полос, конфигурации спектральной плотности на голограммах и положения пиков функции обнаружения в различные моменты времени удастся проследить динамику движения АНПА относительно расположения ВСП. При приближении подводного аппарата к ВСП интерференционные полосы имеют отрицательные угловые коэффициенты, $\delta f/\delta t < 0$, фокальные пятна расположены в первом и третьем квадрантах голограммы, координаты пика функции обнаружения расположены в области положительных значений, $\varepsilon > 0$. При удалении подводного аппарата от ВСП угловые коэффициенты интерференционных полос положительные, $\delta f/\delta t > 0$, фокальные пятна расположены во втором и в четвертом квадрантах голограммы, координаты пика функции обнаружения расположены в области отрицательных значений, $\varepsilon < 0$. Если подводный аппарат неподвижен или его радиальная скорость равна нулю, $w = 0$, то фокальные пятна голограммы расположены на оси времени τ и $\delta f/\delta t = \varepsilon = 0$. При развороте подводного аппарата в окрестности ВСП интерференционные полосы искривляются и меняют знак углового коэффициента.

В точке старта С во время первого пуска подводного аппарата входные отношения с/п q_0 для каналов звукового давления ВСП равны: $q_0 = -8.8$ дБ (ВСП1), $q_0 = -10.9$ дБ (ВСП2), $q_0 = -11.1$ дБ (ВСП3). Во время второго пуска подводного аппарата – $q_0 = -5.2$ дБ (ВСП1), $q_0 = -8.3$ дБ (ВСП2), $q_0 = -8.4$ дБ (ВСП3).

С целью повышения контрастности и информативности на интерферограммах вырезаны средние значения. На голограммах вдоль осей времени и частоты вырезаны узкие полосы спектральной плотности. Это выполнено для того, чтобы отфильтровать: а) фокальные пятна, отвечающие неподвижным надводным источникам в районе интенсивного судоходства (ось времени) и б) спектральную плотность, обусловленную поверхностным волнением (ось частоты). Обработка выполнялась по всем четырем каналам трех ВСП. В диссертации представлена часть полученных результатов.

4.3.1. Первый пуск

Для некоторых характерных моментов времени результаты обработки по каналу звукового давления ВСП1 приведены на рис. 4.2–4.8.

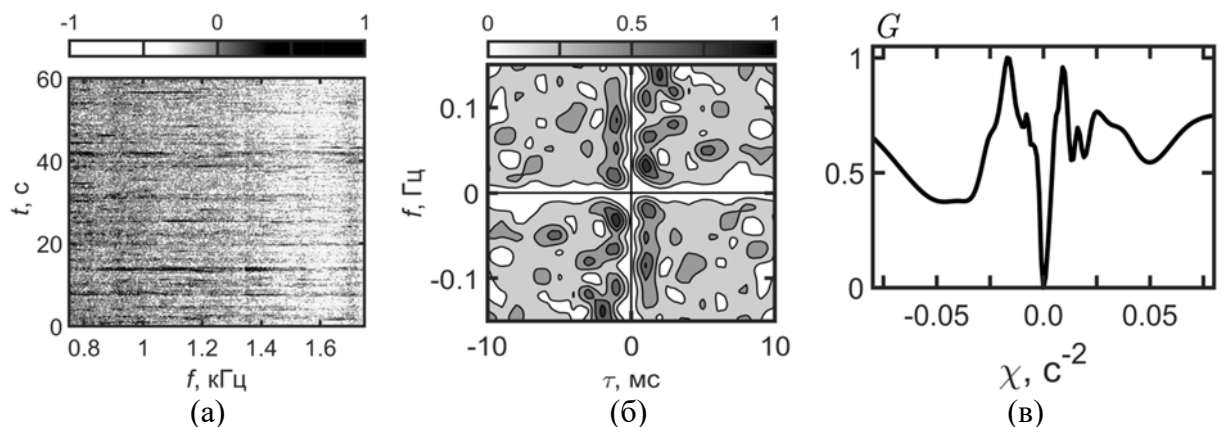


Рис. 4.2. Нормированные интерферограмма (а), модуль голограммы (б), функция обнаружения (в). Время 14:15. Две минуты после начала эксперимента.

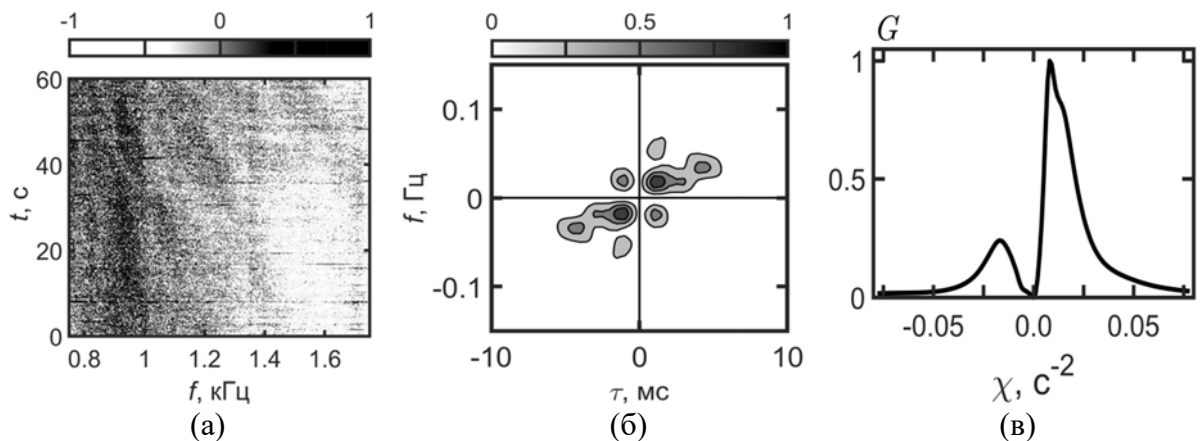


Рис. 4.3. Нормированные интерферограмма (а), модуль голограммы (б), функция обнаружения (в). Время 14:17. Приближение АНПА к ВСП1. Прямой галс.

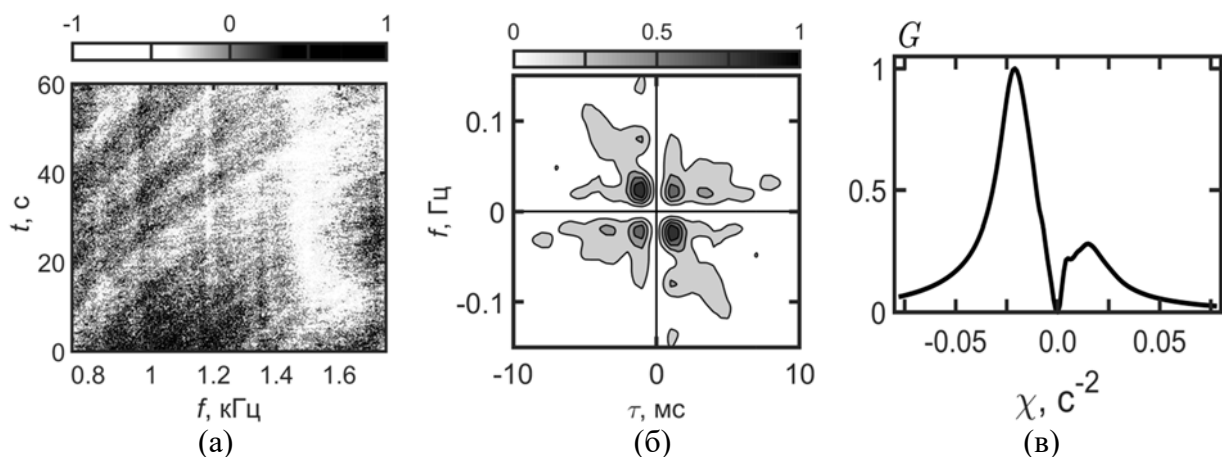


Рис. 4.4. Нормированные интерферограмма (а), модуль голограммы (б), функция обнаружения (в). Время 14:21. Область траверса, удаление АНПА от ВСП1. Прямой галс.

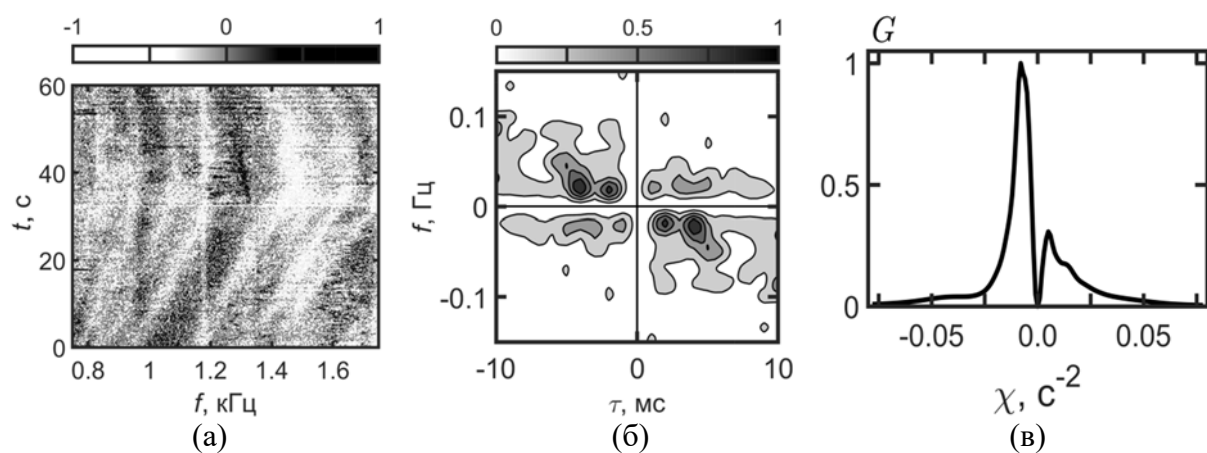


Рис. 4.5. Нормированные интерферограмма (а), модуль голограммы (б), функция обнаружения (в). Время 14:23. Разворот АНПА.

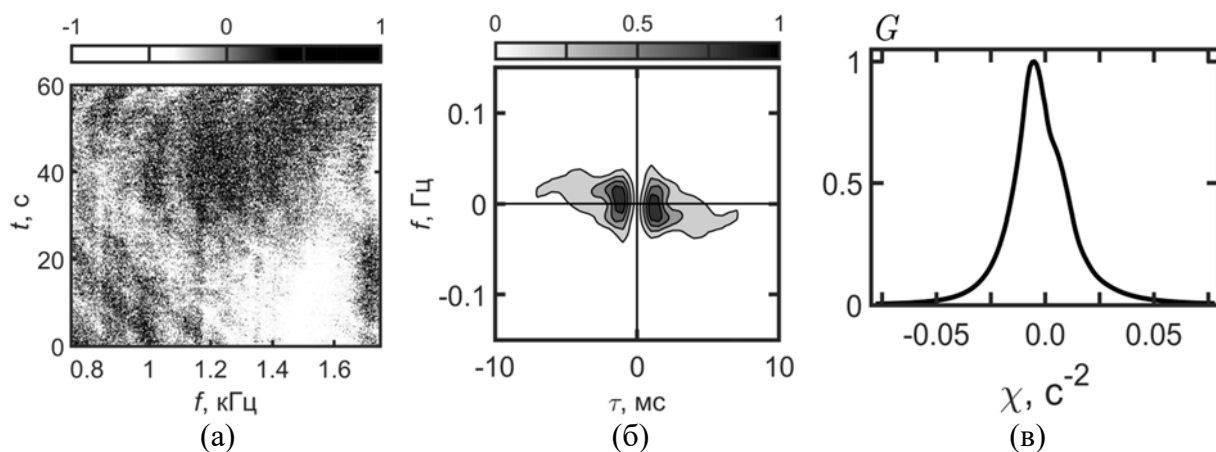


Рис. 4.6. Нормированные интерферограмма (а), модуль голограммы (б), функция обнаружения (в). Время 14:26. Область траверса, приближение АНПА к ВСП1. Обратный галс.

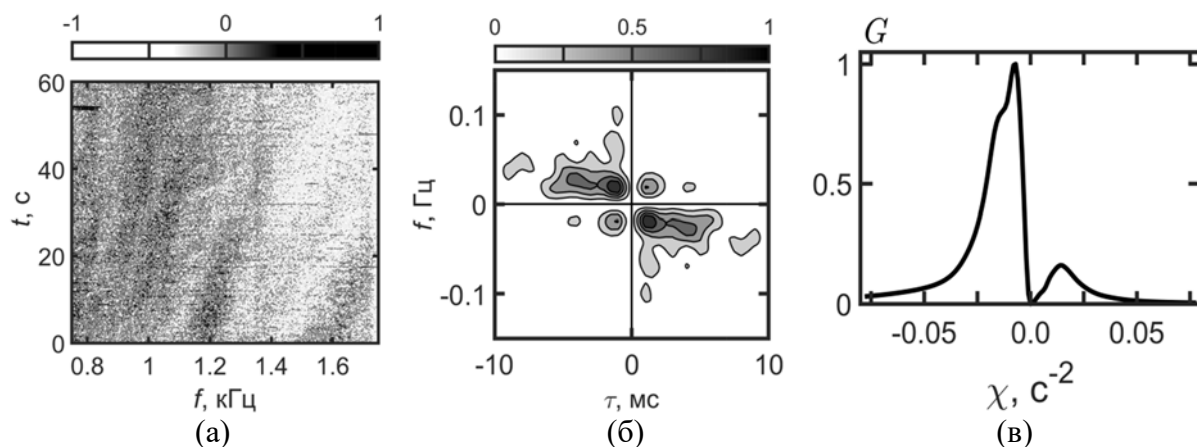


Рис. 4.7. Нормированные интерферограмма (а), модуль голограммы (б), функция обнаружения (в). Время 14:30. Удаление аппарата от ВСП1, обратный галс. За минуту до окончания эксперимента.

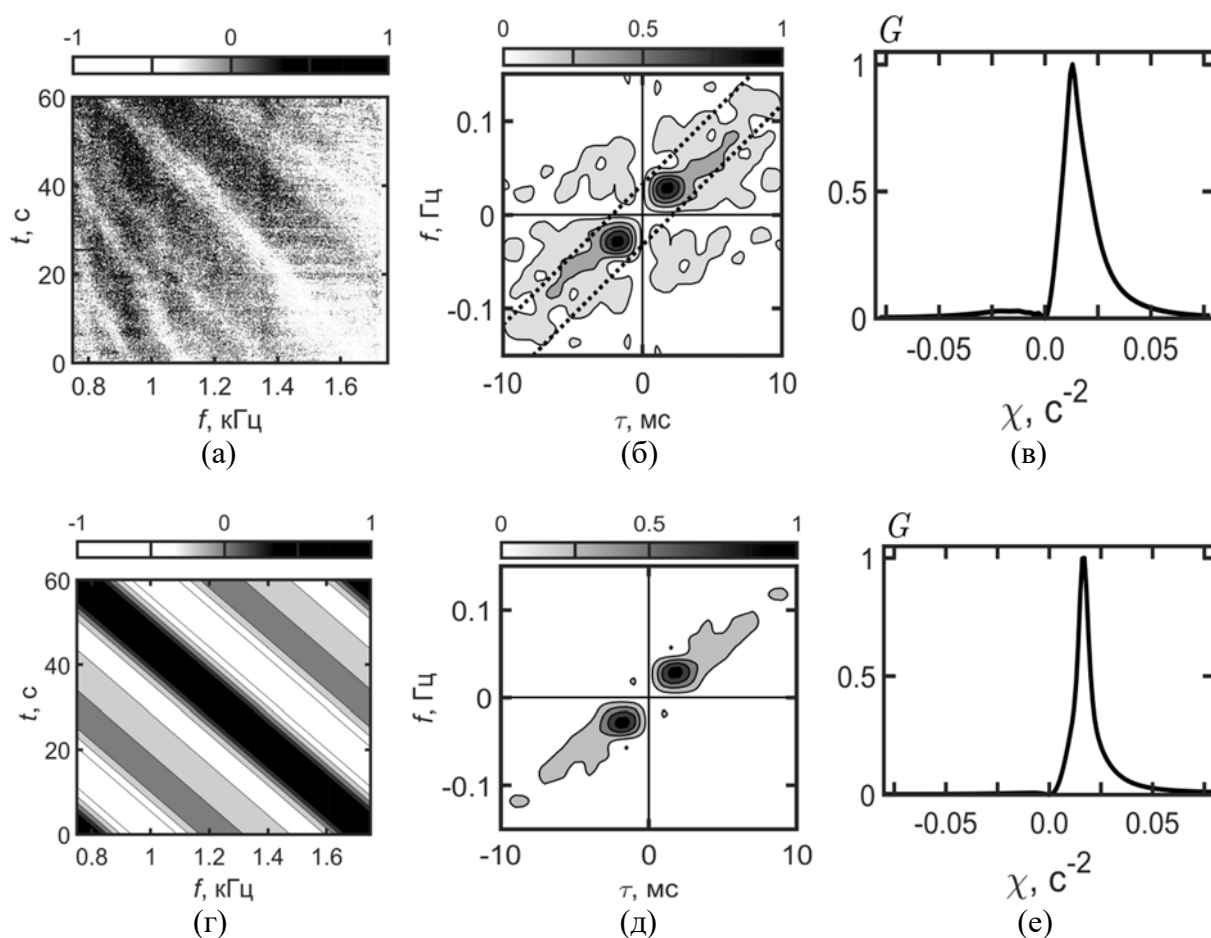


Рис. 4.8. Нормированные интерферограммы (а, г), модули голограмм (б, д), функции обнаружения (в, е): (а, б, в) – до очищения от помехи, (г, д, е) – после очищения от помехи. Время 14:19. Приближение АНПА к ВСП1. Прямой галс.

В начале эксперимента (рис. 4.2) интерференционная картина характеризуется плохо наблюдаемой системой горизонтальных и вертикальных полос, не позволяющей идентифицировать отдельные источники шумоизлучения. В тоже время на голограмме и функции обнаружения отчетливо регистрируются фокальные пятна и пики, отвечающие АНПА и надводным судам в районе интенсивного судоходства, приближающихся и

удаляющихся от ВСП1. При приближении АНПА к ВСП1 (рис. 4.3) наблюдается интерферограмма, сформированная подводным аппаратом. На голограмме и функции обнаружения наблюдаются изображения подводного аппарата и судна, удаляющегося от ВСП1. В области траверса при удалении подводного аппарата от ВСП1 (рис. 4.4) интерференционные полосы не различимы, так как ширина спектра Δf не превышает частотный масштаб изменчивости интерференционной картины Λ_f , $\Delta f < \Lambda_f$ (1.12). На голограмме и функции обнаружения прослеживаются изображения подводного аппарата и судна, приближающегося к ВСП1. С увеличением расстояния между подводным аппаратом и ВСП1 частотный масштаб изменчивости интерферограммы уменьшается [93], что облегчает наблюдение интерференционных полос. Если ширина полосы велика по сравнению с частотным масштабом интерференции, локализация полос становится резкой, видность интерференционной картины возрастает. При развороте подводного аппарата (рис. 4.5) интерференционные полосы искривляются. В области действительных изображений подводного источника на голограмме в первом и в четвертом квадрантах регистрируются две локализованные спектральные плотности различной интенсивности. Этим спектральным плотностям отвечают два пика функции обнаружения, расположенные в области положительных значений (слабый пик) и в области отрицательных значений (сильный пик), которые соответствуют удалению и приближению источника к ВСП1. В районе интенсивного судоходства суда не регистрируется. В области траверса при приближении подводного аппарата к ВСП1 (рис. 4.6) интерференционные полосы не различимы, на голограмме и функции обнаружения видны изображения АНПА и судна, удаляющегося от ВСП1. В конце эксперимента (рис. 4.7) на интерферограмме отчетливо проявляется локализация полос, формируемая подводным аппаратом. На голограмме и функции обнаружения наблюдаются интенсивные фокальное пятно и пик, отвечающие подводному аппарату и менее интенсивные фокальное пятно и пик функции обнаружения, отвечающие судну, приближающемуся к ВСП1.

Для скалярного канала ВСП1 на рис. 4.8 продемонстрирован эффект очищения голограммы от помехи и восстановления интерферограммы. До очищения локализованные полосы интерферограммы размыты (рис. 4.8а). Фильтрация спектральной плотности сигнала на голограмме проводилась в полосе, показанной пунктиром (рис. 4.8б). По сравнению с функцией обнаружения неочищенной голограммы координата пика не изменилась, однако помехоустойчивость обработки возросла (рис. 4.8(в, е)). Восстановленная интерферограмма, очищенная от помехи, приведена на рис. 4.8г. Очищенная интерференционная картина становится контрастней, полосы имеют равные углы наклона. Максимальный частотный масштаб изменчивости оценивается как $\Lambda_f = 0.96$

кГц, что превышает ширину полосы $\Delta f = 0.9$ кГц. Параметр η (3.7), определяющий теоретическую модель интерферограммы на основе двухлучевой модели поля, согласно экспериментальным данным, оценивается как $\eta = 0.068$ м/Гц. Согласно выражению (3.11) в момент времени 14:19, за минуту до прохождения точки траверса, АНПА находился от ПМ1 на горизонтальном расстоянии $r \approx 66$ м, что, учитывая временной шаг дискретности 1 мин, соответствует скорости аппарата 1.5 м/с.

На рис. 4.9–4.12 приведены временные нормированные функции обнаружения $G(t)$, измеренные за время эксперимента ВСП1 по четырем каналам. Нормировка выполнена на максимальное значение функции обнаружения по каждому из каналов. По оси ординат отложена спектральная плотность функции обнаружения в дБ по отношению к максимальному значению. На всех зависимостях максимальные уровни спектральной плотности приходятся на области траверса. Зависимости характеризуют временную изменчивость уровня сигнала шумоизлучения АНПА на выходе голографической обработки по каналам ВСП. Наименьший перепад спектральной плотности от начала обработки до первой области траверса (≈ 15 дБ) приходится на V_z канал. Спектральные плотности в первой (прямой галс) и во второй (обратный галс) областях траверса примерно одинаковы. На расстоянии 990 м перепад уровней спектральной плотности в зависимости от канала равен ≈ 15 –20 дБ.

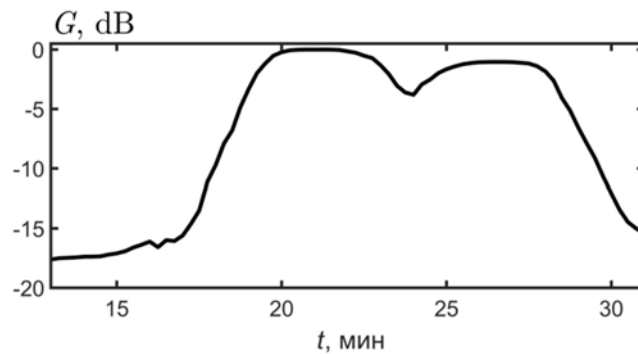


Рис. 4.9. Временная зависимость нормированной функции обнаружения. ВСП1, канал P .

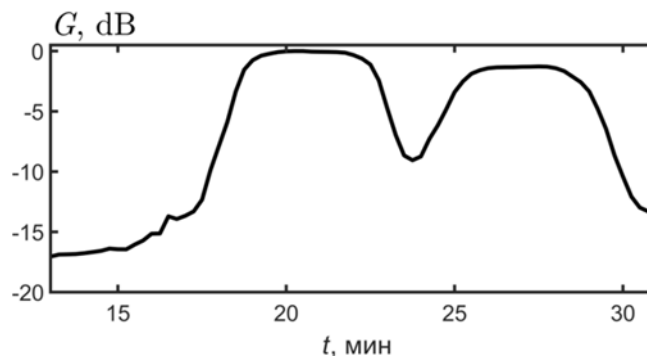


Рис. 4.10. Временная зависимость нормированной функции обнаружения. ВСП1, канал V_x .

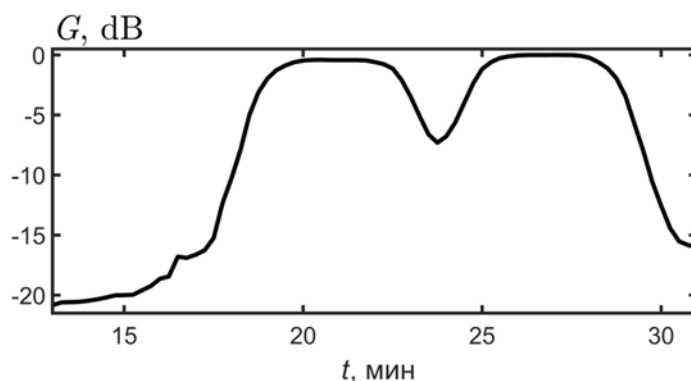


Рис. 4.11. Временная зависимость нормированной функции обнаружения. ВСП1, канал V_y .

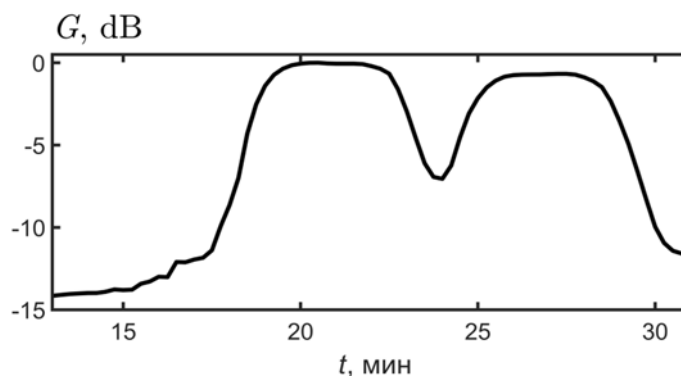
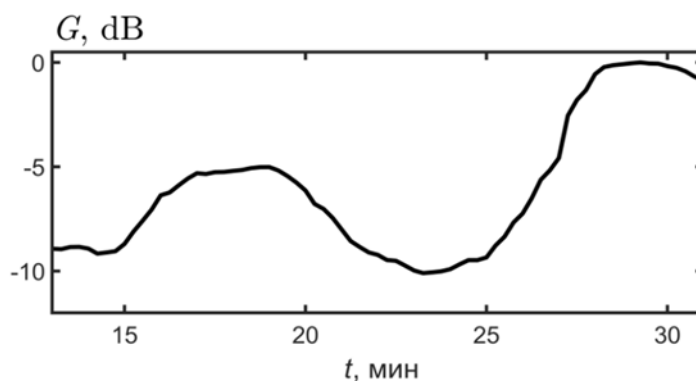


Рис. 4.12. Временная зависимость нормированной функции обнаружения. ВСП1, канал V_z .

На рис. 4.13 приведены временные нормированные функции обнаружения $G(t)$ по каналам звукового давления ВСП2, ВСП3. 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 ВСП оцениваются как: а) ВСП1 – $q_0 = 9.2$ дБ (прямой галс), $q_0 = 8.2$ дБ (обратный галс); б) ВСП2 – $q_0 = -6.9$ дБ (прямой галс), $q_0 = -1.9$ дБ (обратный галс); в) ВСП3 – $q_0 = -8.1$ дБ (прямой галс), $q_0 = -5.1$ дБ (обратный галс). Оценки входного отношения с/п в области траверса при прямом и обратном галсах указывают на нестационарность и анизотропность помехи в акватории движения подводного аппарата, вызванной интенсивным судоходством в районе проведения эксперимента.



(а)

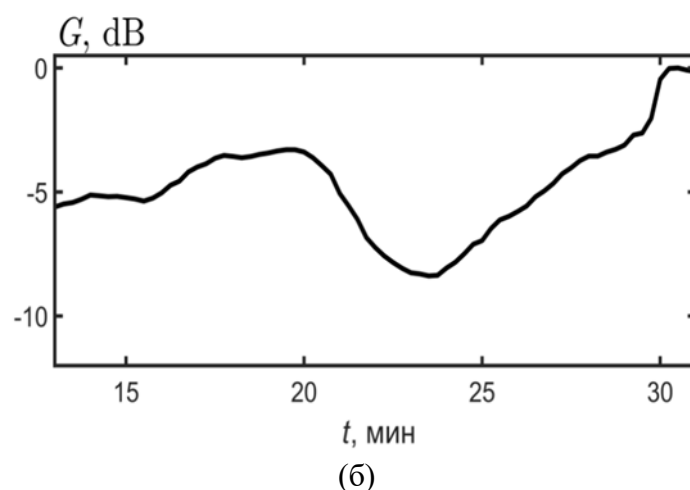
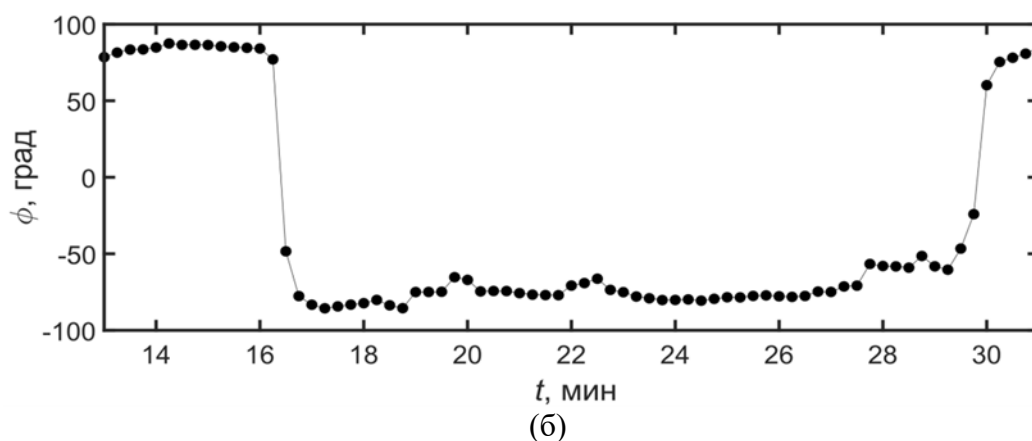
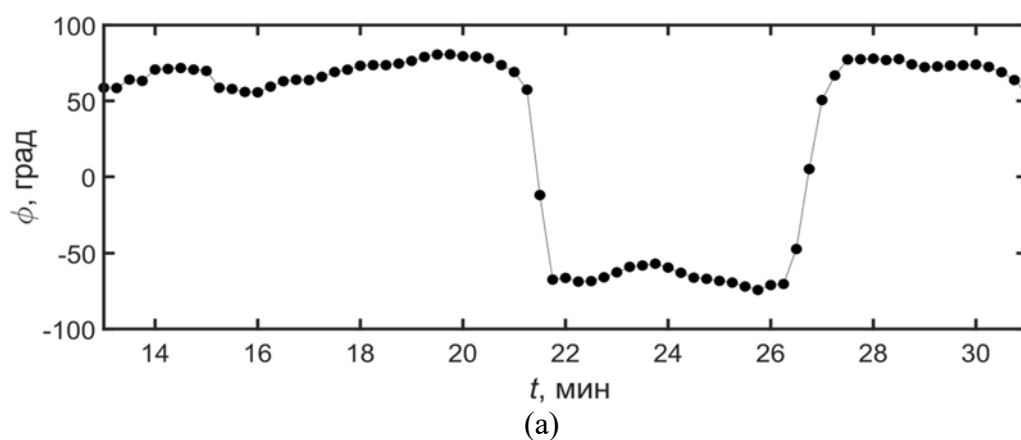


Рис. 4.13. Временная зависимость нормированной функции обнаружения $G(t)$: (а) ВСП2, (б) ВСП3. Канал P .

На рис. 4.14 приведены временные зависимости $\phi(t)$ пеленгов АНПА, измеренные тремя ВСП. 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). Пеленги подводного аппарата надежно регистрируются ВСП1–ВСП3 на протяжении всего времени эксперимента.



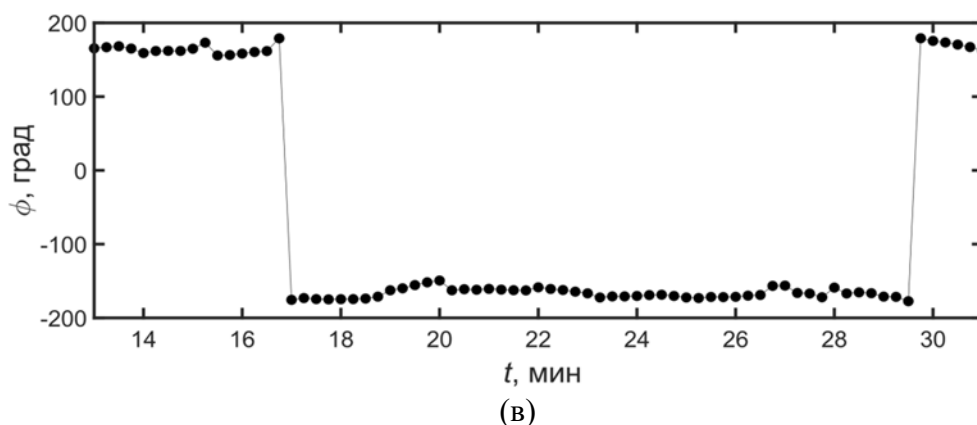


Рис. 4.14. Временная зависимость пеленга $\phi(t)$: (а) ВСП1, (б) ВСП2, (в) ВСП3.

4.3.2 Второй пуск

Для характерных моментов времени результаты обработки по каналу звукового давления ВСП2 приведены на рис. 4.15–4.21. В первые минуты начала эксперимента (рис. 4.15) интерференционная картина зашумлена и не позволяет идентифицировать отдельные источники шумоизлучения. Конфигурация фокальных пятен и пиков функции обнаружения показывает обнаружение АНПА и надводного судна, по сравнению с АНПА более интенсивного источника звука, в районе интенсивного судоходства, которые движутся в противоположных направлениях по отношению к ВСП2. По мере приближения АНПА к ВСП2 интерференционная картина становится контрастнее, сигналы от надводного судна и подводного аппарата существенно уменьшаются и возрастают соответственно (рис. 4.16). На малых расстояниях в области траверса при приближении и удалении АНПА от ВСП2 динамика изменчивости голографической обработки показана на рис. 4.17, рис. 4.18. Локализация интерференционных полос практически отсутствует, наблюдаются фокальные пятна на голограммах в четырех квадрантах и пики функций обнаружения в положительной и отрицательной областях, демонстрирующие приближение и удаление подводного аппарата от ВСП2. С увеличением расстояния уменьшается частотный масштаб изменчивости поля [93], что позволяет наблюдать интерференционную картину и идентифицировать удаление АНПА (рис. 4.19). На рис. 4.20 показаны результаты голографической обработки при развороте АНПА вблизи расположения ВСП3. Наклон интерференционных полос и расположение фокальных пятен на голограмме и пиков функции обнаружения иллюстрируют удаление и приближение АНПА по отношению к ВСП2. В дальней области траверса ВСП2 (рис. 4.21), после поворота подводного аппарата около ВСП3, интерферограмма состоит из системы горизонтальных и вертикальных полос.

На голограмме и функции обнаружения, помимо АНПА, регистрируется одно надводное судно в акватории проведения эксперимента. За полторы минуты до завершения эксперимента результаты голографической обработки представлены на рис. 4.22.

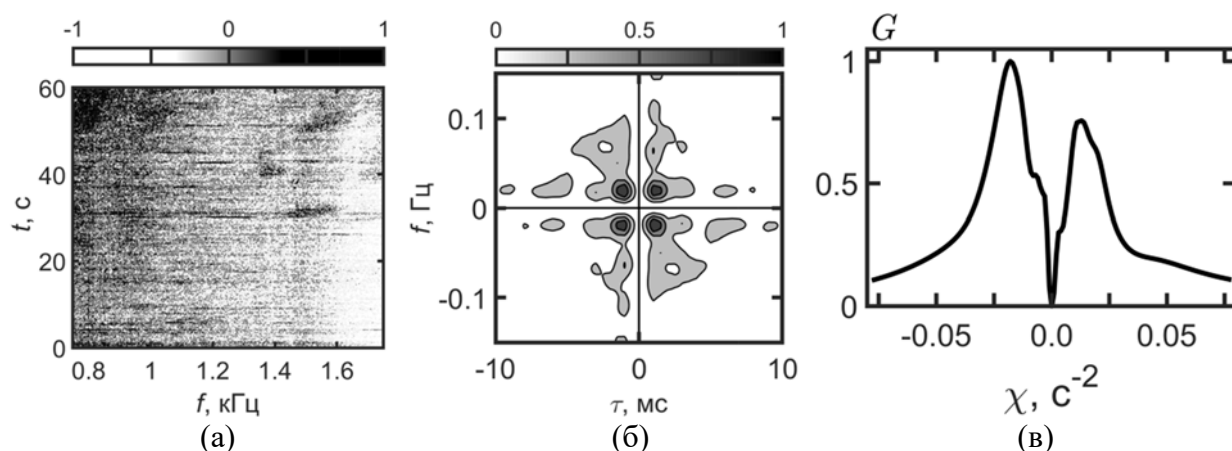


Рис. 4.15. Нормированные интерферограмма (а), модуль голограммы (б), функция обнаружения (в). Время 15:20. Спустя полторы минуты после начала эксперимента. Приближение АНПА к ВСП2.

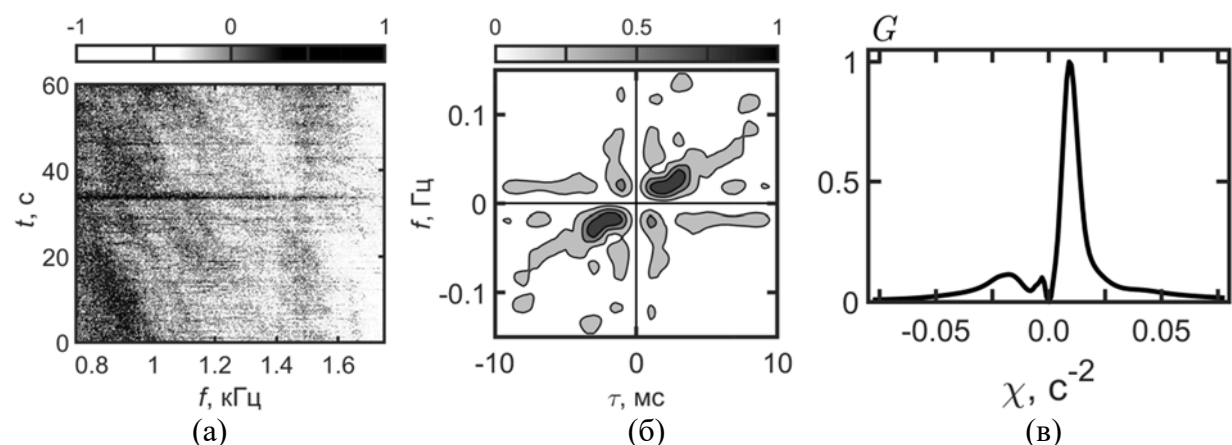


Рис. 4.16. Нормированные интерферограмма (а), голограмма (б), функция обнаружения (в). Время 15:25. Приближение АНПА к ВСП2.

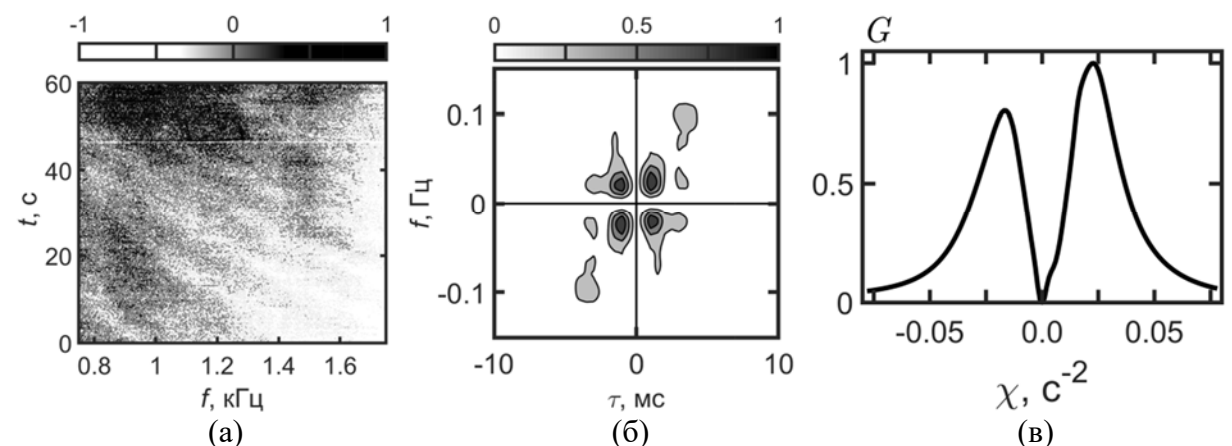


Рис. 4.17. Нормированные интерферограмма (а), голограмма (б), функция обнаружения (в). Время 15:27. Область траверса при приближение АНПА к ВСП2.

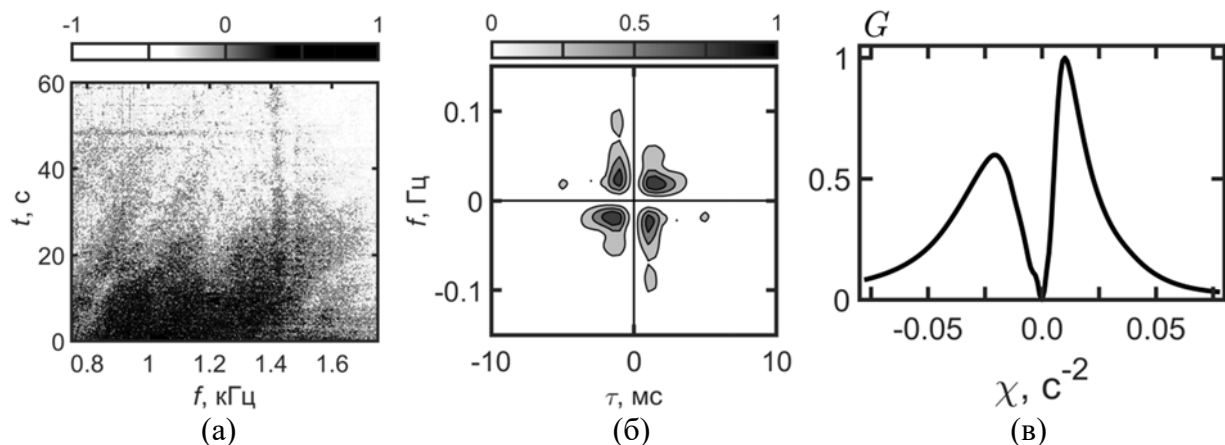


Рис. 4.18. Нормированные интерферограмма (а), голограмма (б), функция обнаружения (в).
 Время 15:28. Область траверса при удалении АНПА от ВСП2.

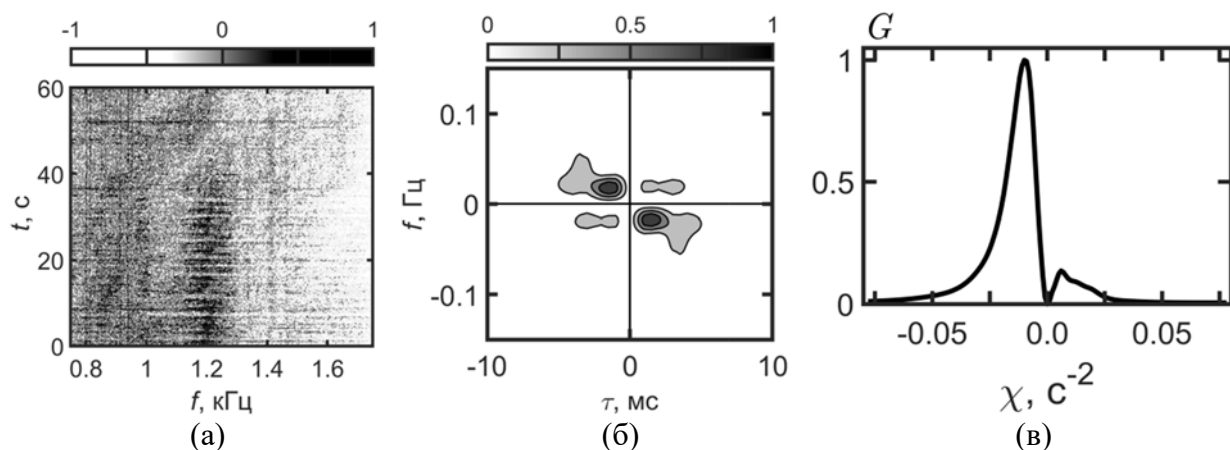


Рис. 4.19. Нормированные интерферограмма (а), голограмма (б), функция обнаружения (в).
 Время 15:30. Удаление АНПА от ВСП2.

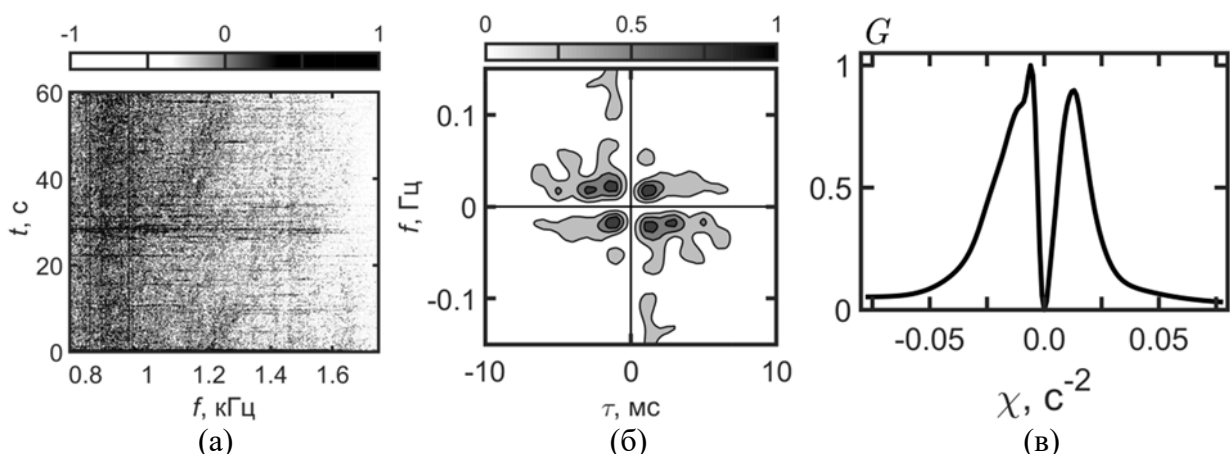


Рис. 4.20. Нормированные интерферограмма (а), голограмма (б), функция обнаружения (в).
 Время 15:31. Разворот вблизи ВСП3.

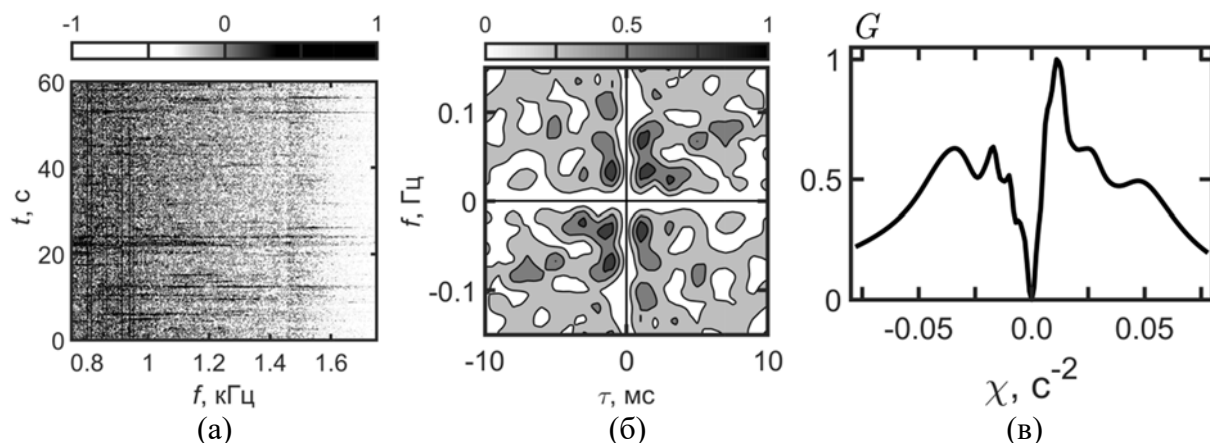


Рис. 4.21. Нормированные интерферограмма (а), голограмма (б), функция обнаружения (в).
 Время 15:34. Прохождение зоны траверса ВСП2.

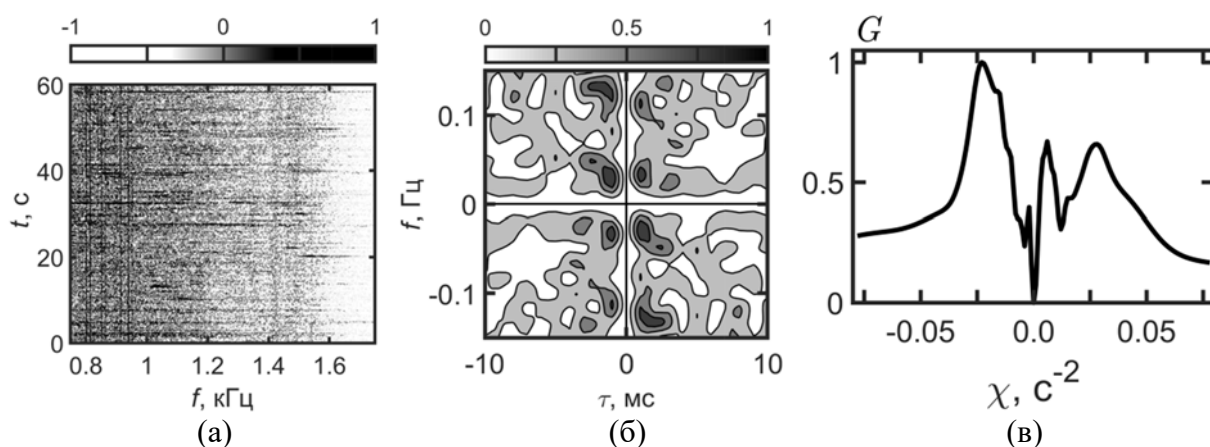


Рис. 4.22. Нормированные интерферограмма (а), голограмма (б), функция обнаружения (в).
 Время 15:37. Удаление от области траверса ВСП2. Полторы минуты до окончания эксперимента.

На рис. 4.23–4.26 приведены временные нормированные функции обнаружения $G(t)$, зарегистрированные за время эксперимента ВСП2 по четырем каналам. Нормировка, как и в первом пуске, выполнена на максимальное значение функции обнаружения по каждому из каналов. По всем четырем каналам максимальные уровни спектральной плотности приходятся на ближнюю область траверса во временном интервале 26–30 мин. Временные интервалы 15–18:35 мин и 39:40–45 мин приходятся на голографическую обработку шумовых сигналов надводных судов в отсутствие шумоизлучения АНПА. Сравнение рис. 4.23, 4.24 с рис. 4.25 показывает, что шумоизлучение надводных судов распространялось преимущественно в направлении оси X по отношению к ВСП2.

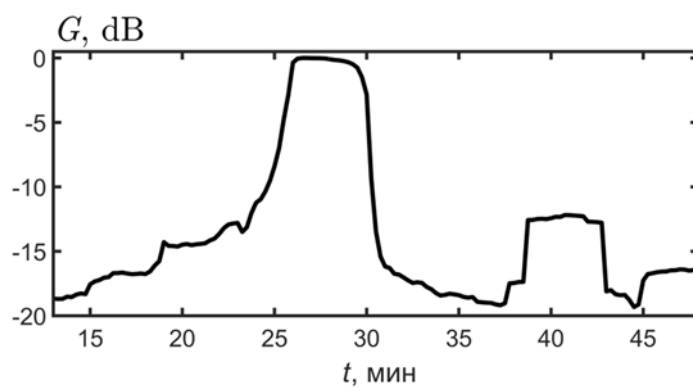


Рис. 4.23. Временная зависимость нормированной функции обнаружения. ВСП2, канал P .

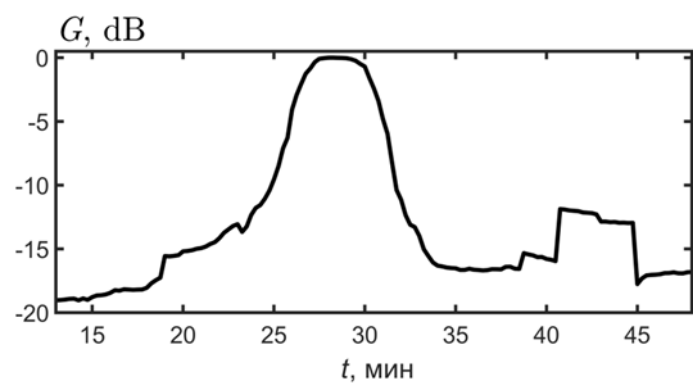


Рис. 4.24. Временная зависимость нормированной функции обнаружения. ВСП2, канал V_x .

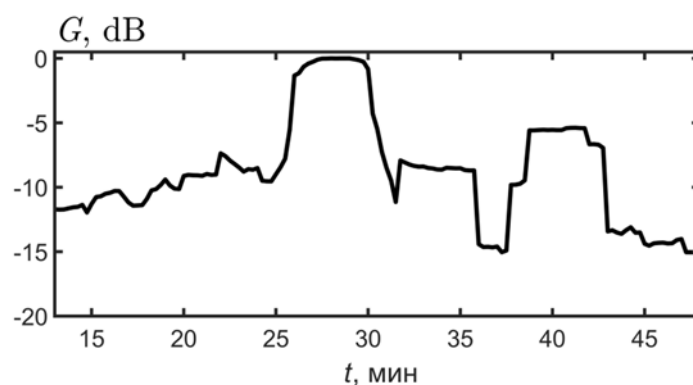


Рис. 4.25. Временная зависимость нормированной функции обнаружения. ВСП2, канал V_y .

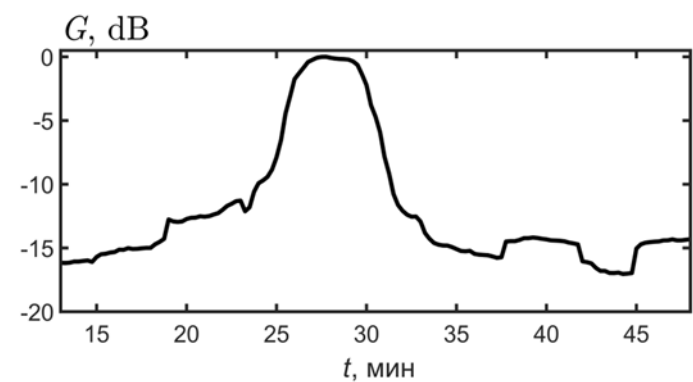


Рис. 4.26. Временная зависимость нормированной функции обнаружения. ВСП2, канал V_z .

На рис. 4.27 приведены временные нормированные функции обнаружения $G(t)$ по каналам звукового давления ВСП1, ВСП3. Нормировка выполнена на максимальное значение функции обнаружения во время эксперимента по каждому из ВСП. Максимальные уровни спектральной плотности приходятся на области траверса. Области траверса ВСП1, ВСП3, согласно рис. 4.27, ограничены временным интервалом ≈ 6 мин (по уровню 3 дБ).

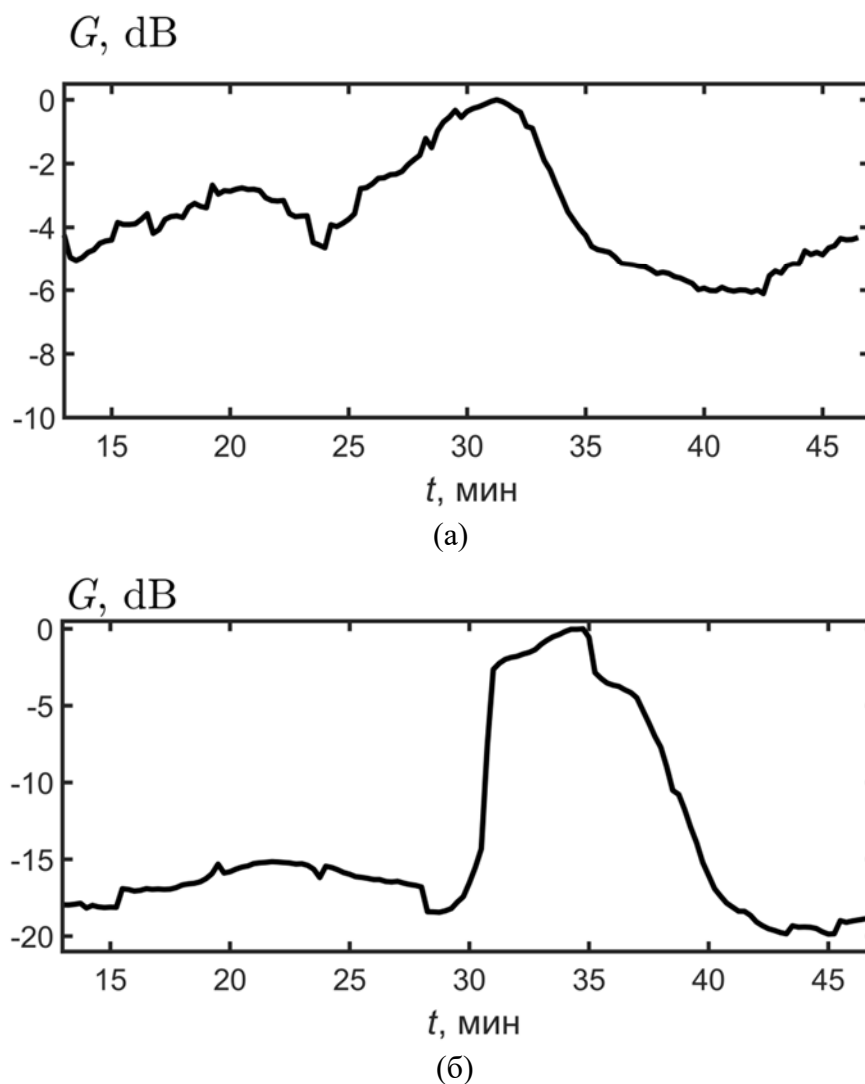


Рис. 4.27. Временная зависимость нормированной функции обнаружения $G(t)$: (а) ВСП1, (б) ВСП3. Канал Р.

На рис. 4.28 приведены пленги АНПА во время эксперимента для трех ВСП1–ВСП3. При движении подводного аппарата от ПМ2 к ПМ3 в области траверса ВСП1 (время $\approx 15:30$) наблюдается скачок пленга, обусловленный изменением направления движения АНПА (рис. 4.28а). В областях траверса ВСП2 (время $\approx 15:27$) и ВСП3 (время $\approx 15:31$) на рис. 4.28б и рис. 4.28в регистрируются скачки пленгов. Пленги АНПА ВСП1–ВСП3

надежно регистрируются на протяжении всего времени (15:18–15:40) обработки экспериментальных данных.

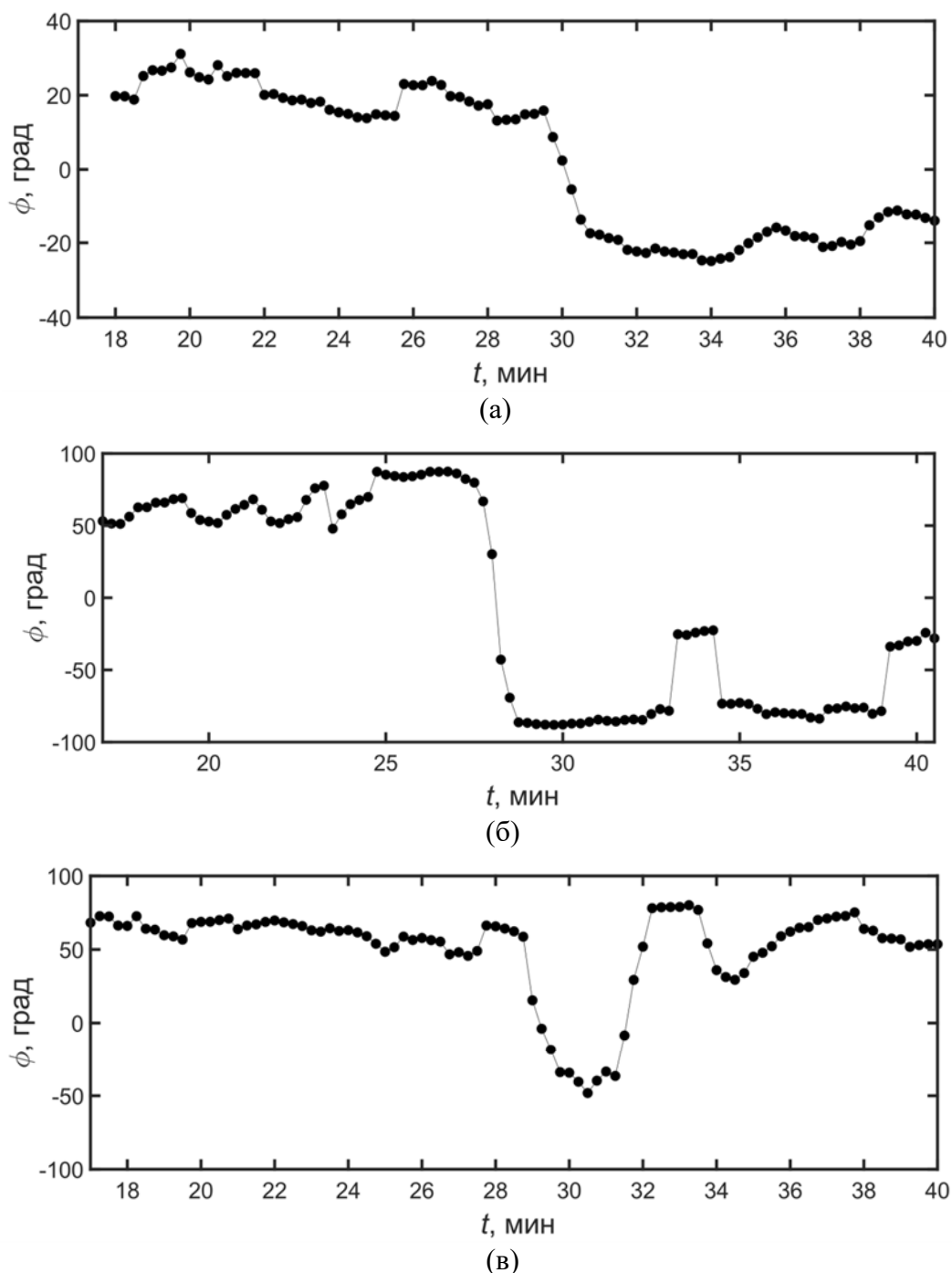


Рис. 4.28. Временная зависимость пеленга $\phi(t)$: (а) ВСП1, (б) ВСП2, (в) ВСП3.

§ 4.4. Выводы

С применением одиночных ВСП в мелководной акватории Черноморского побережья в высокочастотном диапазоне продемонстрирована работоспособность голографической обработки по контролю движения малогабаритного АНПА в условиях интенсивного

судоходства. Результирующая интерферограмма, обусловленная наложением интерференционных картин, формируемых подводным аппаратом и надводными судами в акватории эксперимента, не позволяла идентифицировать отдельные источники шумоизлучения. На голограмме спектральная плотность отдельных источников распределялась в форме фокальных пятен и одиночных пиков функции обнаружения. Это позволяло обнаруживать и пеленговать подводный аппарат на фоне судов в условиях интенсивного судоходства. В моменты времени, когда судоходство не наблюдалось, на голограмме и функции обнаружения регистрировались лишь изображения АНПА. Подводный аппарат обнаруживался и локализовался на всех дальностях, которые были заданы условиями проведения эксперимента.

ГЛАВА 5

ОБРАБОТКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛИНЕЙНЫХ АНТЕНН

§ 5.1. Краткое введение

Приемные антенны, по сравнению с одиночными приемниками, позволяют увеличить дальность обнаружения и повысить точность локализации маломощных подводных источников. В данной 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 соответственно [60, 110, 111]. 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. Анализ помехоустойчивости голографической обработки [60] представлен в параграфе 5.4. Построенная на основе критерия Неймана–Пирсона теория статистического обнаружения полезного сигнала шумового источника с помощью линейных антенн [65, 66] описана в параграфе 5.5. 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 параграфе 5.6 приведены основные результаты.

§ 5.2. Горизонтальная антенна

Волновод полагается горизонтально-однородным. Пусть межэлементное расстояние равно d , число элементов антенны – B , расстояние от элемента Q_b до источника S – r_b , $b = \overline{1, B}$ (рис. 5.1). В качестве опорного выбирается первый элемент Q_1 . Апертура антенны $L = (B - 1)d$ полагается много меньше расстояния до источника, $L \ll r_b$. В этом случае $r_b = r_1 - (b - 1)d \sin \theta$, где θ – угол, дополнительный к пеленгу ϕ , $\theta = (\pi/2) - \phi$. Поля с каждого элемента антенны суммируются, и на выходе формируется интерферограмма, к которой применяется двумерное преобразование Фурье. Компенсация антенны обеспечивается в направлении угла θ_* . Поскольку компенсировать приходится разность расстояний от источника до различных элементов антенны, поле b -го элемента умножим на

$\exp[ih_*(f_0)(b-1)d\sin\theta_*]$, где $h_*(f_0)$ – выделенное горизонтальное волновое число на средней частоте f_0 спектра источника.

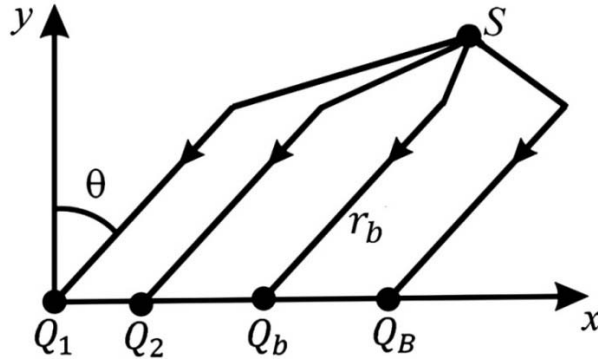


Рис. 5.1. Геометрия задачи.

Поле на выходе b -го элемента запишем в виде суммы мод [93]

$$p_b(f, r_b) = \sum_m A_m(f, r_b) \exp\{i[h_m(f)r_1 - 2(b-1)(h_m(f)\eta - h_*(f_0)\eta_*)]\}, \quad (5.1)$$

где

$$\eta = d\sin\theta/2, \quad \eta_* = d\sin\theta_*/2, \quad (5.2)$$

A_m и h_m – амплитуда и горизонтальное волновое число (постоянная распространения) m -моды. В рамках нашего подхода амплитудной зависимостью мод учитываются следующие важные факторы: глубины источника z_s и элементов z_q антенны, модальное затухание цилиндрическое расхождение поля. Поле на выходе антенны можно записать в виде

$$p_{an}(f, r_1) = \sum_b p_b(f, r_b),$$

пренебрегая зависимостью амплитуды от расстояния, т.е. считая $A_m(f, r_b) \approx A_m(f, r_1)$, после несложных преобразований можно представить как

$$p_{an}(f, r_1) = \sum_m A_m(f, r_1) \exp\{i[h_m(f)r_1 - (B-1)(h_m(f)\eta - h_*(f_0)\eta_*)]\} I_m. \quad (5.3)$$

Здесь

$$I_m = \frac{\sin[B(h_m(f)\eta - h_*(f_0)\eta_*)]}{\sin(h_m(f)\eta - h_*(f_0)\eta_*)}. \quad (5.4)$$

Интерферограмма антенны $P_{an}(f, r_1) = |p_{an}(f, r_1)|^2$, согласно (5.3), равна

$$P_{an}(f, r_1) = \sum_m \sum_n P_{mn}^{(an)}(f, r_1), \quad (5.5)$$

где

$$P_{mn}^{(an)}(f, r_1) = A_m(f, r_1) A_n^*(f, r_1) \exp[ih_{mn}(f)(r_1 - (B-1)\eta)] I_{mn}, \quad I_{mn} = I_m I_n. \quad (5.6)$$

Рассмотрим случай движущегося источника с радиальной скоростью w . Считаем, что расстояние r_1 соответствует начальному моменту времени $t_0 = 0$. Далее переходим в

интерферограмме (5.5) к временной переменной t от пространственной r ($r = r_1 + wt$). Затем выполняем двумерное преобразование Фурье. В результате преобразования Фурье получаем распределение, которое определяется выражением

$$F_{an}(v, \tau) = \int_0^{\Delta t} \int_{f_0 - \frac{\Delta f}{2}}^{f_0 + \frac{\Delta f}{2}} P_{an}(f, t) \exp[i2\pi(vt - f\tau)] dt df = \sum_m \sum_n F_{mn}^{(an)}(v, \tau), \quad (5.7)$$

Здесь ширина и средняя частота спектра – Δf и f_0 , частота и время в пространстве голограммы – v и τ , интервал наблюдения – Δt . Используя подход при получении голограммы одиночного приемника [43], для парциальной голограммы антенны, обусловленной интерференцией мод номеров m и n , получаем

$$F_{mn}^{(an)}(v, \tau) = A_m(f_0, r_1) A_n^*(f_0, r_1) I_{mn}(f_0, B, \eta, \eta_*) \Delta f \Delta t \times \\ \exp \left[i2\pi \left(\frac{v\Delta t}{2} - \tau f_0 \right) \right] \exp \left\{ i \left[h_{mn}(f_0) \left(\frac{\Delta t}{2} w + r_1 - (B-1)\eta \right) \right] \right\} \times \\ \frac{\sin \left\{ 2\pi \left[(r_1 - (B-1)\eta + wt_*) \frac{dh_{mn}(f_0)}{2\pi df} - \tau \right] \frac{\Delta f}{2} \right\}}{2\pi \left[(r_1 - (B-1)\eta + wt_*) \frac{dh_{mn}(f_0)}{2\pi df} - \tau \right] \frac{\Delta f}{2}} \frac{\sin \left\{ [wh_{mn}(f_0) + 2\pi v] \frac{\Delta t}{2} \right\}}{[wh_{mn}(f_0) + 2\pi v] \frac{\Delta t}{2}}. \quad (5.8)$$

Здесь t_* – выделенный момент времени на интервале наблюдения Δt , $0 < t_* < \Delta t$. Если положить $B = 1$, то $I_{mn} = 1$, и соотношение (5.8) переходит в выражение для одиночного приемника [43].

Структура голограммы антенны идентична структуре голограммы точечного источника. Голограммы антенны состоит из совокупности фокальных пятен, соответствующих интерференции между различными модами звукового поля. Фокальные пятна сконцентрированы в двух локальных областях пространства (τ, v) , расположенных симметрично относительно начала координат. Данная структура голограммы объясняется симметрией функции (5.8) относительно индексов интерферирующих мод: $F_{mn}^{(an)}(v, \tau) = F_{nm}^{(an)}(-v, -\tau)$. Если источник приближается к антенне (т.е. радиальная скорость источника $w < 0$), то локальные области фокальных пятен расположены в квадрантах с номерами I и III. Если источник удаляется от антенны (т.е. радиальная скорость источника $w > 0$), то локальные области фокальных пятен расположены в квадрантах с номерами II и IV. В пространстве голограммы находится $(M-1)$ фокальных пятен (τ_μ, v_μ) , расположенных на прямой $v = \varepsilon\tau$. Здесь M – количество мод звукового поля, $\mu = \overline{1, M-1}$ – индекс локального максимума голограммы. Фокальное пятно, которое расположено ближе к началу координат в точке (τ_1, v_1) , соответствует интерференции только соседних мод звукового поля. В точке (τ_2, v_2) расположено фокальное пятно, которое соответствует интерференции мод с

номера $(m, m + 2)$, и т.д. В точке (τ_{M-1}, ν_{M-1}) находится самое дальнее фокальное пятно, которое соответствует интерференции первой и последней моды. В каждой точке (τ_μ, ν_μ) аккумулируются $(M - \mu)$ интерференционных фокальных пиков [43].

При выполнении условия $r_1 \gg |(B - 1)\eta - wt_*|$, как следует из (5.8), оценки удаления и радиальной скорости источника

$$\dot{r}_1 = \kappa_{r\mu} \tau_\mu, \quad \dot{w} = -2\pi \kappa_{w\mu} \nu_\mu \quad (5.9)$$

совпадают с выражениями для одиночного приемника. Здесь

$$\kappa_{r\mu} = \left[dh_{m(m+\mu)}(f_0)/d2\pi f \right]^{-1}, \quad \kappa_{w\mu} = \left[h_{m(m+\mu)}(f_0) \right]^{-1} \quad (5.10)$$

– величины представляющие коэффициенты, которые определяют частотные и пространственные квазипериоды передаточной функции среды распространения [93]. Оценочные значения обозначены точкой сверху. Усреднение по модовой структуре обозначено чертой.

Множитель

$$I_{mn} = I_m(f_0, B, \eta, \eta_*) I_n(f_0, B, \eta, \eta_*) \quad (5.11)$$

определяет распределение спектральной плотности голограммы антенны по отношению к одиночному приемнику. Особенности зависимости (5.11) от угла θ рассмотрим для угла компенсации $\theta_* = 0$. Главные максимумы функций $I_{m,n}$, $\max I_{m,n} = B$, соответствуют значениям

$$\sin\theta = \pm 2k\pi \frac{1}{h_{m,n}(f_0)d}, \quad (5.12)$$

где $k = 0, 1, \dots$ – порядок спектра. В направлении угла $\theta = 0$, нулевой порядок $k = 0$, осуществляется когерентное сложение комплексных амплитуд всех номеров мод; при $k = 1, 2, \dots$ положение максимумов зависит от номеров мод. Нулям функций $I_{m,n}$ отвечают значения углов

$$\sin\theta = \pm 2j\pi \frac{1}{B h_{m,n}(f_0)d}, \quad (5.13)$$

где j принимает значение целых чисел, кроме $B, 2B, \dots$. Нули расположены примерно в B раз чаще, чем главные максимумы. Вторичные максимумы $I_{m,n}$ лежат приблизительно посередине между двумя соседними нулями, т.е. приходятся на значения

$$\sin\theta \cong \pm (2g + 1)\pi \frac{1}{B h_{m,n}(f_0)d}, \quad (5.14)$$

где g – целые числа. Вторичные максимумы не превышают 0.2 от значения B [112].

Таким образом, положения главных максимумов не зависят от числа элементов B , между каждыми двумя главными максимумами расположено $(B - 1)$ нулей и $(B - 2)$

вторичных максимумов. С увеличением параметра Bdf_0 , т.е. чем больше апертура и выше частотный диапазон, как следует из (5.13), возрастает резкость главных максимумов (уменьшается ширина) и растет число пеленгов, при которых спектральная плотность равна нулю. Расстояние между главными максимумами для определенной длины волны определяется межэлементным расстоянием.

Положим межэлементное расстояние $d = \lambda(n + 1)/2$, где $n = 0, 1, \dots$, λ – длина волны, для которой примем значение $\lambda = 2\pi/h_m(f_0)$. Тогда, как следует из (5.12), если $n = 0$, то существует лишь главный максимум нулевого порядка ($\theta = 0, \pi$); если $n = 1$ – два главных максимума нулевого и первого порядков ($\theta = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$) и т.д. Число порядков k определяется условием $2k \leq n + 1$. С повышением межэлементного расстояния и уменьшения длины волны увеличивается количество главных максимумов. Ширина главных максимумов, согласно (5.13), не зависит от их порядка спектра и равна $\Delta\theta = \lambda/Bd$. Изменяя частотный диапазон (при заданном межэлементном расстоянии), можно регулировать положения главных максимумов. Многомодовый режим распространения, очевидно, будет приводить к «замазыванию» нулей спектральной плотности голограммы, смещению положений главных максимумов (для углов $\theta \neq 0$), определяемых соотношением (5.12), и увеличению их ширины. Введение угла компенсации θ_* приводит к появлению в правых частях соотношений (5.12)–(5.14) слагаемого $h_*(f_0)\sin\theta_*/h_{m,n}(f_0)$.

По отношению к одиночному приемнику результативность голографической обработки с использованием антенны (нижний индекс «an») характеризует: коэффициент усиления

$$\chi = |G_{an}(B, \theta, \theta_*)|/|G_r|, \quad (5.15)$$

где

$$G_{an}(B, \theta, \theta_*) = \iint |F_{an}(\tau, \nu)| d\tau d\nu, \quad G_r = \iint |F_r(\tau, \nu)| d\tau d\nu \quad (5.16)$$

и характеристика направленности

$$D(B, \theta, \theta_*) = G_{an}(B, \theta, \theta_*)/\max G_{an}. \quad (5.17)$$

Здесь нижний индекс «r» относится к одиночному приемнику. В (5.16) интегрирование осуществляется по области локализации спектральной плотности. Из (5.8), (5.11) и (5.15) следует, что $\chi_{\max} = B^2$.

Таким образом, обработка позволяет осуществлять пеленгование источника как сканированием характеристики направленности (5.17), так и на основе обработки голограммы антенны для различных векторно-скалярных компонент поля, как это предложено по отношению к одиночному векторно-скалярному приемнику [53].

В рамках компьютерного эксперимента использовался однородный гидроакустический волновод. Глубина волновода $H = 70$ м. Стратификация водного слоя представлена на рис. 5.2. Параметры дна: отношение плотности донного и водного слоев $\rho = 1.8$, показатель преломления дна $n = 0.85(1 + i0.02)$.

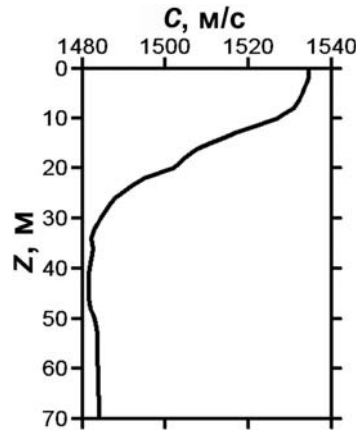


Рис. 5.2. Профиль скорости звука.

Число элементов антенны $B = 21$, они расположены на дне, $z_q = 70$ м. Межэлементное расстояние $d = 2.5$ м, что примерно соответствует половине длине волны λ на частоте $f_0 = 310$ Гц. Ширина полосы $\Delta f = 300 - 320$ Гц. Шумовой источник, расположенный на глубине $z_s = 30$ м, со скоростью $w = 3$ м/с удалялся от антенны. В момент времени $t = 0$ удаление источника от опорного элемента антенны $r_1 = 10$ км. Время накопления $\Delta t = 60$ с, длительность шумовой реализации $\delta t_1 = 2$ с, временной интервал между отсчетами $\Delta t = 0.5$ с, так что число отсчетов $J = 24$. Выделенное горизонтальное волновое число $h_*(f_0) = h_1(f_0)$ (табл. 5.1). Если для выделенного волнового числа $h_*(f_0)$ воспользоваться другими волновыми числами мод $h_m(f_0)$, $m = 2-7$, то это незначительно сказывается на результатах моделирования.

Таблица 5.1. Постоянные распространения мод h_m и их производные $dh_m/d2\pi f$ на частоте $f_0 = 310$ Гц.

Номера мод, m	1	2	3	4	5	6	7
$h_m, \text{м}^{-1}$	1.2787	1.2737	1.2670	1.2593	1.2504	1.2412	1.2325
$dh_m/d2\pi f, \text{1/м} \cdot \text{Гц}$	0.6798×10^{-3}	0.6807×10^{-3}	0.6820×10^{-3}	0.6838×10^{-3}	0.6853×10^{-3}	0.6847×10^{-3}	0.6861×10^{-3}

На рис. 5.3–5.6 показаны результаты, полученные в рамках вычислительного эксперимента. На интерферограммах и голограммах вырезаны средние значения. Это позволяет повысить контрастность и информативность представленных результатов.

Рис. 5.3 демонстрирует голографическую обработку при приеме на опорный элемент антенны. Наблюдается контрастная интерференционная картина (рис. 5.3а), спектральная

плотность голограммы (рис. 5.3б) сконцентрирована в шести фокальных пятнах. Фокальные пятна номеров $\mu = 1, 2$ частично пересекаются. Характеристика направленности (рис. 5.3в), естественно, имеет круговую симметрию.

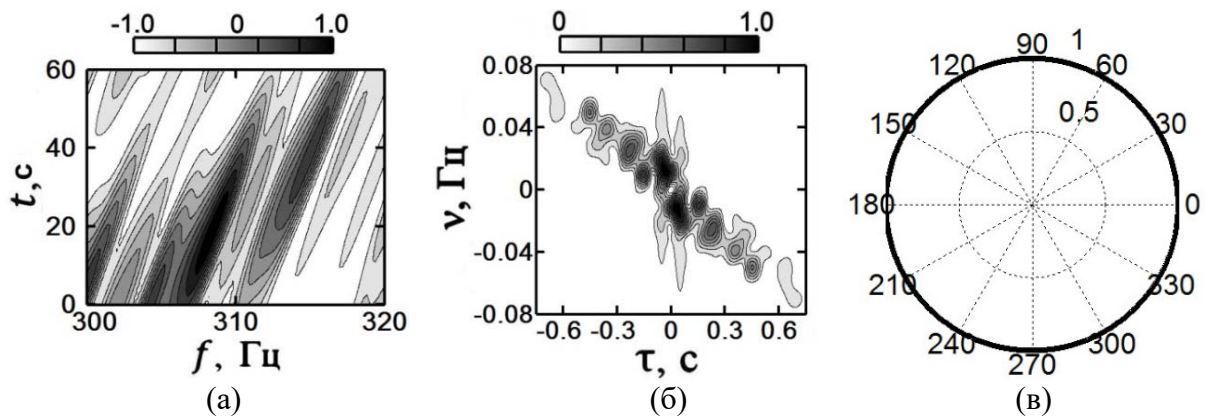


Рис. 5.3. Нормированные интерферограмма (а), голограмма (б) и характеристика направленности (в) опорного элемента антенны.

На рис. 5.4 показаны результаты голографической обработки на выходе антенны в отсутствии компенсации. По сравнению с одиночным приемником (рис. 5.3) снижается контрастность интерферограммы (рис. 5.4а) и немного изменяется расположение спектральной плотности голограммы (рис. 5.4б). Это объясняется некогерентным сложением полей на элементах антенны. Положения максимумов фокальных пятен при этом сохраняются. Характеристика направленности (рис. 5.4в) имеет один главный максимум, отвечающий нулевому порядку спектра. Его ширина на уровне половины спектральной плотности $\Delta\theta \approx 9.5^\circ$. Из сравнения рис. 5.3, 5.4, следует, что коэффициент концентрации спектральной плотности голограмм γ (2.25) при переходе от одиночного приемника к горизонтальной антенне практически не меняется.

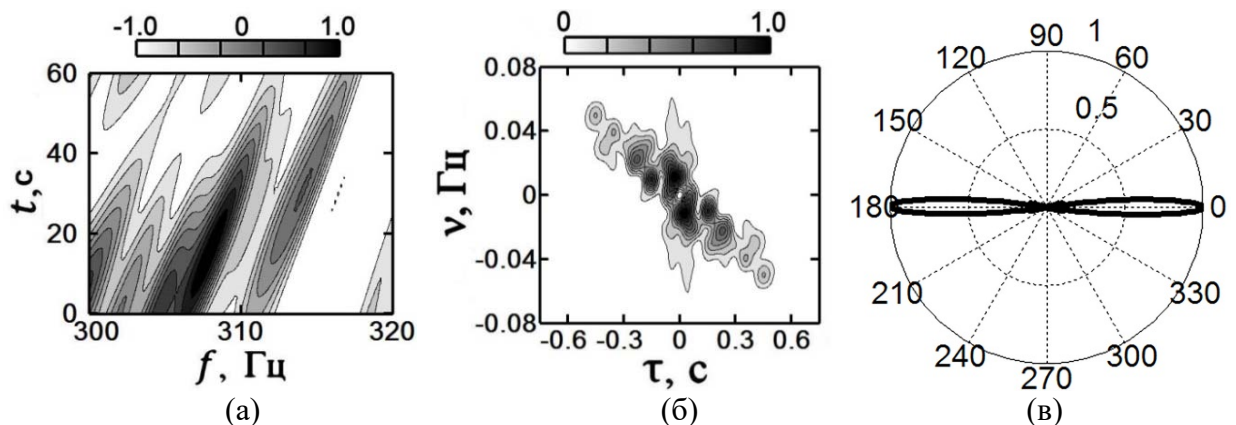


Рис. 5.4. Нормированные интерферограмма (а), голограмма (б) и характеристика направленности (в) антенны в отсутствии компенсации.

Характеристики направленности при различных углах компенсации представлены на рис. 5.5. С ростом угла компенсации θ_* ширина главного максимума возрастает.

Наибольшая ширина имеет место при угле $\theta_* = 90^\circ$. Данные особенности поведения характеристики направленности, как свидетельствуют другие результаты моделирования (в данной работе не отражены), имеют место при увеличении волнового размера d/λ при сохранении числа элементов антенны или при уменьшении числа элементов антенны при неизменном волновом размере.

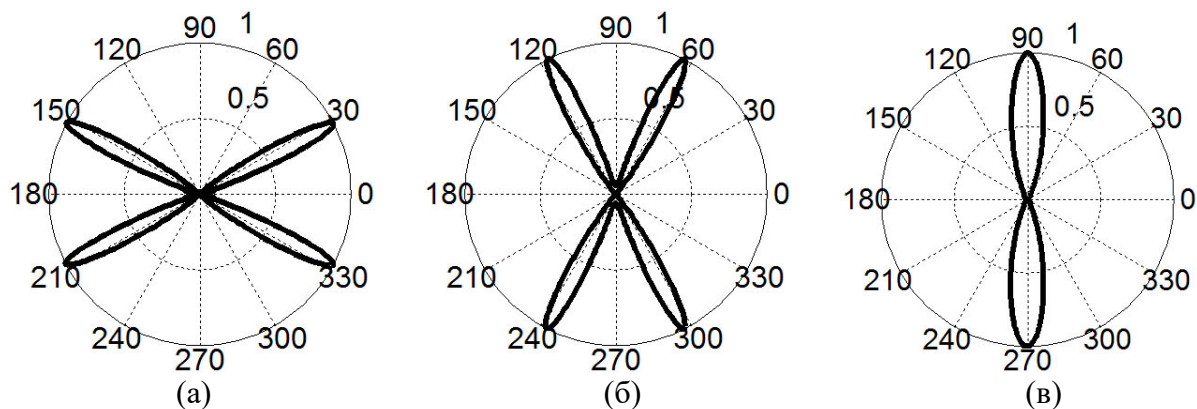


Рис. 5.5. Характеристики направленности антенны для углов компенсации: (а) $\theta_* = 30^\circ$, (б) $\theta_* = 60^\circ$, (в) $\theta_* = 90^\circ$.

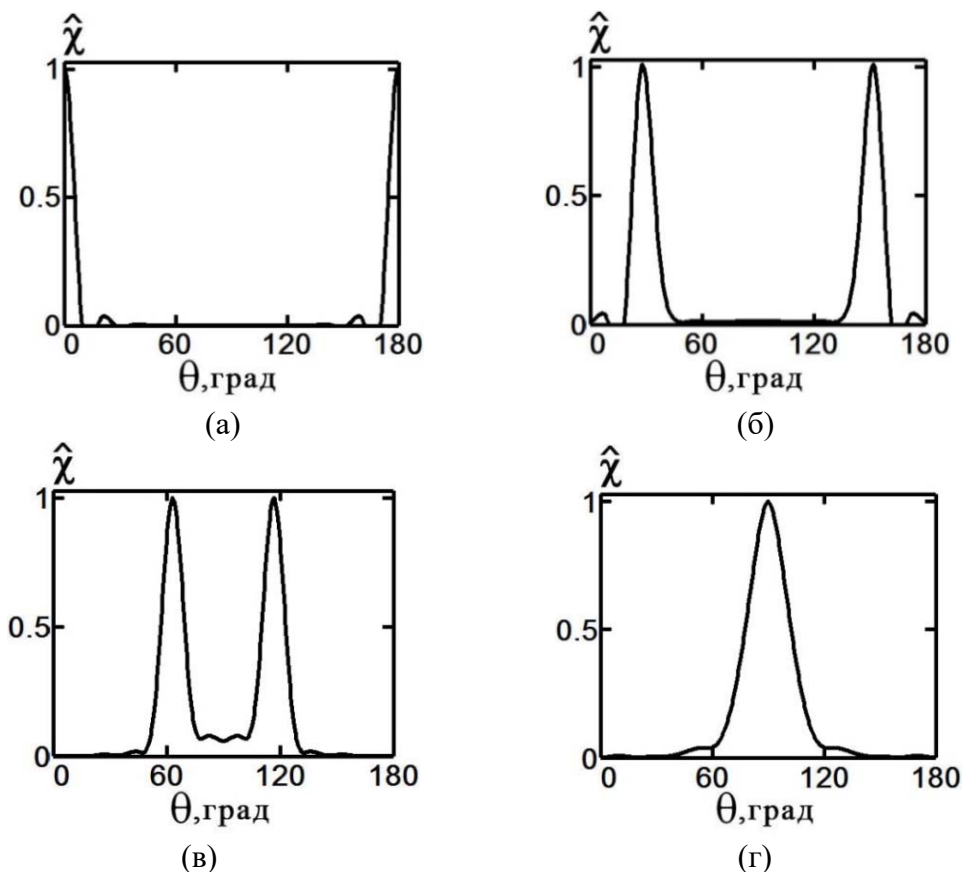


Рис. 5.6. Зависимость нормированного коэффициента усиления $\hat{\chi}$ от угла θ при различных значениях угла компенсации θ_* : (а) $\theta_* = 0^\circ$, (б) $\theta_* = 30^\circ$, (в) $\theta_* = 60^\circ$, (г) $\theta_* = 90^\circ$.

На рис. 5.6 приведены зависимости нормированного коэффициента усиления $\hat{\chi} = \chi/\chi_{\max}$ (5.15) от угла θ при различных значениях угла компенсации θ_* . С увеличением угла

компенсации ширина максимумов возрастает. Данные зависимости, по существу, являются другой формой представления зависимостей на рис. 5.5. По этой причине главные максимумы на рис. 5.5, 5.6 имеют одинаковую ширину. Нормировочное значение коэффициента $\chi_{\max} = 384$. Максимальный коэффициент усиления, равный примерно B^2 , имеет место в направлении угла компенсации. При введении угла компенсации коэффициенты усиления антенны χ не зависят от угла наблюдения θ и близки к теоретической оценке $\chi = B^2$.

В работах [61, 110] для рассматриваемого модельного волновода представлены результаты численного моделирования голографической обработки для ширины полосы $\Delta f = 100 - 120$ Гц и числа элементов антенны $B = 3, 11$. Согласно этим расчетам ширина главных максимумов характеристики направленности (коэффициента усиления) уменьшается с увеличением числа элементов антенны.

§ 5.3. Вертикальная антенна

Как и в случае горизонтальной антенны, волновод полагается горизонтально-однородным, межэлементное расстояние равно d , число элементов вертикальной антенны – B , горизонтальное расстояние от антенны до источника $S - r$. Поля с каждого элемента суммируются, на выходе антенны формируется интерферограмма, к которой применяется двумерное преобразование Фурье.

Поле на выходе b -го элемента антенны, $b = \overline{1, B}$, запишем в виде суммы мод [93]

$$p_b(f, r) = \sum_m \psi_m(z_b) A_m(f, r) \exp[ih_m(f)r], \quad (5.18)$$

где $\psi_m(z)$ – собственная функция m -й моды; z_b – глубина b -го элемента антенны. Цилиндрическое расхождение поля, модальное затухание и глубина источника z_s учитываются в амплитуде мод. В (5.18) медленным изменением собственной функции от частоты пренебрегается. На выходе антенны поле источника

$$p_{an}(f, r) = \sum_b p_b(f, r) = \sum_b \sum_m \psi_m(z_b) A_m(f, r) \exp[ih_m(f)r]. \quad (5.19)$$

Интерферограмма $P_{an}(f, r) = |p_{an}(f, r)|^2$, согласно (5.18), (5.19), равна

$$P_{an}(f, r) = \sum_b \sum_a \sum_m \sum_n P_{mn}^{(ab)}(f, r), \quad (5.20)$$

где

$$P_{mn}^{(ab)}(f, r) = \psi_m(z_b) \psi_n^*(z_a) A_m(f, r) A_n^*(f, r) \exp[ih_{mn}(f)r]. \quad (5.21)$$

Пусть источник движется с радиальной скоростью w . Считаем, что расстояние r_0 соответствует начальному моменту времени $t_0 = 0$. Переходя в интерферограмме (5.20) от

переменной расстояния r к временной переменной t , $r = r_0 + wt$, и применяя к ней двумерное преобразование Фурье, получаем

$$F_{an}(v, \tau) = \int_0^{\Delta t} \int_{f_0 - \frac{\Delta f}{2}}^{f_0 + \frac{\Delta f}{2}} P_{an}(f, t) \exp[i2\pi(vt - f\tau)] dt df = \sum_b \sum_a \sum_m \sum_n F_{mn}^{(ba)}(v, \tau), \quad (5.22)$$

Используя подход при получении голограммы одиночного приемника [43], получаем

$$\begin{aligned} F_{mn}^{(ba)}(v, \tau) = & A_m(f_0, r_0) A_n^*(f_0, r_0) \psi_m(z_b) \psi_n^*(z_a) \Delta f \Delta t \times \\ & \exp \left[i2\pi \left(\frac{v\Delta t}{2} - \tau f_0 \right) \right] \exp \left\{ i \left[h_{mn}(f_0) \left(\frac{\Delta t}{2} w + r_0 \right) \right] \right\} \times \\ & \frac{\sin \left\{ 2\pi \left[(r_0 + wt_*) \frac{dh_{mn}(f_0)}{2\pi df} - \tau \right] \frac{\Delta f}{2} \right\}}{2\pi \left[(r_0 + wt_*) \frac{dh_{mn}(f_0)}{2\pi df} - \tau \right] \frac{\Delta f}{2}} \frac{\sin \left\{ [wh_{mn}(f_0) + 2\pi v] \frac{\Delta t}{2} \right\}}{[wh_{mn}(f_0) + 2\pi v] \frac{\Delta t}{2}}. \end{aligned} \quad (5.23)$$

Если положить $B = 1$, то $\psi_n^*(z_a) = \psi_n^*(z_b)$, и соотношение (5.23) переходит в выражение для одиночного приемника. Парциальные голограммы антенны и одиночного приемника отличаются множителем $\psi_m(z_b) \psi_n^*(z_a)$. Координаты максимумов фокальных пятен антенны и одиночного приемника совпадают.

Коэффициент усиления χ дается выражением (5.15), откуда, согласно (5.23), следует ожидать $\chi \approx B^2$. Равенство выполняется тогда, когда значения собственных функций мод элементов антенны на различных глубинах равны между собой, $\psi_m(z_b) = \psi_m(z_a)$, $z_b \neq z_a$. Пеленгование источника осуществляется на основе алгоритма, как это предложено по отношению к одиночному ВСП [53].

При численном моделировании исходные данные те же, что и в случае горизонтальной антенны. Элементы вертикальной антенны расположены на глубинах $z_b = 10 + 2.5(b - 1)$ м, $b = \overline{1, 21}$. Результаты численного моделирования представлены на рис. 5.7–5.10.

На рис. 5.7 приведены интерферограммы и голограммы трех элементов антенны. Конфигурация областей распределения спектральной плотности различна, несмотря на когерентное сложение полей на элементах антенны. Наблюдается смещение положения максимумов фокальных пятен. Указанное различие объясняется различным значением собственных функций на глубинах расположения элементов.

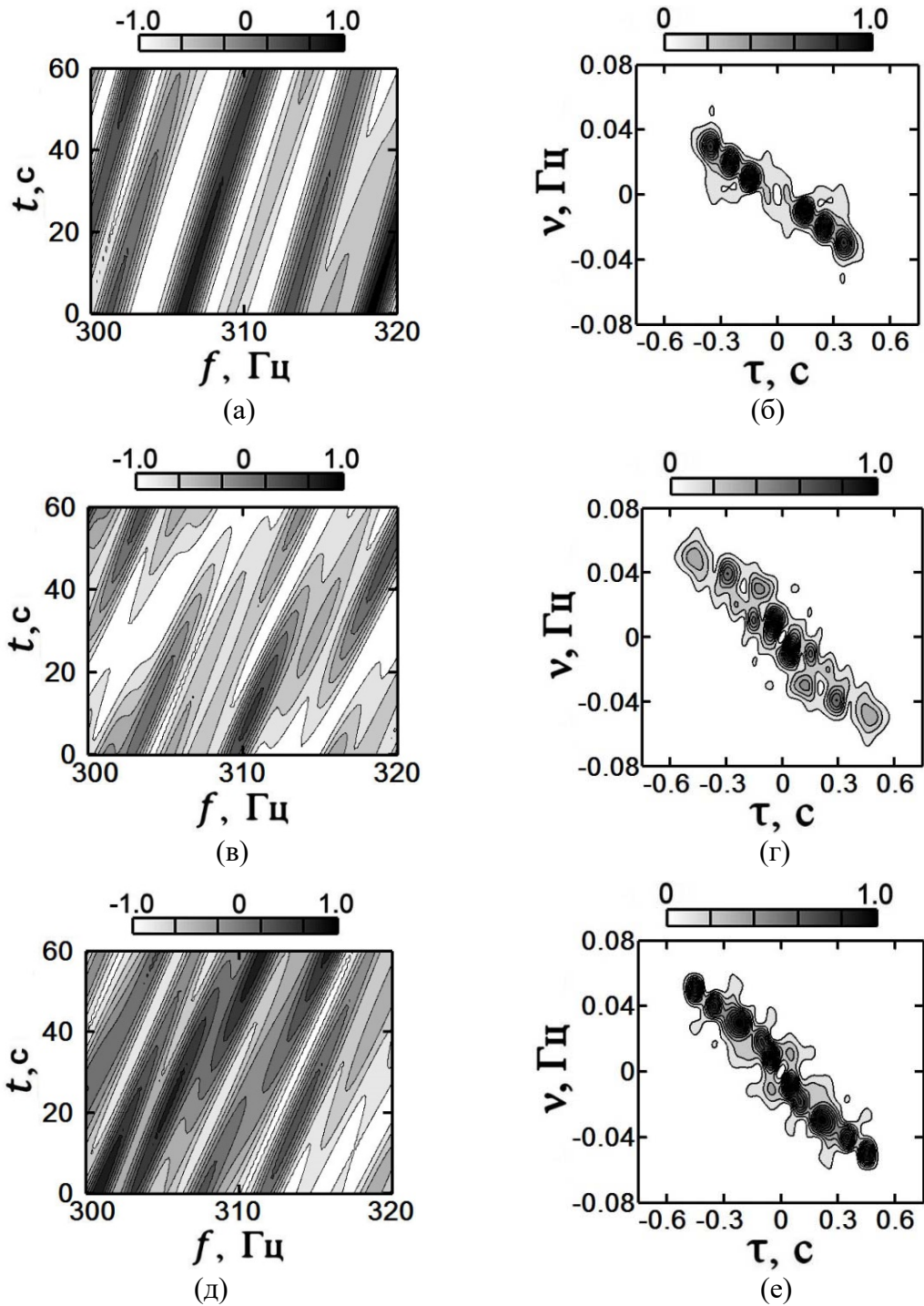


Рис. 5.7. Нормированные интерферограммы (а, в, д) и голограммы (б, г, е) элементов антенны, расположенных на глубинах $z_b = 10, 37.5, 60$ м соответственно.

Наиболее ярко это различие иллюстрирует рис. 5.8, где приведены зависимости двух нормированных спектральных максимумов $\left| \widehat{F}_b^{(1,2)} \right| = F_b^{(1,2)} / F_{\max}^{(1,2)}$ от глубины элемента антенны. Рассматривались области локализации спектральной плотности двух первых фокальных пятен рис. 5.7б. Численные расчеты отмечены точками. Распределение максимумов фокальных пятен имеет осциллирующий вид, обусловленный различным значением собственных функций мод на горизонтах приема. Характер изменения

осцилляций при изменении положения фокального пятна связан с интерференцией различных номеров мод, обуславливающих расположение локализованных областей. Отношение нормированных коэффициентов $\beta = F_{\max}^{(1)}/F_{\max}^{(2)} = 1.53$.

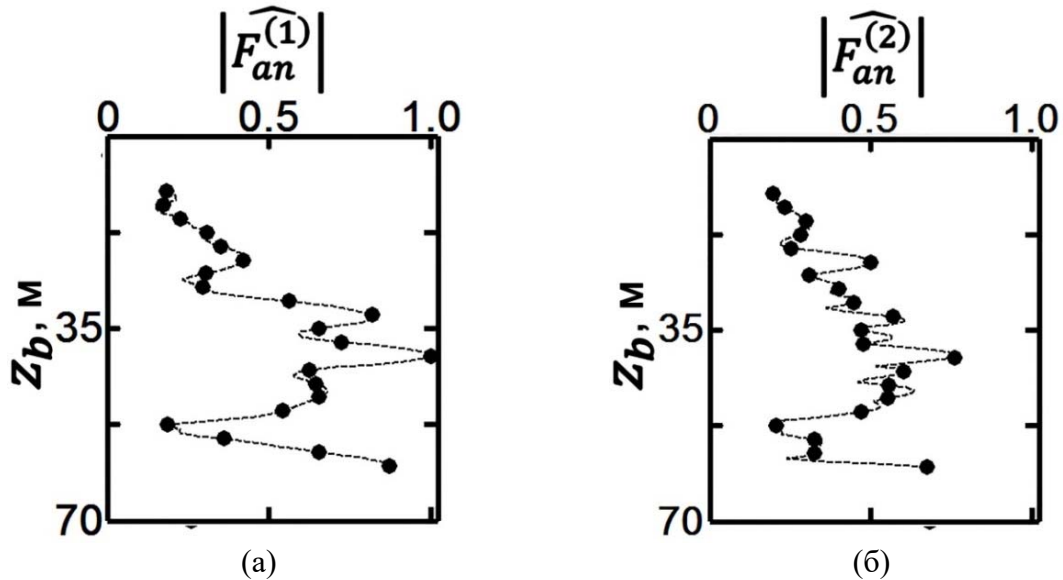


Рис. 5.8. Зависимости нормированных спектральных максимумов голограмм элементов антенны от их глубины: (а) первый максимум, $|F_b^{(1)}|$; (б) второй максимум, $|F_b^{(2)}|$.

Рис. 5.9 демонстрирует поведение нормированной интерферограммы и голограммы антенны. Спектральная плотность преимущественно локализована в области первого фокального пятна. Из сравнения рис. 5.9, 5.7, следует, что коэффициент концентрации спектральной плотности голограмм γ (2.30) при переходе от одиночного приемника к вертикальной антенне практически не меняется.

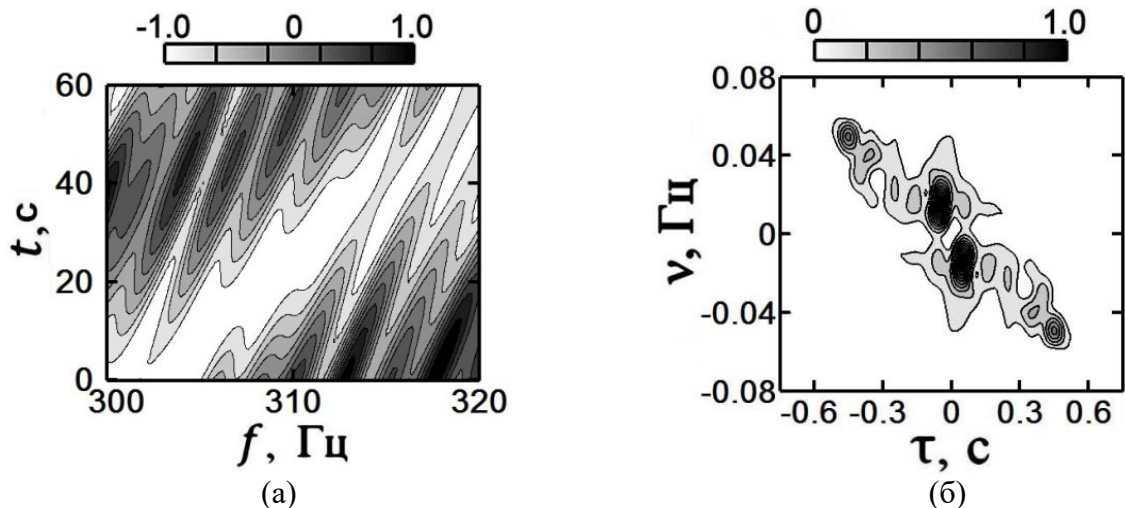


Рис. 5.9. Нормированная интерферограмма (а) и голограмма (б) антенны.

На рис. 5.10 показаны, полученные численным моделированием (точки) зависимость нормированного коэффициента усиления $\hat{\chi} = \chi(b)/\chi_{\max}$ (5.15) от числа элементов b . Расчетные значения удовлетворительно ложатся на оценочную квадратичную зависимость

$\hat{\chi} = b^2/\chi_{\max}$ (пунктир). Значение коэффициента $\chi_{\max} = 362$ получено из условия нормировки расчетных значений.

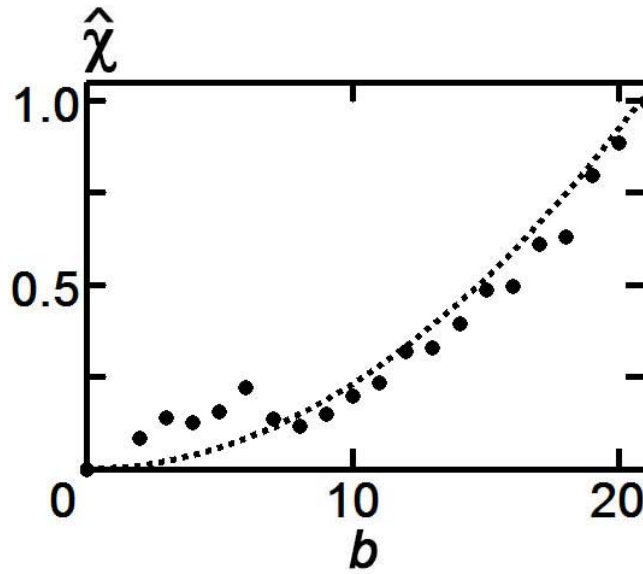


Рис. 5.10. Зависимость нормированного коэффициента усиления $\hat{\chi}$ от числа b элементов антенны. Точки – расчетные значения, пунктир – квадратичная зависимость.

В работе [59] для рассматриваемого модельного волновода представлены результаты численного моделирования голографической обработки для ширины полосы $\Delta f = 100 - 120$ Гц и числа элементов антенны $B = 20$. Элементы антенны расположены на глубинах $z_b = 3.5 + 3.5(b - 1)$ м, где $b = \overline{1, 20}$, т.е. антенна перекрывала ширину волновода.

§ 5.4. Помехоустойчивость обработки

Пределом помехоустойчивости при голографической обработке с применением антенн, как и в случае с одиночным приемником, является предельное входное отношение с/п $q_{\lim}^{(an)}$. При значении с/п на входе, которое превышает предельное ($q_0 > q_{\lim}^{(an)}$), происходит квазикогерентная аккумуляция вдоль интерференционных линий спектральной интенсивности интерферограммы [43, 46, 48]. Данный процесс позволяет устойчиво обнаруживать и оценивать параметры источника близкие к истинным значениям [43, 44, 48, 62]. В случае, когда помеха изотропная, для звукового давления шумового источника, значение $q_{\lim}^{(r)} \approx 1.5/J^2$. Здесь J - количество некоррелированных реализаций шумовых сигналов источника, обработанных за время наблюдения (1.10) [45]. Для обозначения одиночного приемника применяется верхний индекс «r». Обобщим оценку $q_{\lim}^{(r)} \approx 1.5/J^2$ на линейные антенны. Предположим, что шумовой сигнал и помеха статистически не связанные случайные процессы, на входе элементов антенны помеха не коррелирована. Для выполнения второго условия достаточно потребовать выполнения неравенства $d \geq \lambda/2$,

где λ – длина волны. Тогда, очевидно, предельное входное отношение с/п на элементе антенны оценивается как

$$q_{\text{lim}}^{(an)} = B q_{\text{lim}}^{(r)} / \chi. \quad (5.24)$$

В случае горизонтальной линейной антенны наивысшая помехоустойчивость обработки достигается при угле, равном углу компенсации, $\theta = \theta_*$, $\min q_{\text{lim}}^{(an)} = q_{\text{lim}}^{(r)} / B$. Для предельного входного отношения с/п вертикальной антенны $q_{\text{lim}}^{(an)} = q_{\text{lim}}^{(r)} / B$. Если на каждом b -м приемнике антенны вначале выполнить голографическую обработку и на выходе антенны суммировать спектральные плотности голограмм, то выигрыша в помехоустойчивости по отношению к одиночному приемнику не получится.

Для предельного (максимального) удаления r_{max} шумового источника, когда сохраняется работоспособность голографической обработки, получаем

$$r_{\text{lim}}^{(an)} = \frac{2\pi}{5\sqrt{1.5}} \sqrt{q_0 \frac{\chi}{B}} \frac{\Delta t}{|dh_{1M}(f_0)/df|}. \quad (5.25)$$

По сравнению с одиночным приемником (1.19) максимальная дальность обнаружения при применении антенны возрастает в $\sqrt{\chi/B}$ раз.

§ 5.5. Обнаружение по критерию Неймана–Пирсона

Используя рассуждения, которые привели к соотношениям для вероятностей ложной тревоги (2.39) и правильного обнаружения (2.42) одиночного приемника, можно показать, что их форма сохраняется и в случае линейных антенн. Изменяются лишь параметры, от которых они зависят. При фиксированной вероятности ложной тревоги, $p_2^{(an)} = p_2^{(r)} = p_2$, безразмерный параметр κ_n сохраняется, $\kappa_n^{(r)} = \kappa_n^{(an)} = \kappa_n$. По сравнению с одиночным приемником математическое ожидание помехи на выходе обработки возрастает в B раз, $M_n^{(an)} = B M_n^{(r)}$. Это приводит к увеличению порогового уровня также в B раз по отношению к одиночному приемнику, $g_{an} = B g_r$. С учетом этих замечаний вероятность правильного обнаружения равна

$$p_1^{(an)} = 1 - 0.5 \left[\Phi(\eta_1^{(an)}) + \Phi(\eta_2^{(an)}) \right], \quad (5.26)$$

где

$$\eta_1^{(an)} = \frac{2\kappa_n - 1 - q_{\text{ВЫХ}}^{(an)}}{2(1 + q_{\text{ВЫХ}}^{(an)})}, \quad \eta_2^{(an)} = \frac{2\kappa_n + 1 + q_{\text{ВЫХ}}^{(an)}}{2(1 + q_{\text{ВЫХ}}^{(an)})}. \quad (5.27)$$

Здесь $q_{\text{ВЫХ}}^{(an)} = (J \gamma_{an} \chi / B) q_0$ – отношение с/п на выходе антенны, где γ_{an} – коэффициент концентрации. Он определяется аналогично одиночному приемнику и не зависит от угла наблюдения θ и числа элементов антенны, $\gamma_{an} = \gamma_r = \gamma$ [61]. По сравнению с одиночным

приемником выходное отношение с/п повышается примерно в B раз. При анализе вероятности правильного обнаружения область входных отношений с/п на элементах антенны ограничена значениями $q_0 > 1.5(B/\chi)/J^2$.

Степень различия в вероятностях правильного обнаружения между одиночным приемником и антенной в зависимости от входного отношения с/п и числа элементов антенны при заданной вероятности ложной тревоги будем характеризовать отношением

$$\beta(q_0, B) = p_1^{(an)}(q_0, B)/p_1^{(r)}(q_0). \quad (5.28)$$

Параметр $\beta(q_0, B)$ (5.28) назовем коэффициентом эффективности. При рассмотрении коэффициента эффективности $\beta(q_0, B)$ область входных отношений с/п q_0 ограничена областью значений $q_0 \geq q_{\text{lim}}^{(r)}$.

Ограничимся рассмотрением кривых обнаружения вертикальной антенны, так как для вертикальной и горизонтальной антенн они идентичны [65, 66]. В рамках численного эксперимента применялся гидроакустический волновод со следующими параметрами. Глубина $H = 70$ м. Скоростью звука в водном слое $c = 1480$ м/с. Отношение плотностей донного и водного слоев $\rho = 1.8$. Показатель преломления донного слоя – комплексный: $n = 0.84(1 + i0.04)$.

Диапазон частот $f = 480\text{--}520$ Гц. Средняя частота спектра $f_0 = 500$ Гц. Число элементов антенны $B = 3, 7, 11$. Межэлементное расстояние $d = 1.5$ м, что примерно равно половине длине волны на частоте $f_0 = 500$ Гц. Элементы вертикальной антенны расположены на глубинах $z_b = 40 + 1.5(b - 1)$ м. $b = \overline{1, B}$

Шумовой источник расположен на глубине $z_s = 20$ м и с радиальной скоростью $w = 2$ м/с удалялся от антенны. В начальный момент времени $t_0 = 0$ горизонтальное расстояние между источником и антенной равно $r_0 = 10$ км. Время накопления $\Delta t = 30$ с, длительность шумовой реализации $\delta t_1 = 2$ с, временной интервал $\delta t_2 = 0.5$ с, число шумовых реализаций $J = 12$. Предельные входные отношения с/п: одиночный приемник – $q_{\text{lim}}^{(r)} \approx 10^{-2}$; антенна – $q_{\text{lim}}^{(an)} \approx 3 \cdot 10^{-3}$ ($B = 3$), $q_{\text{lim}}^{(an)} \approx 10^{-3}$ ($B = 7$), $q_{\text{lim}}^{(an)} \approx 9 \cdot 10^{-4}$ ($B = 11$). Вероятности ложной тревоги $p_2 = 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}$.

Согласно численным расчетам коэффициенты усиления антенны χ равны: 8.2 ($B = 3$), 47.1 ($B = 7$), 118.7 ($B = 11$). Они близки теоретической оценке $\chi = B^2$.

Иллюстративный материал изображен на рис. 5.11–5.14. Рис. 5.11 демонстрирует нормированные интерферограммы и модули голограмм в отсутствие помехи для одиночного приемника на глубине $z_b = 49$ м и семи элементной антенны.

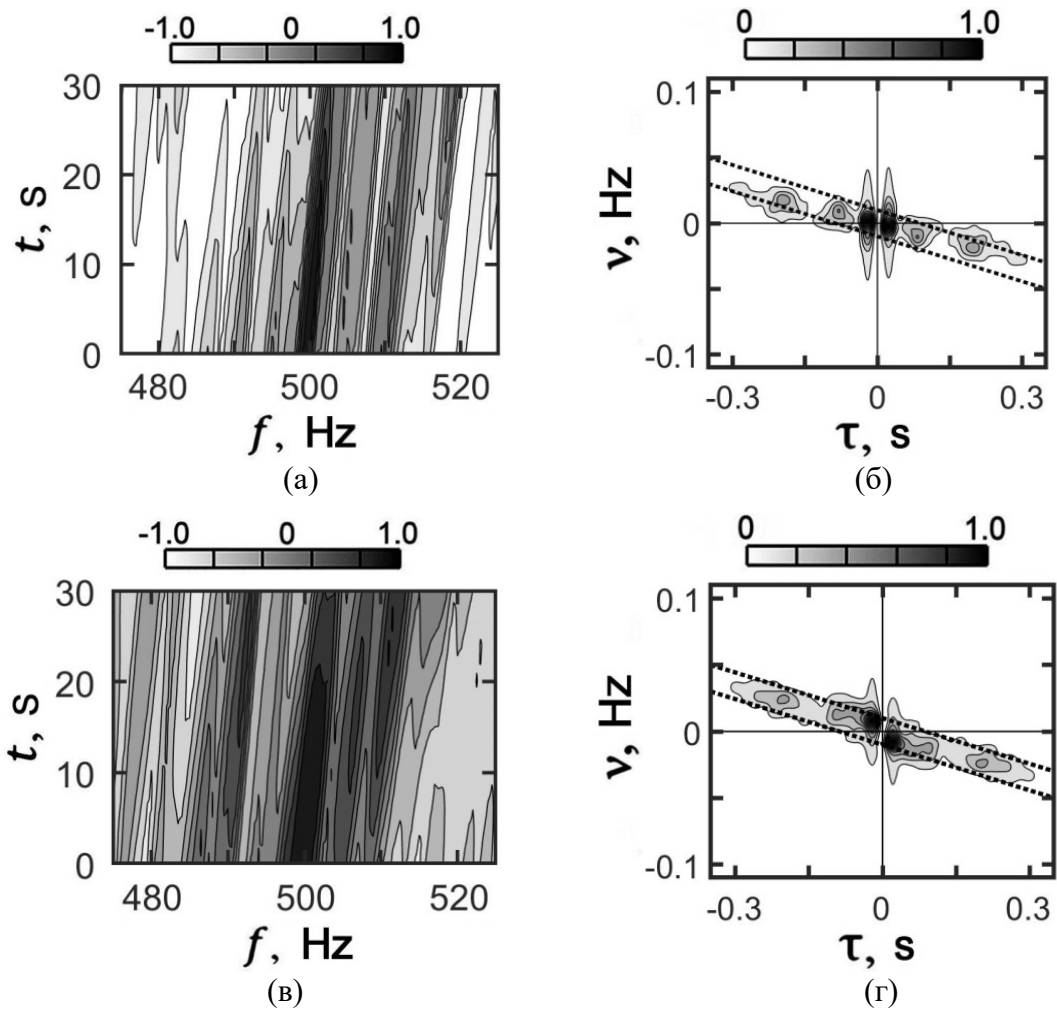


Рис. 5.11. Нормированные интерферограммы (а, в) и модули голограмм (б, г) одиночного приемника (а, б) и семи элементной антенны (в, г) в отсутствие помехи.

С целью повышения контрастности на интерферограммах отфильтрованы постоянные составляющие. Если постоянную составляющую не вычитать из интерферограмм до применения преобразования Фурье, то на голограммах в области начала координат появится острый пик большой интенсивности. Из рис. 5.11(б, г) следует, что геометрия расположения спектральной плотности для одиночного приемника и антенны близки между собой. Коэффициент концентрации, согласно рис. 5.11(б, г), оценивается как $\gamma = 6$. Это значение сопоставимо с теоретической оценкой $\gamma = 2\pi|v_{M-1}|\Delta t = 4.7$, где $|v_{M-1}| = 0.025$ Гц.

На рис. 5.12 представлены кривые обнаружения шумового сигнала для одиночного приемника. С уменьшением вероятности ложной тревоги вероятность правильного обнаружения уменьшается. По результатам вычислений параметр $\kappa_n = 1.42$ ($p_2 = 10^{-1}$), $\kappa_n = 2.14$ ($p_2 = 10^{-2}$), $\kappa_n = 2.72$ ($p_2 = 10^{-3}$).

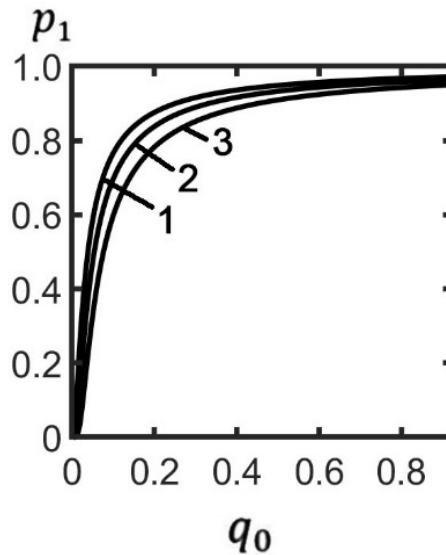


Рис. 5.12. Зависимость вероятности правильного обнаружения p_1 от входного отношения с/п q_0 для различных значений вероятностей ложной тревоги p_2 : кривая 1 – $p_2 = 10^{-1}$, кривая 2 – $p_2 = 10^{-2}$, кривая 3 – $p_2 = 10^{-3}$. Одиночный приемник.

Кривые обнаружения шумового сигнала с применением антенны приведены на рис. 5.13. Они демонстрируют тенденцию возрастания вероятности правильного обнаружения p_1 с увеличением числа элементов антенны B при заданной вероятности ложной тревоги p_2 . Например, для вероятности ложной тревоги $p_2 = 10^{-3}$ вероятность правильного обнаружения $p_1 = 0.8$ достигается при входных отношениях с/п: $q_0 = 3.1 \cdot 10^{-2}$ ($B = 3$); $q_0 = 1.2 \cdot 10^{-2}$ ($B = 7$); $q_0 = 7.7 \cdot 10^{-3}$ ($B = 11$).

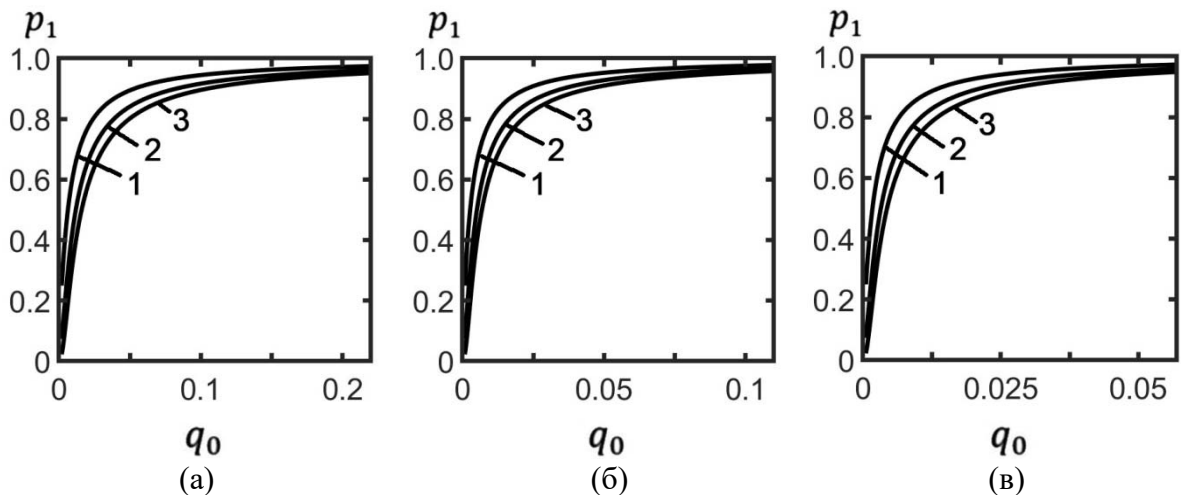


Рис. 5.13. Зависимость вероятности правильного обнаружения p_1 от входного отношения с/п q_0 для различных значений вероятностей ложной тревоги p_2 и числа элементов антенны B . Кривая 1 – $p_2 = 10^{-1}$, кривая 2 – $p_2 = 10^{-2}$, кривая 3 – $p_2 = 10^{-3}$. $B = 3$ (а), $B = 7$ (б), $B = 11$ (в).

На рис. 5.14 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.

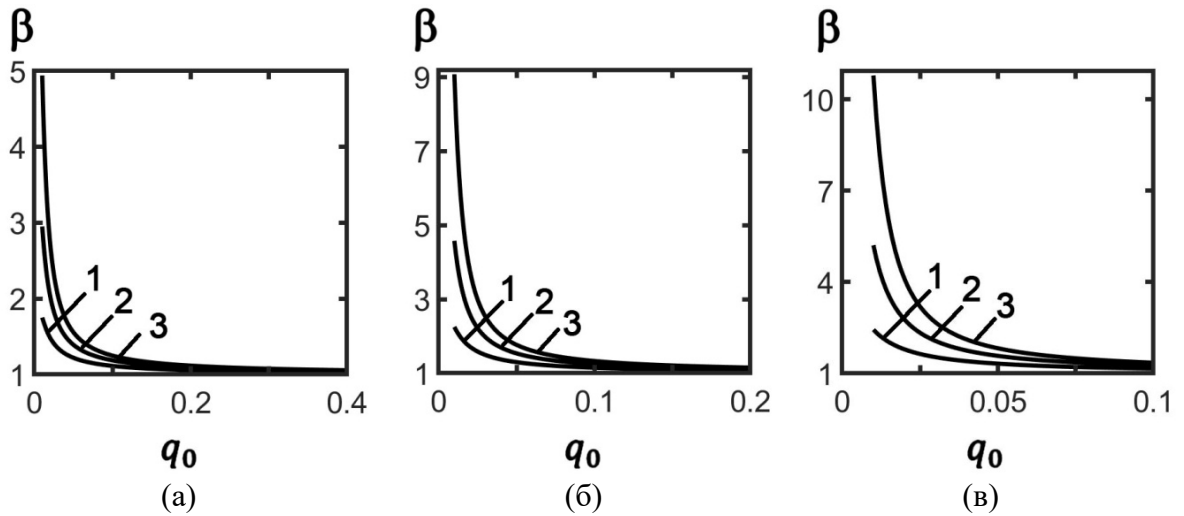


Рис. 5.14. Зависимость коэффициента эффективности β от входного отношения с/п q_0 для различных значений вероятностей ложной тревоги p_2 и числа элементов антенны B . Кривая 1 – $p_2 = 10^{-1}$, кривая 2 – $p_2 = 10^{-2}$, кривая 3 – $p_2 = 10^{-3}$. $B = 3$ (а), $B = 7$ (б), $B = 11$ (в).

§ 5.6. Выводы

Изложена голографическая обработка гидроакустической информации с использованием линейных горизонтальных и вертикальных антенн. Получены выражения, связывающие двумерную спектральную плотность на выходе двумерного преобразования Фурье интерференционной картины, формируемой движущимся источником, с апертурой и угловой зависимостью принимаемого поля. Предложен способ оценки коэффициента усиления и характеристики направленности антенны при такой обработке. Приведена оценка помехоустойчивости обработки. Развитая теория позволяет анализировать эффективность интерферометрической обработки с применением антенны по отношению к одиночному приемнику. В зависимости от входного отношения с/п на элементе антенны получено выражение для максимального удаления шумового источника, при котором сохраняется устойчивое обнаружение и оценки пеленга, радиальной скорости, удаления и глубины близки реальным значениям. Представлены и обсуждены результаты численного моделирования.

На основе критерия Неймана–Пирсона решена задача обнаружения шумового сигнала с применением линейных антенн. Получены выражения для вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги в зависимости от отношения с/п и числа элементов антенны. Проведены расчеты кривых обнаружения шумового сигнала. Оценена эффективность обнаружения сигнала с использованием антенны по отношению к одиночному приемнику.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 натурного 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сазонтов А.Г., Малеханов А.И. Согласованная пространственная обработка сигналов в подводных звуковых каналах (обзор) // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 2. С. 233–253.
2. Кузькин В.М., Матвиенко Ю.В., Пересёлков С.А. Применение интерферометрической обработки для локализации малошумных источников звука // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4 (30). С. 49–57.
3. Baggeroer A.B., Kuperman W.A., Mikhalevsky P.N. An overview of matched in ocean acoustics // IEEE J. Ocean. Eng. 1993. Vol. 18. P. 401–424.
4. Buckner H.P. Use of calculated sound fields and matched field detection to locate sound sources in shallow water // J. Acoust. Soc. Am. 1976. Vol. 59. No. 2. P. 368–373.
5. Capon J. High resolution frequency-wavenumber spectral analysis // Proc. IEEE. 1969. Vol. 57. No. 8. P. 1408–1418.
6. Schmidt R.O. Multiple emitter location and signal parameter estimation // IEEE Trans. 1986. Vol. 34. No. 3. P. 276–280.
7. Shang E.C., Wang Y.Y. Environmental mismatching effects on source localization processing in mode space // J. Acoust. Soc. Am. 1991. Vol. 89. No. 5. P. 2285–2290.
8. DelBalzo D.R., Feuillade C., Rowe M.M. Effects of water depth mismatch on matched field localization in shallow water // J. Acoust. Soc. Am. 1988. Vol. 83. No. 6. P. 2180–2185.
9. Feuillade C., DelBalzo D.R., Rowe M.M. Environmental mismatch in shallow water matched field processing: geoacoustic parameter variability // J. Acoust. Soc. Am. 1989. Vol. 85. No. 6. P. 2354–2364.
10. Jesus S.M. Normal mode matching localization in shallow water: environmental and system mismatch // J. Acoust. Soc. Am. 1991. Vol. 90. No. 4. P. 2034–2041.
11. Daugherty J.R., Lynch J.F. Surface wave, internal wave, and source motion effects on matched field processing in a shallow water waveguide // J. Acoust. Soc. Am. 1990. Vol. 87. No. 6. P. 2503–2526.
12. Yoo K., Yang T.C. Broadband source localization in shallow water in the presence of internal waves // J. Acoust. Soc. Am. 1999. Vol. 106. No. 6. P. 3255–3269.
13. Byrne C.L. Effects of modal phase errors on eigenvector and nonlinear methods for source localization in matched field processing // J. Acoust. Soc. Am. 1992. Vol. 92. No. 4. P. 2159–2164.
14. Schmidt H., Baggeroer A.B., Kuperman W.A., Scheer E.K. Environmentally tolerant beam forming for high resolution matched field processing: deterministic mismatch // J. Acoust. Soc. Am. 1990. Vol. 88. No. 4. P. 1851–1862.

15. Tabrikian J., Krolik J.L., Messer H. Robust maximum likelihood source localization in an uncertain shallow water waveguide // J. Acoust. Soc. Am. 1997. Vol. 101. No. 1. P. 241–249.
16. Collins M.D., Kuperman W.A. Focalization: Environmental focusing and source localization // J. Acoust. Soc. Am. 1991. Vol. 90. No. 3. P. 1410–1422.
17. Shahbazpanahi S., Gershman A.B., Luo Z.Q., Wong K.M. Robust adaptive beam forming for general rank signal models // IEEE J. Trans. Signal Process. 2003. Vol. 51. No. 9. P. 2257–2269.
18. Zari K., Shahbazpanahi S., Gershman A.B., Luo Z.-Q. Robust blind multiuser detection based on the worst-case performance optimization of the MMSE receiver // IEEE J. Trans. Signal Process. 2005. Vol. 53. No. 1. P. 295–305.
19. Krolik J.L. Matched-field minimum variance beam forming in a random ocean channel // J. Acoust. Soc. Am. 1992. Vol. 92. No 3. P. 1408–1419.
20. Morgan D.R., Smith T.M. Coherence effects on the detection performance of quadratic array processors with application to large-array matched-field beam forming // J. Acoust. Soc. Am. 1990. Vol. 87. No. 2. P. 737–747.
21. Valaee S., Champagne B., Kabal P. Parametric localization of distributed sources // IEEE J. Trans. Signal Process. 1995. Vol. 43. No 9. P. 2144–2153.
22. Meng Y, Stoica P., Wong K.M. Estimation of the directions of arrival of spatially dispersed signals in array processing / Proceedings IEE Conf. on Radar, Sonar, and Navig. 1996. Vol. 143. No. 1. P. 1–9.
23. Viberg M., Ottersten B. Sensor array processing based on signal subspace fitting // IEEE J. Trans. Signal Process. 1991. Vol. 39. No. 5. P. 1110–1121.
24. Besson O., Vincent F., Stoica P., Gershman A.B. Approximate maximum likelihood estimators for array processing in multiplicative noise environments // IEEE J. Trans. Signal Process. 2000. Vol. 48. No 9. P. 2506–2518.
25. Czenszak S.P., Krolik J.L. Robust wideband matched field processing with a short vertical array // J. Acoust. Soc. Am. 1997. Vol. 101. No. 2. P. 740–759.
26. Soares S., Jesus S.M. Environmental inversion using high-resolution matched field processing // J. Acoust. Soc. Am. 2007. Vol. 122. No. 6. P. 3391–3404.
27. Doron M.A., Weis A.J. On focusing matrices for wideband array processing // IEEE J. Trans. Signal Process. 1992. Vol. 40. No. 6. P. 1295–1302.
28. Valaee S., Kabal P. Wideband array processing using two-sided correlation transformation // IEEE J. Trans. Signal Process. 1995. Vol. 43. No. 1. P. 150–172.

29. Чупров С.Д. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане / Акустика океана. Современное состояние. М.: Наука, 1982. С. 71–82.
30. Орлов Е.Ф. Интерференционная структура широкополосного звука в океане / Проблемы акустики океана. М.: Наука, 1984. С. 85–93.
31. Ocean acoustic interference phenomena and signal processing (San Francisco, CA, May 1–3, 2001; AIP Conf. Proc.), Ed. by Kuperman W.A. and D'Spain G.L. N.Y.: Melville, 2002.
32. Thode A.M. Source ranging with minimal environmental information using a virtual receiver and waveguide invariant theory // J. Acoust. Soc. Am. 2000. Vol. 108. No. 4. P. 1582–1594.
33. Rouseff D., Spindel R.C. Modeling the waveguide invariant as a distribution // AIP Conf. Proc. 2002. 621. P. 137–150.
34. Quijano J.E., Zurk L.M., Rouseff D. Demonstration of the invariance principle for active sonar // J. Acoust. Soc. Am. 2008. Vol. 123. No. 3. P. 1329–1337.
35. Tao H., Krolik J.L. Waveguide invariant focusing for broadband beam forming in an oceanic waveguide // J. Acoust. Soc. Am. 2008. Vol. 123. No. 3. P. 1338–1346.
36. Cocrell K.L., Smidt H. Robust passive range estimation using the waveguide invariant // J. Acoust. Soc. Am. 2010. Vol. 127. No. 5. P. 2780–2789.
37. Rouseff D., Zurk L.M. Striation based beam forming for estimating the waveguide invariant with passive sonar // J. Acoust. Soc. Am. Express Lett. 2011. Vol. 130. No. 2. P. 76–81.
38. Беседина Т.Н., Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Пересёлков С.А. Локализация источника звука в океанических волноводах // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 2. С. 207–215.
39. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A. Estimation of the velocity of underwater objects in the passive mode using frequency-shift data // Phys. Wave Phenom. 2014. Vol. 22. No. 4. P. 306–311.
40. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Prosovetskiy D.Yu. Interferometric method for estimating the sound source velocity in an oceanic waveguide // Phys. Wave Phenom. 2016. Vol. 24. No. 4. P. 317–323.
41. Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Просовецкий Д.Ю. Помехоустойчивость интерферометрического метода оценки скорости источника звука в мелком море // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 5. С. 556–572.
42. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 480 с.
43. 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.

44. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Prosovetskiy D.Yu. Spectrograms of single-type modes and their application to problems of sound source localization in oceanic waveguides // *Phys. Wave Phenom.* 2017. Vol. 25. No. 1. P. 64–73.
45. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Kaznachheev I.V. Noise source localization shallow water // *Phys. Wave Phenom.* 2017. Vol. 25. No. 2. P. 156–163.
46. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Kaznachheev I.V., Grigor'ev V.A. Interferometric method for estimating the velocity of a noise sound source and the distance to it in shallow water using a vector-scalar receiver // *Phys. Wave Phenom.* 2017. Vol. 25. No. 4. P. 299–306.
47. Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Переселков С.А. Локализация источника звука в океаническом волноводе // *Изв. РАН. Серия физическая.* 2017. Т. 81. № 8. С. 1041–1047.
48. 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.
49. Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Казначеев И.В., Ткаченко С.А. Разрешение шумовых источников // *Вестн. ВГУ. Серия: Физика. Математика.* 2018. № 1. С. 5–24.
50. Kuz'kin V.M., Kuznetsov G.N., Pereselkov S.A., Grigor'ev V.A. Resolving power of the interferometric method of source localization // *Phys. Wave Phenom.* 2018. Vol. 26. No. 2. P. 150–159.
51. Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Казначеев И.В., Ткаченко С.А. Метод определения местоположения малозумного источника звука // *Вестн. ВГУ. Серия: Физика. Математика.* 2018. № 2. С. 53–63.
52. Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Kuznetsov G.N., Kaznachheev I.A. Interferometric direction finding by a vector-scalar receiver // *Phys. Wave Phenom.* 2018. Vol. 26. No. 1. P. 63–73.
53. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Lyakhov G.A., Pereselkov S.A., Prosovetskiy D.Yu. Direction finding of a noise sound source // *Phys. Wave Phenom.* 2019. Vol. 27. No. 3. P. 237–241.
54. Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Матвиенко Ю.В., Ткаченко С.А. Обнаружение источника в диспергирующих средах // *РЭНСИТ.* 2019. Т. 11. № 3. С. 337–344.
55. Kaznachheeva E.S., Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Lyakhov G.A., Pereselkov S.A. Measurement capability of the interferometric method of sound source localization in the absence of data on the waveguide transfer function // *Phys. Wave Phenom.* 2019. Vol. 27. No. 1. P. 73–78.

56. Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Рыбнянец П.В., Ткаченко С.А. Реализация адаптивного интерферометрического метода локализации источника звука. I ЧАСТЬ // Вестн. ВГУ. Серия: Физика. Математика. 2019. № 4. С. 19–29.
57. Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Ткаченко С.А. Реализация адаптивного интерферометрического метода локализации источника звука. II ЧАСТЬ // Вестн. ВГУ. Серия: Физика. Математика. 2020. № 1. С. 14–23.
58. Kaznacheeva E.S., Kuz'kin V.M., Lyakhov G.A., Pereselkov S.A., Tkachenko S.A. Adaptive algorithms for interferometric processing // Phys. Wave Phenom. 2020. Vol. 28. No. 3. P. 267–273.
59. Кузькин В.М., Матвиенко Ю.В., Пересёлков С.А., Казначеева Е.С.. Интерферометрическая обработка с использованием вертикальной линейной антенны // Вестн. ВГУ. Серия: Физика. Математика. 2020. № 2. С. 14–23.
60. Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Ткаченко С.А., Казначеев И.В. Интерферометрическая обработка акустической информации с использованием протяженных антенн в диспергирующих средах // РЭНСИТ. 2020, Т. 12. № 4. С. 483–494.
61. Kaznacheev I.V., Kuz'kin V.M., Kutsov M.V., Lyakhov G.A., Pereselkov S.A. Interferometry in acoustic-data processing using extended antennas. Space–time analogy // Phys. Wave Phenom. 2020. Vol. 28. No. 4. P. 326–332.
62. Кузькин В.М., Кузнецов Г.Н., Пересёлков С.А. Акустическая интерферометрия в задачах пассивной локализации источников звука, подводной связи и мониторинга океанических неоднородностей // Изв. РАН. Серия физическая. 2020. Т. 84. № 6. С. 794–798.
63. Kuz'kin V.M., Lyakhov G.A., Pereselkov S.A., Matvienko Yu. V., Tkachenko S.A. Noise-source detection in an oceanic waveguide using interferometric processing // Phys. Wave Phenom. 2020. Vol. 28. No. 1. P. 68–74.
64. 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 роботехника. 2021. № 4 (38). С. 80–85.
65. Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Matvienko Yu.V., Tkachenko S.A. Detection of a noise signal in an oceanic waveguide using a vertical array // Phys. Wave Phenom. 2021. Vol. 29. No. 4. P. 321–326.

66. Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Матвиенко Ю.В., Ткаченко С.А., Просовецкий Д.Ю. Обнаружение шумового сигнала в океаническом волноводе горизонтальной антенной // РЭНСИТ. 2022. Т. 14. № 1. С. 65–72.
67. Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Казначеева Е.С., Грачев В.И., Ткаченко С.А., Рыбьянец П.В. Голографическая обработка движущихся источников в мелком море при наличии интенсивных внутренних волн // РЭНСИТ. 2022. Т. 14. № 2. С. 197–204.
68. Матвиенко Ю.В., Хворостов Ю.А., Каморный А.В., Глущенко М.Ю., Кузькин В.М., Пересёлков С.А. Экспериментальные исследования системы обнаружения малошумных подводных целей в мелководных акваториях // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 3(41). С. 4–14.
69. Pereselkov S.A., Kuz'kin V.M. Interferometric processing of hydroacoustic signals for the purpose of source localization // J. Acoust. Soc. Am. 2022. Vol. 151. No. 2 P. 666–676.
70. Ehrhardt M., Pereselkov S., Kuz'kin V., Kaznacheev I., Rybyaners P. Experimental observation and theoretical analysis of the low-frequency source interferogram and hologram in shallow water // Sound and Vibration. 2023. Vol. ?, No. ?, P. ?.
71. Беседина Т.Н., Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Пересёлков С.А. Определение глубины источника звука в мелком море на фоне интенсивного шума // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 6. С. 718–728.
72. Besedina T.N., Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Prosovetskiy L.Yu. Estimation of the depth of an immobile sound source in shallow water // Phys. Wave Phenom. 2015. Vol. 23. No. 4. P. 292–303.
73. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Prosovetskiy D.Yu. Wave method for estimating the sound source depth in a oceanic waveguide // Phys. Wave Phenom. 2016. Vol. 24. No. 4. P. 310–316.
74. Кузькин В.М., Куцов М.В., Пересёлков С.А. Пространственная интерференция нормальных волн в океанических волноводах // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 4. С. 376–383.
75. Кузькин В.М., Луньков А.А., Пересёлков С.А. Корреляционный метод измерения частотных сдвигов максимумов звукового поля, вызванных возмущениями океанической среды // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 5. С. 655–661.
76. Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Zvyagin V.G., Malykhin A.Yu. Prosovetskiy D.Yu. Intense internal waves and their manifestation in interference patterns of received signals on oceanic shelf // Phys. Wave Phenom. 2018. Vol. 26. No. 2. P. 160–167.

77. Badiey M., Kuz'kin V.M., Lyakhov G.A., Pereselkov S.A., Prosovetskiy D.Yu., Tkachenko S.A. Intense internal waves and their manifestation in the interference patterns of received signals on oceanic shelf. Part II // *Phys. Wave Phenom.* 2019. Vol. 27. No. 4. P. 313–319.
78. Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Кузнецов Г.Н., Малыхин А.Ю., Ткаченко С.А. Применение голографии для передачи изображения источника через случайно-неоднородную океаническую среду // *Вестн. ВГУ. Серия: Физика. Математика.* 2019. № 1. С. 39–50.
79. Бади М., Кузькин В.М., Пересёлков С.А. Интерферометрия гидродинамики океанического шельфа, вызванной интенсивными внутренними волнами // *Фундам. прикл. гидрофиз.* 2020. Т. 13. № 1. С. 45–55.
80. Пересёлков С.А., Кузькин В.М., Badiey M., Казначеев И.В., Ткаченко С.А. Интерферограмма звукового поля при наличии интенсивных внутренних волн на океаническом шельфе // *Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та.* 2020. № 1. С. 2010102-1–2010102-5.
81. Кузькин В.М., Ляхов Г.А., Пересёлков С.А., Казначеева Е.С. Передача информации через случайно-неоднородную океаническую среду // *Фундам. прикл. гидроф.* 2021. Т. 14. № 2. С. 54–64.
82. Кузькин В.М., Бади М., Пересёлков С.А., Казначеева Е.С. Применение голографической интерферометрии для передачи информации через возмущенную океаническую среду // *Изв. РАН. Серия физическая.* 2021. Т. 85. № 2. С. 276–281.
83. Kaznacheeva E.S., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A. Interferometric processing of hydroacoustic information in the presence of intense internal waves // *Phys. Wave Phenom.* 2021. Vol. 29. No. 3. P. 278–284.
84. Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Казначеева Е.С. Оценка погрешности восстановления интерферограммы невозмущенного звукового поля, искаженного интенсивными внутренними волнами // *Изв. РАН. Серия физическая.* 2022. Т. 86. № 2. С. 263–268.
85. Bonnel J., Chapman N.R. Geoacoustic inversion in a dispersive waveguide using warping operators // *J. Acoust. Soc. Am.* 2011. Vol. 130. P. EL101–EL107.
86. Bonnel J., Gervaise C., Nicolas B., Mars J.I. Single-receiver geoacoustic inversion using modal reversal // *J. Acoust. Soc. Am.* 2012. Vol. 131. No. 1. P. 119–128.
87. Niu H., Zhang R., Li Z. Theoretical analysis of warping operators for non-ideal shallow water waveguides // *J. Acoust. Soc. Am.* 2014. Vol. 136. No. 1. P. 53–65.
88. Bonnel J., Caporale S., Thode A. Waveguide mode amplitude estimation using warping and phase compensation // *J. Acoust. Soc. Am.* 2017. Vol. 141. No. 3. P. 2243–2255.

89. Brown M.G. Time-warping in underwater acoustic waveguides // J. Acoust. Soc. Am. 2020. Vol. 147. No. 2. P. 898–910.
90. Kuz'kin V.M., Matvienko Yu.V., Pereselkov S.A., Prosovetskii D.Yu., Kaznacheeva E.S. Mode selection in oceanic waveguides // Phys. Wave Phenom. 2022. Vol. 30. No. 2. P. 111–118.
91. Kuz'kin V.M., Matvienko Yu.V., Pereselkov S.A., Kaznacheeva E.S., Tkachenko S.A. Holographic method for mode selection in a shallow sea in the presence of intense internal waves // Phys. Wave Phenom. 2022. Vol. 30. No. 5. P. 314–320.
92. Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Казначеева Е.С., Грачев В.И., Ткаченко С.А., Рыбьянец П.В. Выделение мод шумового источника в мелком море методом голографической интерферометрии в присутствии интенсивных внутренних волн // РЕНСИТ. 2022. Т. 14. № 3. С. 279–286.
93. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. М.: Наука, 2007. 370 с.
94. Хворостов Ю.А., Матвиенко Ю.В., Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Ткаченко С.А. Спектральные характеристики шумового поля малогабаритного автономного необитаемого подводного аппарата в дальней зоне // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 4 (42). С. 84–88.
95. Пересёлков С.А., Кузькин В.М., Казначеева Е.С., Ткаченко С.А. Обнаружение шумового источника / Докл. XVII школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских, совмещенной с XXXIII сессией Российского акустического общества. М.: ИО РАН, 2020. С. 271–275.
96. Caiti A, Munafo A., Vettori G. A geographical information system (gis)-based simulation tool to assess civilian harbor protection levels // IEEE J. Oceanic Engineering. 2012. Vol. 37. No. 1. P. 85–102.
97. Матвиенко Ю.В., Хворостов Ю.А., Каморный А.В., Глущенко М.Ю., Кузькин В.М., Пересёлков С.А. Экспериментальные исследования системы обнаружения малозумных подводных целей в мелководных акваториях // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 3 (41). С. 4–14.
98. Lin Y. et al. Multi autonomous underwater vehicle system for autonomous tracking of marine life // J. Field Robotics. 2017. Vol. 34. No. 4. P. 757–774.
99. Inzartsev A., Pavin A., Panin M., Tolstonogov A., Eliseenko G. Detection and inspection of local bottom objects with the help of a group of special-purpose AUVs // Proc. OCEANS 2018 MTS/IEEE Conference. Kobe, Japan, 2018.

100. Inzartsev A., Pavin A. AUV behavior algorithm while inspecting of partly visible pipeline // Proc. OCEANS 2006 MTS/IEEE Conference. Boston, MA, USA, 2006.
101. Горнак В.Е., Инзарцев А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Щербатюк А.Ф. ММТ-3000 – новый малогабаритный автономный необитаемый подводный аппарат ИПМТ ДВО РАН // Подводные исследования и робототехника. 2007. № 1 (3). С. 12–20.
102. Хворостов Ю.А., Матвиенко Ю.В. Характеристики собственного шумоизлучения малогабаритного АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4 (30). С. 58–63.
103. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983. 320 с.
104. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982. 624 с.
105. Пересёлков С.А., Кузькин В.М., Кузнецов Г.Н., Просовецкий Д.Ю., Ткаченко С.А. Интерференционный метод оценки координат движущегося шумового источника в мелком море с использованием высокочастотных сигналов // Акуст. журн. 2020. Т. 66. № 4. С. 437–445.
106. Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Просовецкий Д.Ю., Ткаченко С.А. Идентификация высокочастотного шумового источника / XXVI Международная научно-техническая конференция «Радиолокация. Навигация. Связь» (RLNC*2020). Сборник трудов, 2020. Т. 4. Секция 6: Навигация. Позиционирование. Морская локация и навигация. Гидроакустика. Системы наведения. С. 163–174.
107. Аверьянов А.В., Глебова Г.М., Кузнецов Г.Н., Смирнов Н.М. Экспериментальная оценка пространственных координат источника шумового сигнала // Гидроакустика. 2013. Вып. 17 (1). С. 54–60.
108. Вировлянский А.Л., Казарова А.Ю., Кенигсбергер Г.В., Колодиев О.В., Коротин П.И., Любавин Л.Я., Моисеенков В.И., Орлов Д.А., Потапов О.А., Турчин В.И. Эксперимент по оценке координат источника звука на шельфе черного моря // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 1. С. 1–9.
109. Полканов К.И., Кузнецов Г.Н., Михнюк А.Н., Смирнов Н.М. Использование буксируемого векторно-скалярного модуля и согласованной фильтрации для однозначной оценки координат широкополосного источника в пассивном режиме // Гидроакустика. 2015. Вып. 24 (4). С. 36–51.
110. Казначеева Е.С., Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Просовецкий Д.Ю., Рыбняц П.В., Ткаченко С.А. Использование горизонтальной линейной антенны для формирования голограммы в океаническом волноводе // Сборник трудов XXVIII Международной

- научно-технической конференции «Радиолокация. Навигация. Связь», посвященной памяти Б.А. Осипова. 2022. Т. 3. Секция 6. С. 372–381.
111. Pereselkov S., Kuz'kin V., Kaznacheev I., Thachenko S., Rybyanets P. Hologram formation by using vertical antenna in a shallow water waveguide // J. Acoust. Soc. Am. 2022. 152. A297.
112. Ландсберг ГС. Оптика. М., Наука, 1976, 928 с.