

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ ИСТОЧНИКА

Н.В. Злобина, С.Б. Касаткин

Представлена спектральная обработка экспериментальных данных, полученных разнесенной приемной системой на основе комбинированных приемников. В рассмотренных экспериментах изменялось расстояние между движущимся объектом и приемной системой, горизонт позиционирования движущегося подводного объекта, горизонт позиционирования приемной системы. Целью анализа является определение сигнальных составляющих малошумного объекта и других особенностей звукового поля источника в условиях мелкого моря и при наличии шумов ближнего судоходства с помощью скалярного, векторного и тензорного описания звукового поля.

Ключевые слова: комбинированный приёмник, мелкое море, спектральная плотность мощности, вектор интенсивности, обработка сигналов

Введение

Значительное место в прикладной гидроакустике занимает проблема обнаружения подводных источников звука. В последнее время все чаще в задачах обнаружения используются векторные приемники или комбинированные гидроакустические приемники, позволяющие измерять скалярно-векторные характеристики звукового поля, что значительно расширяет объём информации о звуковом поле шумящих объектов [1–5].

Обнаружение движущихся малошумных источников, шумовое поле которых представлено как сплошным спектром, так и отдельными дискретными составляющими, связано со сложным процессом поведения сигнальной составляющей объекта [6]. В условиях мелкого моря суммарное звуковое поле в волноводе характеризуется набором нормальных волн с различными фазовыми и групповыми скоростями, имеющих индивидуальную зависимость от частоты, физических и геометрических параметров волновода. При движении источника поле сигнальной составляющей суммарного шумового процесса в реальной морской среде приобретает характер нестационарного случайного 3D процесса с плохо предсказуемой статистикой. Отличительные особенности реального источника от модельного (точечного) в условиях свободного (модельного) пространства состоят в следующем:

- Пространственная структура звукового поля в волноводе формируется интерференцией нормальных волн с периодом от половины длины волны на рабочей частоте до сотен длин волн.

- Пространственно-частотная структура звукового поля в волноводе характеризуется наличием и знаком инварианта, определяющего направление изолиний максимальной интенсивности на плоскости частота – расстояние между источником и приемной системой.

- Фазовая структура звукового поля в волноводе характеризуется плохо предсказуемой нелинейной составляющей зависимости от расстояния. Наибольший хаос вносит вихревая особенность вектора интенсивности, т.е. дислокация фазового фронта [7, 8].

- Составляющие вектора интенсивности (вещественная и мнимая) соизмеримы по величине на любом расстоянии от источника. Ненулевая реактивная составляющая, сопоставимая с активной составляющей, указывает на то, что в поле источника присутствуют как бегущие (расходящиеся), так и стоячие волны (сходящиеся волны отдачи).

В статье поставлена задача определения характеристик движущегося подводного источника с помощью приемных модулей, состоящих из комбинированных гидроакустических приемников, и представлены результаты обработки данных трех экспериментов. Измерения выполнялись на акватории залива Петра Великого Японского моря в условиях мелкого моря.

■ Анализ экспериментальных данных с движущимся подводным источником

Для проведения первого эксперимента в северной части акватории (Уссурийский залив) в углах треугольника на расстоянии 1200 м друг от друга были установлены 3 приемных модуля: ПМ1, ПМ2, ПМ3, согласно рис. 1. Приемники располагались на середине горизонта волновода с глубиной 43–47 м. Векторные каналы приемника ХУ были ориентированы вдоль осей волновода. Подводный источник с постоянной скоростью 1м/с и переменным горизонтом позиционирования выполнял рабочую миссию с приближением к каждому модулю. Время, указанное на рис. 1, соответствует максимальному сближению между источником и приемником.

Экспериментальные данные, полученные в районе проведения измерений, содержат шумы ближнего судоходства на всей частотной полосе, доступной для анализа. Структура распределения плотности мощности энергии в момент времени 14.30 (начало движения источника к ПМ3) на рис. 2 показана красной линией. Ее уровень изменяется от -85 дБ до -90 дБ. Плотность мощности энергии в момент времени 14.40 (половина пройденного пути) показана зеленой линией. Ее уровень соответствует -85дБ. Уровень плотности мощности энергии в момент траверза 14.47 (синяя линия) источника сигнала и приемного модуля является максимальным и соответствует значению -80дБ. Процесс приближения источника к приемному модулю можно продемонстрировать только на ПМ3, который расположен в самом малошумном месте.

Экспериментальная оценка энергетической структуры звукового поля движущегося подводного источника получена с помощью спектральной обра-

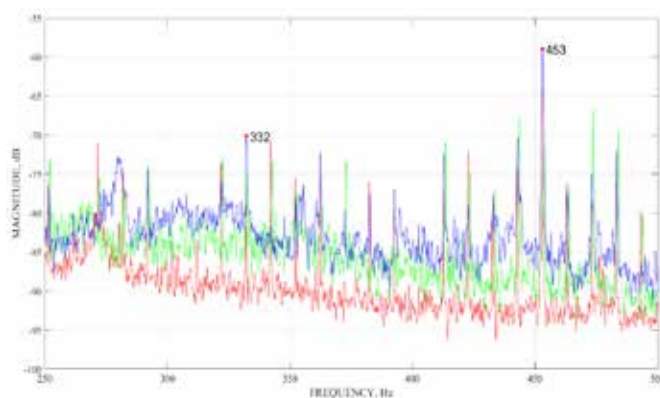


Рис. 2. Структура уровней плотности мощности энергии движущего источника в полосе частот 250–500 Гц

ботки данных и использования мультипликативных алгоритмов для набора из 16 информативных параметров звукового поля [9, 10]. При оценке энергетической структуры использовались скалярные, векторные и тензорные величины: квадрат звукового давления p^2 , три компоненты вещественной составляющей вектора интенсивности $\text{Re}(pv_i^*)$, три компоненты мнимой составляющей вектора интенсивности $\text{Im}(pv_i^*)$, три компоненты ротора вектора интенсивности $\text{rot}_i I$, три компоненты вещественной составляющей вектора градиента давления и три компоненты мнимой составляющей вектора градиента давления.

Наглядное представление изменчивости уровней энергии звукового поля показано на 3-мерных спектрограммах (частота, время и уровень) на рис. 3. Горизонтальные линии с повышенным уровнем, идущие параллельно оси времени, соответствуют дискретным составляющим различных источников шума. При обработке сигнала применялся нелинейный алгоритм выделения помехи из суммарного процесса

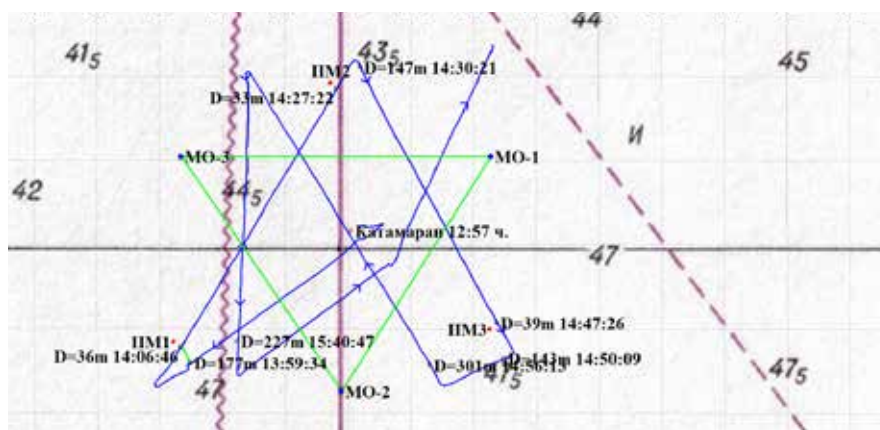


Рис. 1. Карта постановки приемных модулей ПМ1, ПМ2, ПМ3 и миссии аппарата (синяя линия)

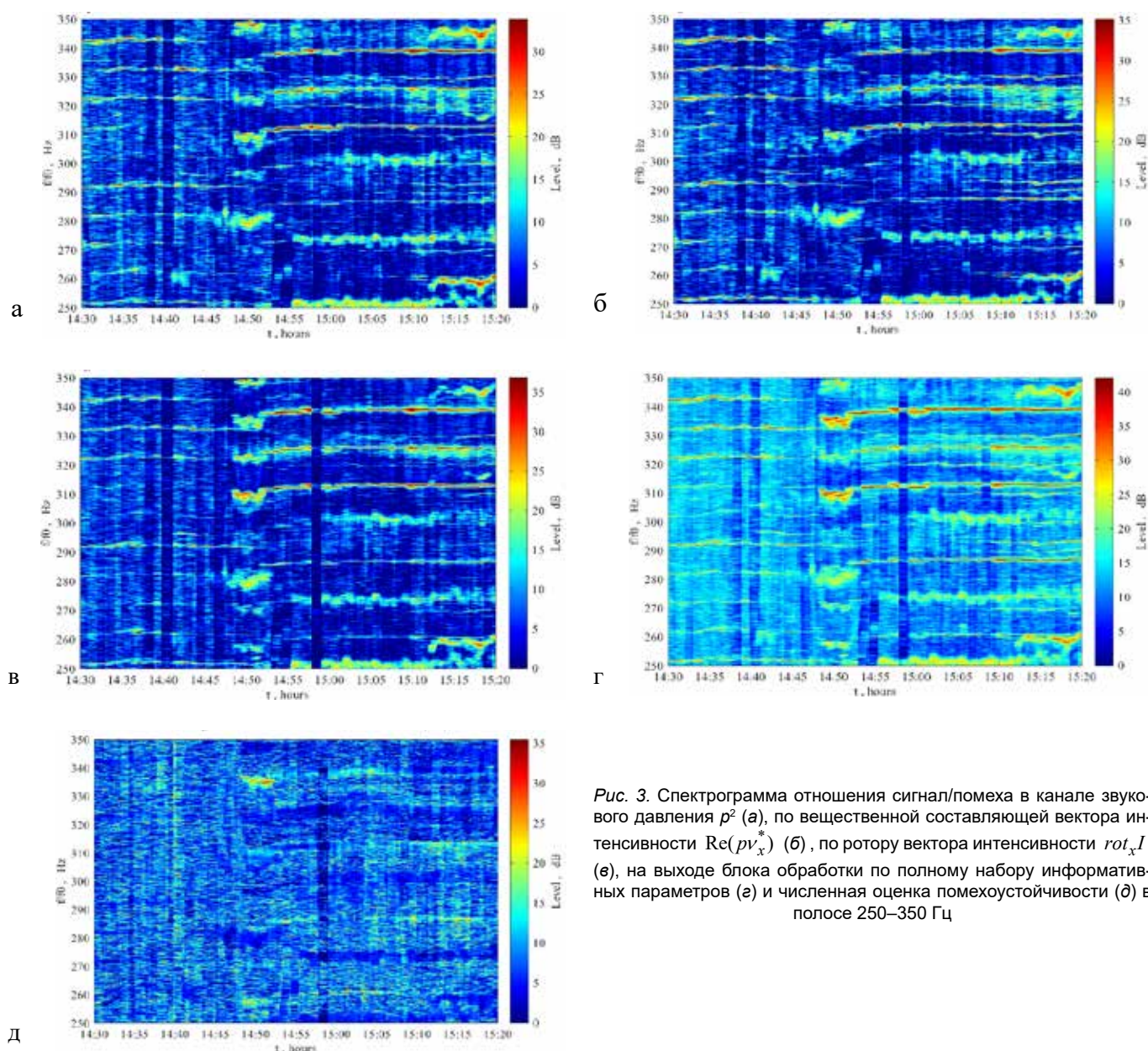


Рис. 3. Спектрограмма отношения сигнал/помеха в канале звукового давления p^2 (а), по вещественной составляющей вектора интенсивности $\text{Re}(pv_x^*)$ (б), по ротору вектора интенсивности $\text{rot}_x I$ (в), на выходе блока обработки по полному набору информативных параметров (г) и численная оценка помехоустойчивости (д) в полосе 250–350 Гц

«сигнал+помеха». Для уменьшения помехи применялась функция оконного сглаживания со следующими настройками: время усреднения 50 с, ширина окна 16,4 с, перекрытие 50%. Численная оценка помехоустойчивости определялась как результат выигрыша отношения сигнал/помеха в векторных каналах по сравнению с отношением сигнал/помеха в канале звукового давления с нормировкой на дисперсию.

Перечисленные информативные параметры, определённые в одном и том же звуковом поле, могут быть коррелированы между собой при больших интервалах усреднения. Пространственная структура для каждого информативного параметра, нормированного на соответствующую помеху, имеет особенности локальной интерференционной структуры,

пространственные масштабы которой изменяются в широких пределах, что наглядно показано на рис. 3. Использование процедуры усреднения временным окном по каждому информативному параметру не гарантирует постоянно высокого значения отношения сигнал/помеха в частотной и временной областях. Однако многоканальность приемной системы, как и большой набор информативных параметров, можно использовать для получения максимально возможного выигрыша в отношении сигнал/помеха в частотной и временной областях с помощью компаратора, что подтверждается рис. 3, г. Представленное поле сформировано на выходе блока спектральной обработки всех параметров в компараторе по критерию максимального отношения сигнал/помеха. Струк-

тура поля по давлению (рис. 3, *a*) содержит максимальные уровни сигнальной составляющей, более 30 дБ. Структура поля по вещественной компоненте вектора интенсивности в горизонтальной плоскости на рис. 3, *б* и по ротору вектора интенсивности на рис. 3, *в* содержит максимальные уровни сигнальной составляющей, превышающие 35 дБ. Уровни поля сигнальной составляющей на выходе компаратора составляют более 40 дБ (рис. 3, *г*). Численная оценка помехоустойчивости комбинированного приемника в 20–25 дБ представлена на рис. 3, *д* с зонами локального увеличения значения.

По выделяемым отдельным дискретным составляющим, например 332 Гц на рис. 2, и на спектрограммах на рис. 3 можно рассчитать проходные характеристики, которые построены в логарифмическом масштабе для суммарного процесса ($S + N$) (красная линия) и помехи N (синяя линия).

Уровень суммарного знакопостоянного процесса в канале звукового давления (рис. 4, *a*, верхний график) имеет максимальное значение при нахождении приемника на траверзе движущегося объекта (время

14.45–14.50), при этом значение отношения сигнал/помеха минимально по сравнению со значением в векторных каналах. Изменение уровня в канале звукового давления обусловлено приближением или удалением источника. Во всех векторных каналах поведение суммарного процесса и помехи по вещественной компоненте вектора интенсивности имеет знакопеременный вихревой характер. Уровни активной составляющей в горизонтальной плоскости и в вертикальном канале соизмеримы по величине на любом расстоянии от источника. Особенность поведения вещественной компоненты вектора интенсивности заключается в эффектах компенсации потоков мощности. Резкое пиковое увеличение значения отношения сигнал/помеха на рис. 4, *б* возникает при компенсации потоков мощности в поле помехи. Эффект компенсации потоков мощности в суммарном поле приводит к резкому падению отношения сигнал/помеха. Процедура усреднения естественным образом сглаживает флуктуации суммарного процесса и в поле сигнала, и в поле помехи, но некоторые флуктуации остаются и после процедуры усреднения.

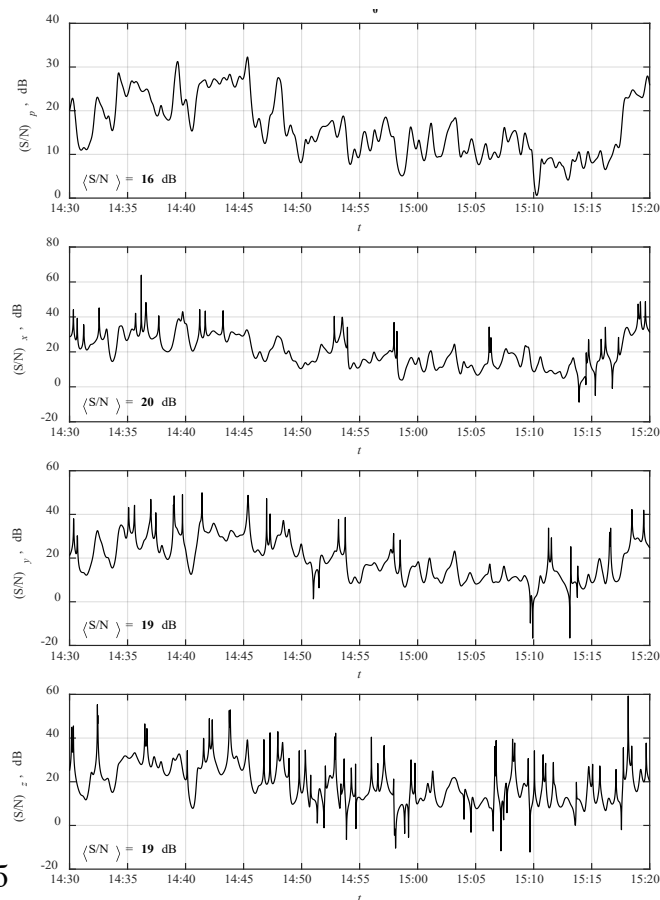
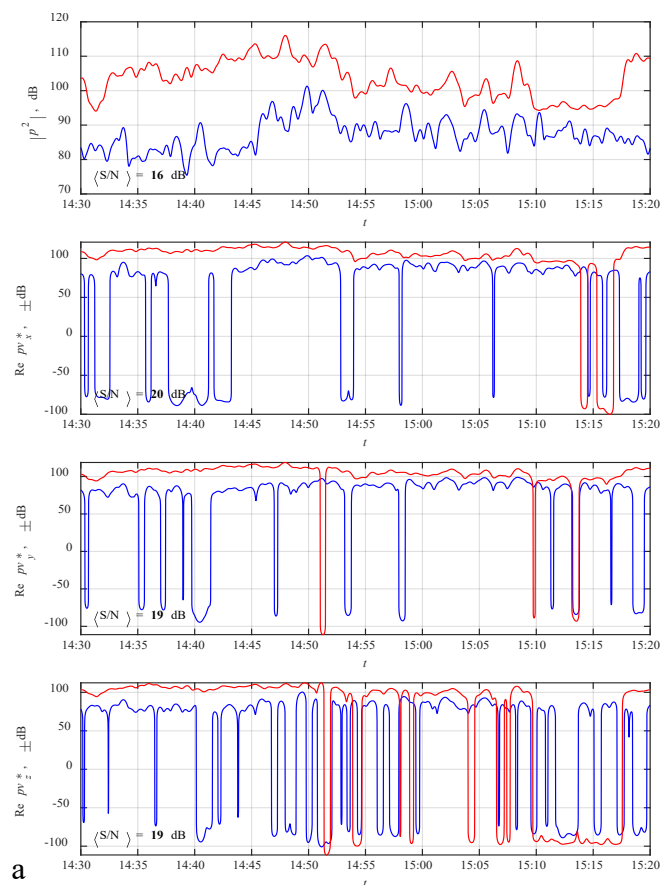


Рис. 4. Результат расчета проходных характеристик на частоте 332 Гц в каналах комбинированного приемника (*a*) и результат вычисления отношения сигнал/помеха (*б*) в каналах комбинированного приемника

■ Анализ экспериментальных данных для подводного источника с изменяющимся горизонтом движения

Данные второго эксперимента были получены в Уссурийском заливе при работе с приемной системой на основе комбинированных приемников. Подводный объект совершал круговые движения с вертикальным заглублением по спирали вблизи приемной системы с постоянным горизонтом позиционирования (рис. 5).

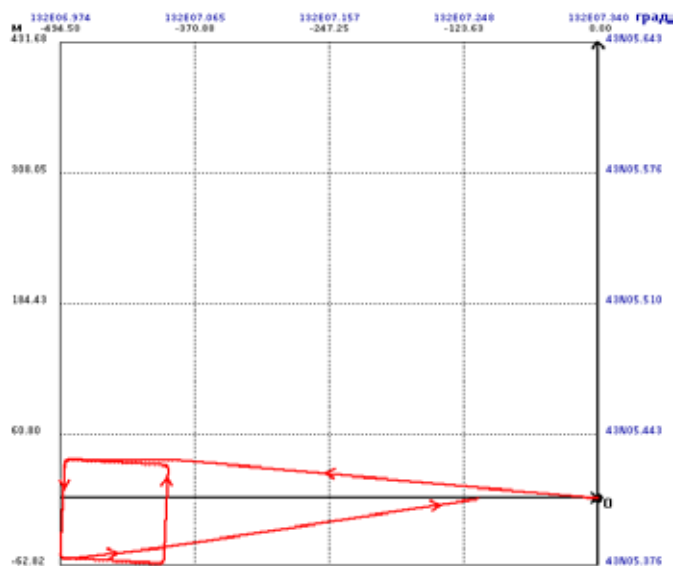
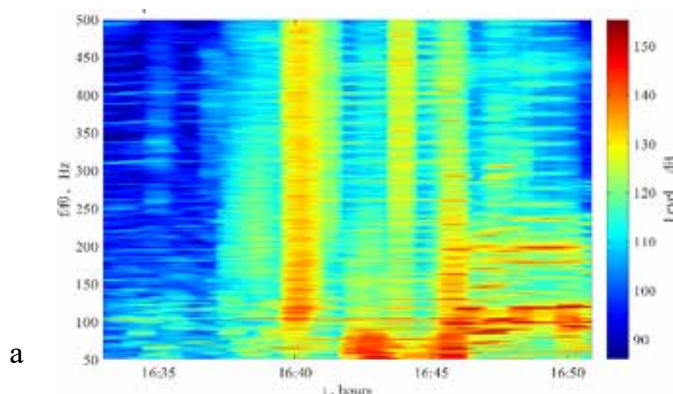


Рис. 5. Карта движения подводного объекта с вертикальным заглублением

Движению подводного объекта со спиральным заглублением присуща широкополосная сигнальная составляющая с отдельными дискретами повышенного уровня, что показано на рис. 6, а в канале звукового давления и в вертикальном векторном канале приемника.



б

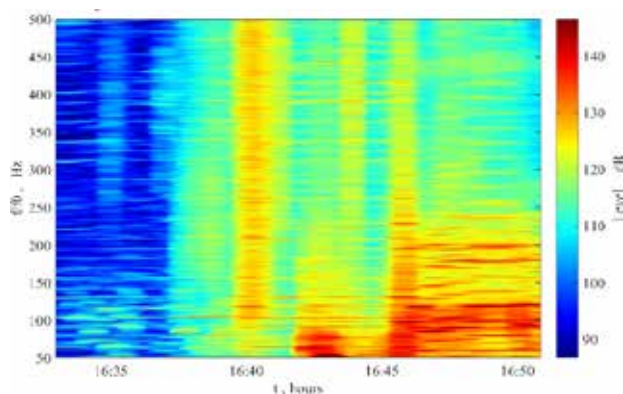


Рис. 6. Спектрограмма в канале звукового давления p^2 (а), по вещественной составляющей вектора интенсивности $\text{Re}(pv_z^*)$ вертикального канала (б)

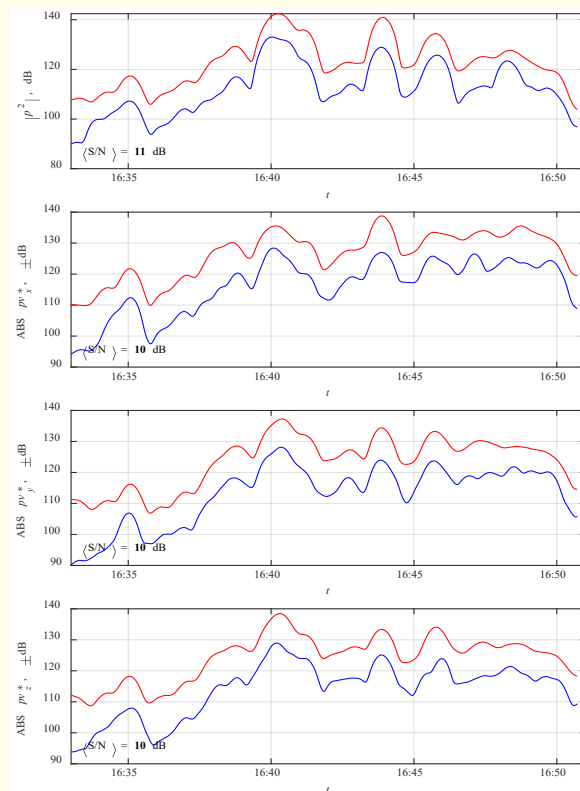
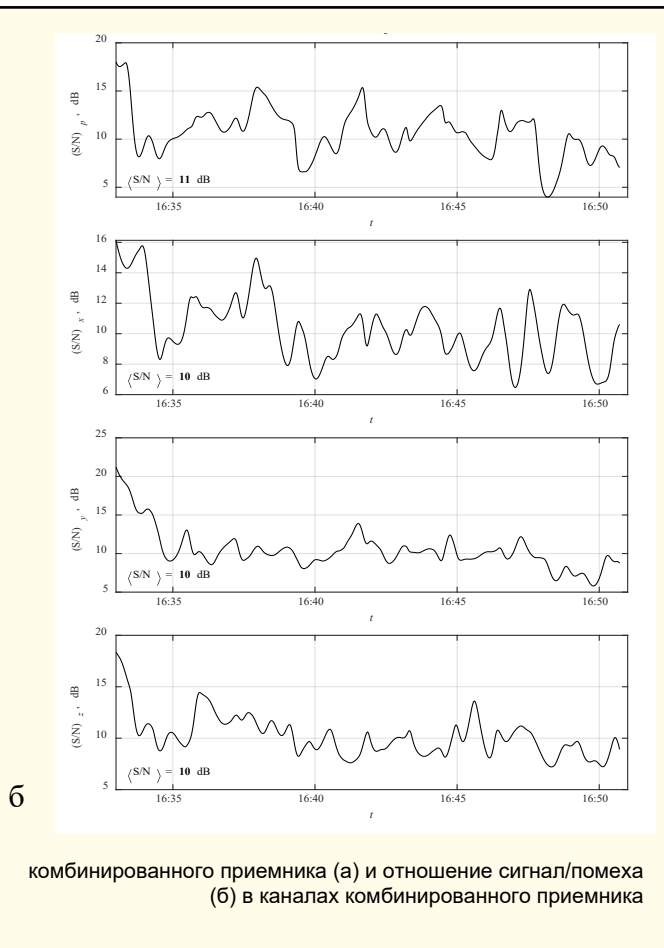


Рис. 7. Проходные характеристики на частоте 332 Гц в каналах

Результат расчета проходных характеристик на частоте 332 Гц в логарифмическом масштабе по звуковому давлению и абсолютной величине вектора интенсивности, построенных для суммарного процесса ($S + N$) (красная линия) и выделенной из суммарного процесса помехи N (синяя линия), а также значение отношения сигнал/помеха представлены на рис. 7.

Результаты обработки данных показывают, что наблюдается изменение уровня суммарного



процесса и помехи при изменении расстояния между подводным объектом и приемной системой, а также при спиральном заглублении объекта, т.е. приближении к горизонту позиционирования приемной системы.

■ Анализ экспериментальных данных с тональным источником и глайдером с изменяющимся горизонтом позиционирования

Третий эксперимент проводился в акватории Уссурийского залива в 2025 г. в районе, удаленном от проходящих судов. Схема эксперимента показана на рис. 8. Электромагнитный излучатель на научно-исследовательском судне «Юрий Молоков» располагался на горизонте 20 м, соответствующем середине глубины волновода. Глайдер, оснащенный парой комбинированных приемников, опускался с заякоренной резиновой лодки и равномерно перемещался по всей глубине волновода (33 м). Каждый спуск и

подъем глайдера фиксировался в журнале действий. За время эксперимента было выполнено 2 коротких (3–5 мин) и 2 затяжных (30 мин) спуска-подъема глайдера. Расстояние между приемной (GLIDER) и излучающей (MOLOKOV) системами составляло 3,9 км.



Рис. 8. Район проведения экспериментальных исследований от 19.09.2025 г. и внешний вид глайдера



В данных приемной системы присутствуют шумы ближнего судоходства, поэтому спектральный анализ сводится к узкополосной обработке и вычислению проходных характеристик по выбранным частотам тонального электромагнитного излучателя.

Для выбранной частотной полосы 40–41 Гц с максимальным отношением сигнал/помеха в канале Y приведен результат вычисления проходных характеристик, представленный на рис. 10, а; для суммарного процесса $(S + N)$ (красная линия) и выделенной помехи N (синяя линия), для канала звукового давления $|p|^2$ (верхний график) и для векторных каналов $\text{Real}(pv_x^*)$, $\text{Real}(pv_y^*)$, $\text{Real}(pv_z^*)$. Вещественной компоненте вектора интенсивности соответствуют волны, распространяющиеся от источника. В векторных каналах для суммарного процесса и

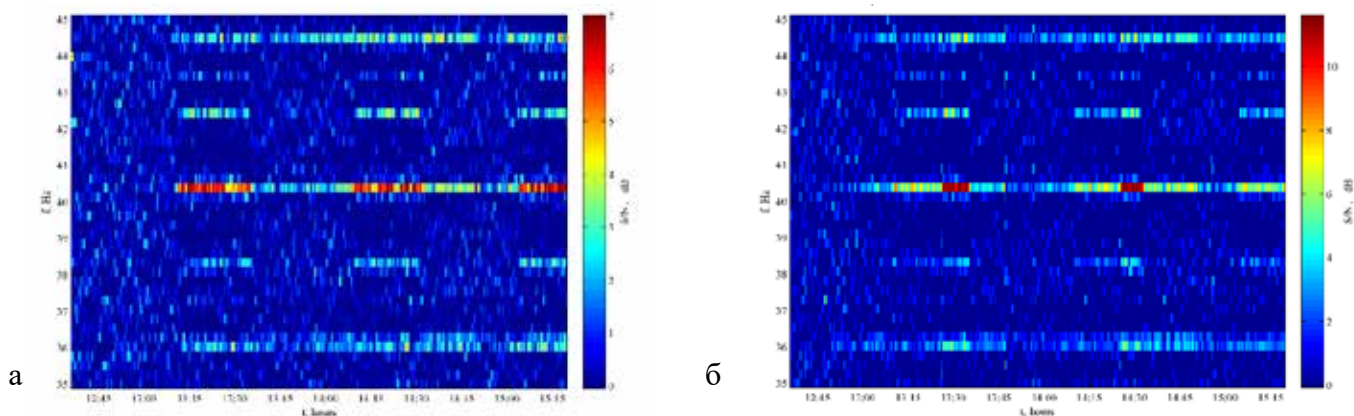


Рис. 9. Спектрограмма отношения сигнал/помеха в горизонтальной плоскости по вещественной компоненте вектора интенсивности $\text{Re}(pv_x^*)$ (а) и $\text{Re}(pv_y^*)$ (б) в диапазоне 35–45 Гц носового приемника № 16

помехи характерен знакопеременный характер, обусловленный вихревой составляющей вектора интенсивности. Флуктуация уровней этих двух процессов в зависимости от перемещения глайдера по глубине волновода наблюдается только в канале звукового давления.

Проходные характеристики на рис. 10, б вычислены для канала звукового давления $|p|^2$ (верхний график) и абсолютной магнитуды интенсивности $\text{ABS}(pv_i^*)$; на графике, соответствующем верти-

кальному векторному каналу (рис. 10, б, нижний график) нанесены траектории перемещения глайдера по глубине. Абсолютная магнитуда вычислена как для бегущих, так и для стоячих волн, соответствующих вещественной и мнимой частям (pv_i^*) . Флуктуация уровней суммарного процесса и помехи во всех каналах приемника хорошо соотносятся с вертикальными перемещениями глайдера, которые обозначены на графике для вертикального канала (рис. 10, б, нижний график).

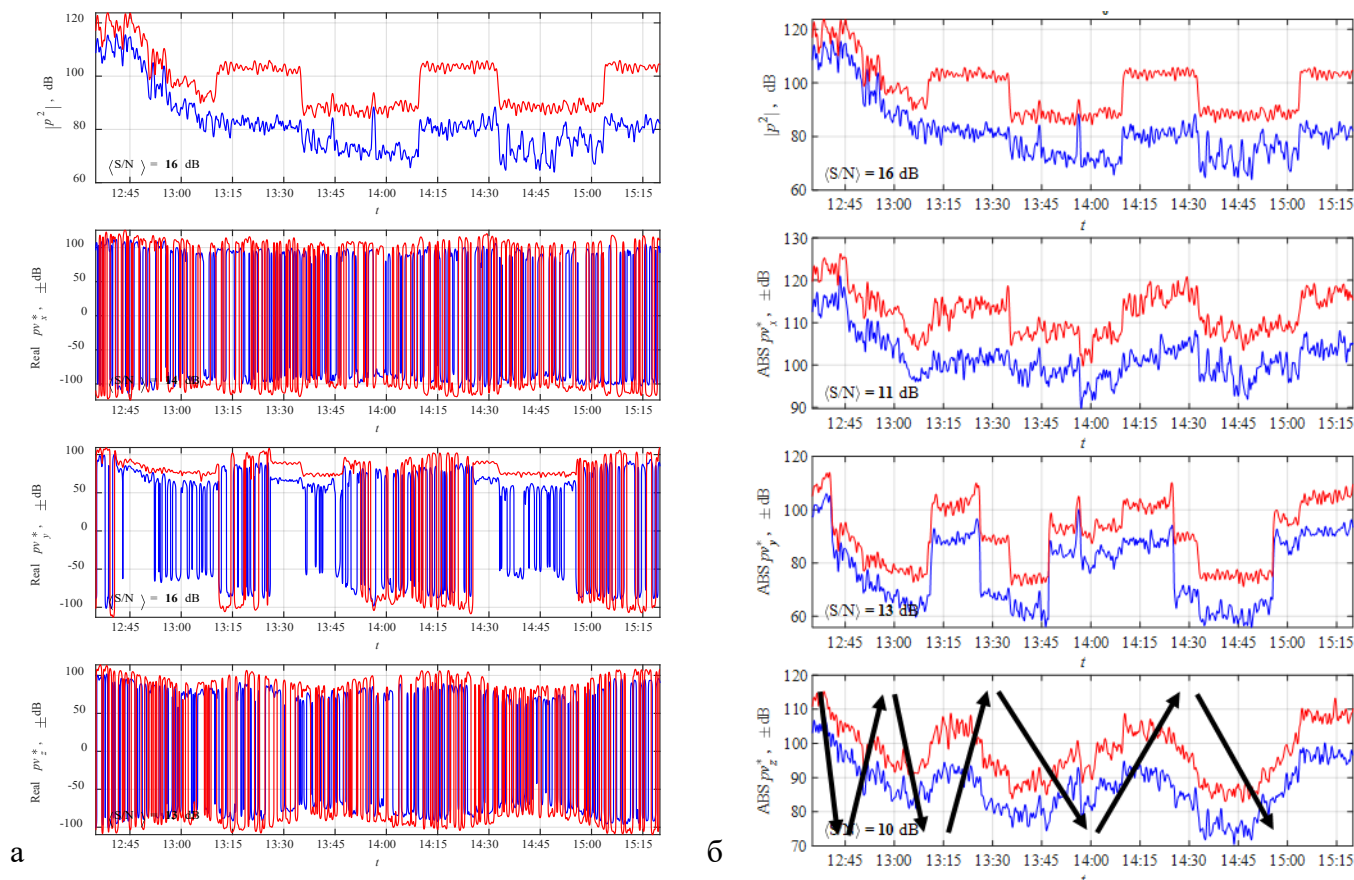


Рис. 10. Проходные характеристики в каналах комбинированного приемника в полосе частот 40–41 Гц

Заключение

Выполнен спектральный анализ экспериментальных данных, полученных приемной системой на основе 4-канальных комбинированных приемников. В качестве источника сигналов выступали подводный движущийся объект с различными горизонтами работы и тональный излучатель. В качестве приемной системы использовались как стационарная система на основе комбинированных приемников с постоянным горизонтом работы, так и глайдер с установленной на нем парой приемников, равномерно движущийся по всей глубине волновода. Спектральный анализ высокого разрешения позволил определить отдельные дискретные составляющие на фоне помехи.

Сигнальная составляющая как полученная в каналах приемника, так и вычисленная по полному набору информативных параметров есть нестационарный случайный 3D процесс. Показано, что эффекты компенсации потоков мощности, наблюдаемые в векторном поле помехи, значительно увеличивают диапазон изменений отношения сигнал/помеха. Проце-

дура выделения сигнальной составляющей в каждом канале дает собственную численную оценку отношения сигнал/помеха. Использование приведенного полного набора информативных параметров, которые можно сформировать на выходе блока спектральной обработки и компаратора, выделяющего параметр по критерию максимального отношения сигнал/помеха, суммарно увеличивают сигнальную составляющую на выходе комбинированного приемника, т.е. увеличивают вероятность правильного обнаружения полезного сигнала.

Проведенный спектральный анализ полученных экспериментальных данных позволил получить наиболее полное описание особенностей поля источника в реальном волноводе, выигрыш в подавлении помехи и повышение отношения сигнал/помеха в каналах комбинированного приемника.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИПМТ ДВО РАН Е.М. Калистратову, Ю.Г. Ларионову, Е.А. Гетману, принимавшим участие в морских экспериментах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Скребнёв Г.К. Комбинированные гидроакустические приёмники. С-Пб.: Элмор, 1997. 200 с.
2. Лукин Г.С. Разработка многоканального устройства преобразования и передачи информации, получаемой с комбинированного гидроакустического приёмника // Наука, техника и образование. 2016. № 11(29). С. 60–62.
3. Каменев С.И. Методы и средства измерения кинематических характеристик акустических волноводов // Подводные исследования и робототехника. 2025. № 4(54). С. 77–83.
4. Казаков М.Н. Оценка целесообразности использования приёмников колебательной скорости в многоканальных гидроакустических системах // Наука, техника и образование. 2018. № 5 (46). С. 19–22.
5. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 479 с.
6. Стаценко Л.Г., Кузин Д.А. Спектральные признаки гидроакустических шумов в решении задач классификации подводных объектов // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2021. № 4(49). С. 28–38.
7. Щуров В.А., Кулешов В.П., Черкасов А.В. Вихревые свойства вектора акустической интенсивности в мелком море // Акуст. журн. 2011. Т. 57, № 6. С. 837–843.
8. Журавлёв В.А., Кобозев И.К., Кравцов Ю.А. Потоки энергии в окрестности дислокаций фазового фронта // ЖЭТФ. 1993. Т. 104, вып. 5(11). С. 3769–3783.
9. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Обнаружение и идентификация малошумного движущегося источника на фоне шумов ближнего судоходства в мелком море // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3–1. С. 205–211.
10. Zlobina N., Kasatkin S. Physical principles of implementing increased noise immunity of a combined receiver based on marine // Proceeding of 2025 International Conference on Ocean Studies (ICOS). Vladivostok, 2025. P. 45–48.

Справка об авторах

ЗЛОБИНА Надежда Владимировна, г. н. с., д. т. н.
Институт проблем морских технологий им. акад. М.Д. Агеева
ДВО РАН
Адрес места работы: г. Владивосток, ул. Суханова, 5а
Область научных интересов: фундаментальная и прикладная гидроакустика
Тел. +7 (423) 243-24-16
E-mail: zlobina@marine.febras.ru
ORCID: 0000-0003-3314-2163

КАСАТКИН Сергей Борисович, в. н. с., к. физ.-мат. н.
Институт проблем морских технологий им. акад. М.Д. Агеева
ДВО РАН
Адрес места работы: г. Владивосток, ул. Суханова, 5а
Область научных интересов: постановка морских экспериментов, спектральная обработка, эксплуатация глайдера в мелком море
Тел. +7 (423) 243-24-16
E-mail: bigcezar@mail.ru
ORCID: 0000-0002-0945-8355

Для цитирования:

Злобина Н.В., Касаткин С.Б. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ ИСТОЧНИКА // ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2026. № 3 (57). С. 24–32. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_03. EDN: ZOSACA.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE SOUND FIELD OF MOVING SOURCE

N.V. Zlobina, S.B. Kasatkin

This paper presents spectral processing of experimental data obtained by a diversity receiving system based on combined receivers. In the experiments the distance between the moving object and the receiving system, the positioning horizon of the moving underwater object, and the positioning horizon of the receiving system were varied. The goal of the analysis is to determine the signal components of a low-noise object and other characteristics of the source's sound field in shallow water conditions and in the presence of nearby shipping noise using scalar, vector, and tensor descriptions of the sound field.

Keywords: combined receiver, shallow water, power spectral density, intensity vector, signal processing.

References

1. Skrebnev G.K. Combined hydroacoustic receivers. St. Petersburg: Elmor, 1997. 200 p.
2. Lukin G.S. Development of a multi-channel device for converting and transmitting information received from a combined hydroacoustic receiver // Science, Technology and Education. 2016. No. 11(29). P. 60–62.
3. Kamenev S.I. Methods and means for measuring the kinematic characteristics of acoustic waveguides // Underwater investigations and robotics. 2025. No. 4 (54). P. 77–83.
4. Kazakov M.N. Evaluation of the feasibility of using particle velocity receivers in multichannel hydroacoustic systems // Science, Technology and Education. 2018. No. 5 (46). P. 19–22.
5. Gordienko V.A. Vector-phase methods in acoustics. Moscow: Fizmatlit, 2007. 479 p.
6. Statsenko L.G., Kuzin D.A. Spectral features of hydroacoustic noise in solving problems of classification of underwater objects // Bulletin of the FEPU Engineering School. 2021. No. 4(49). P. 28–38.
7. Shchurov V.A., Kuleshov V.P., Cherkasov A.V. Vortexes of Acoustic Intensity in Shallow Sea // Akust. Zh 2011. Vol. 57, No. 6. P. 837–843.
8. Zhuravlev V.A., Kobozev I.K., Kravtsov Yu.A. Detecting dislocations by measuring the energy flux of an acoustic field // JETP. 1993. Vol. 104, No. 5. P. 808–814.
9. Kasatkin B.A., Zlobina N.V., Kasatkin S.B. Detection and identification of a low-noise source against the background of noise from short-range shipping in shallow sea // Marine Intellectual Technologies. 2022. No. 3–1(57). P. 205–211.
10. Zlobina N., Kasatkin S. Physical principles of implementing increased noise immunity of a combined receiver based on marine / Proceeding of 2025 International Conference on Ocean Studies (ICOS). Vladivostok, 2025. P. 45–48.

Information about the authors

ZLOBINA Nadezhda Vladimirovna, Chief Researcher, Dr. Sc. Institute of Marine Technology Problems Far East Branch Russian Academy of Sciences
Work address: 690091, Russia, Vladivostok, Sukhanova st., 5
Research interests: fundamental and applied hydroacoustics
Phone : +7 (423) 243-24-16. **E-mail:** zlobina@marine.febras.ru
ORCID: 0000-0003-3314-2163,

KASATKIN Sergey Borisovich, Leading Researcher, Ph. D. Institute of Marine Technology Problems Far East Branch Russian Academy of Sciences
Work address: 690091, Russia, Vladivostok, Sukhanova st., 5
Research interests: setting up marine experiments, spectral processing, glider operation in shallow waters
Phone : +7 (423) 243-24-16. **E-mail:** bigcezar@mail.ru
ORCID: 0000-0002-0945-8355

