

# ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНАЯ И ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В СКАЛЯРНО-ВЕКТОРНОМ ОПИСАНИИ

**Б.А. Касаткин, С.Б. Касаткин, Г.В. Косарев**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем морских технологий ДВО РАН<sup>1</sup>

Рассматриваются особенности работы гидроакустических комбинированных приемников, образующих вертикально ориентированную антенну, в мелком море в инфразвуковом диапазоне частот. Данное исследование связано с решением проблемы определения координат и параметров движения определенной цели путем активно-пассивной локации и измерения характеристик наблюдаемого при этом поля шумов. Актуальность представляет анализ пространственно-частотной и пространственно-временной структуры звукового поля. Для проведения эксперимента использовался НИС «Юрий Молоков», буксирующий низкочастотный излучатель ЛЧМ-сигналов. Пространственно-частотная структура звукового поля исследуется путем спектрального анализа дискретных составляющих вально-лопастного звукоряда буксирующего судна в диапазоне частот 1–20 Гц. Исследование пространственно-временной структуры поля производится путем корреляционной обработки ЛЧМ сигналов на апертуре вертикально ориентированной антенны в диапазоне частот 30–60 Гц. Результаты спектральной обработки принятых сигналов позволяют получить оценки помехоустойчивости комбинированного приемника, причем повышенная помехоустойчивость реализуется при использовании полного набора из 16 информативных параметров, характеризующих энергетическую структуру звукового поля. Это в итоге позволяет исследовать вертикальную структуру звукового поля и произвести идентификацию формирующих его нормальных волн. Из полученных результатов корреляционной обработки сложных ЛЧМ-сигналов вытекают также оценки пространственно-временной структуры звукового поля и коэффициентов корреляции на апертуре вертикально ориентированной антенны в различных каналах комбинированных приемников.

## ВВЕДЕНИЕ

При использовании гидроакустических приемных систем на основе гидрофонов, решающих проблему обнаружения и определения координат и параметров движения цели (КПДЦ) в условиях мелкого моря в инфразвуковом диапазоне частот, возникают специфические проблемы. Суть этих проблем заключается в том, что традиционные аддитивные алгоритмы обработки сигналов, объединенные общим названием «beamforming», оказываются недостаточно эффективными из-за модовой структуры звукового поля в условиях мелкого моря (волновода) и низких частот. В этих условиях звуковое поле формируется набором нормальных волн, каждая из которых характеризуется своей дисперсионной зависимостью фазовой скорости от частоты и параметров волновода. Этот фактор усложняет фазовую

структуру звукового поля и существенно снижает эффективность алгоритмов когерентной обработки сигналов на апертуре антенны. С появлением комбинированных приемников (КП) и приемных систем на их основе появились и новые возможности решения этих проблем на основе мультипликативных алгоритмов обработки сигналов. Перспективность их использования связана с тем, что мультипликативные алгоритмы обработки принципиально не зависят от фазовой структуры звукового поля. Потенциальные возможности одиночного КП характеризуются его повышенной помехоустойчивостью, которая подробно исследовалась нами в работах [1–2]. В соответствии с оценками, полученными в этих работах, одиночный КП по своей помехоустойчивости экви-

<sup>1</sup> 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел.: +7 (423) 243-25-78.  
E-mail: kasatkas@marine.febras.ru

валентен (в некотором смысле) протяженной антенне на основе гидрофонов, апертура которой на низких частотах быстро растет. Представляет определенный интерес исследование потенциальных возможностей приемных систем, состоящих из набора КП, образующих вертикально ориентированную антенну, работающую в условиях мелкого моря в наиболее информативном инфразвуковом диапазоне частот. Можно полагать, что вертикальная антенна будет обладать повышенной разрешающей способностью при определении угла места источника в сравнении с одиночным комбинированным приемником. Потенциальные возможности пеленгования источника сигнала КП исследовались нами в работе [3]. Однако эффективность любых алгоритмов обработки сигналов в существенной мере зависит от условий работы приемной системы, т.е. от свойств акустического поля, структура которого существенно усложняется в условиях мелкого моря и инфразвуковых частот. Цель настоящей работы заключается в исследовании скалярно-векторной структуры звукового поля в мелком море, формируемого либо низкочастотным излучателем модельных сигналов, либо реальным шумовым объектам (ШО) на апертуре вертикально ориентированной антенны, состоящей из трех КП. Программа исследования включает в себя спектрально-корреляционный анализ сигналов, принимаемых КП, с использованием мультипликативных алгоритмов обработки. Наибольший интерес представляет анализ пространственно-частотной структуры звукового поля на частотах, меньших первой критической частоты модельного волновода Пекериса. В этом частотном диапазоне звуковое поле может быть

сформировано только дискретными составляющими ВЛЗР ШО. Особый интерес представляет идентификация нормальных волн, формирующих энергетическую структуру звукового поля. Он связан с тем, что в соответствии с классическим описанием в этом диапазоне частот нет нормальных волн, захваченных волноводом, и соответствующих им потоков мощности. Корреляционный анализ сигналов в каналах КП на апертуре антенны, насколько нам известно, ранее не проводился. Результаты анализа позволят оценить возможность определения с помощью КП угла места источника сигнала при излучении широкополосного ЛЧМ-сигнала. Эта задача важна в общей проблеме определения КПДЦ в условиях мелкого моря и низких частот.

### ■ Состав оборудования и место проведения эксперимента

Для проведения экспериментальных исследований были подготовлены:

- приемные модули ПМ-1, ПМ-2, ПМ-3, оснащенные комбинированными приемниками;
- генератор полигармонического сигнала в диапазоне частот 30–60 Гц;
- генератор широкополосного ЛЧМ-сигнала в диапазоне частот 30–60 Гц;
- буксируемый электродинамический излучатель с резонансной частотой в районе 35–45 Гц (в зависимости от глубины погружения).

Частотная характеристика излучателя приведена на рис. 1 при глубине погружения излучателя  $z_0 = 10$  м.

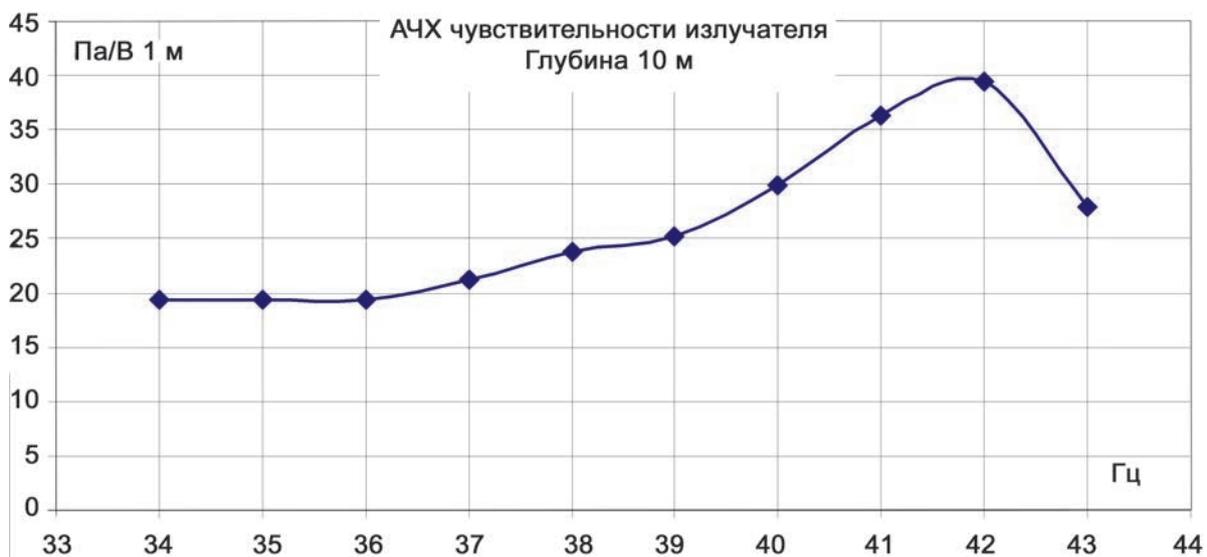


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика излучателя

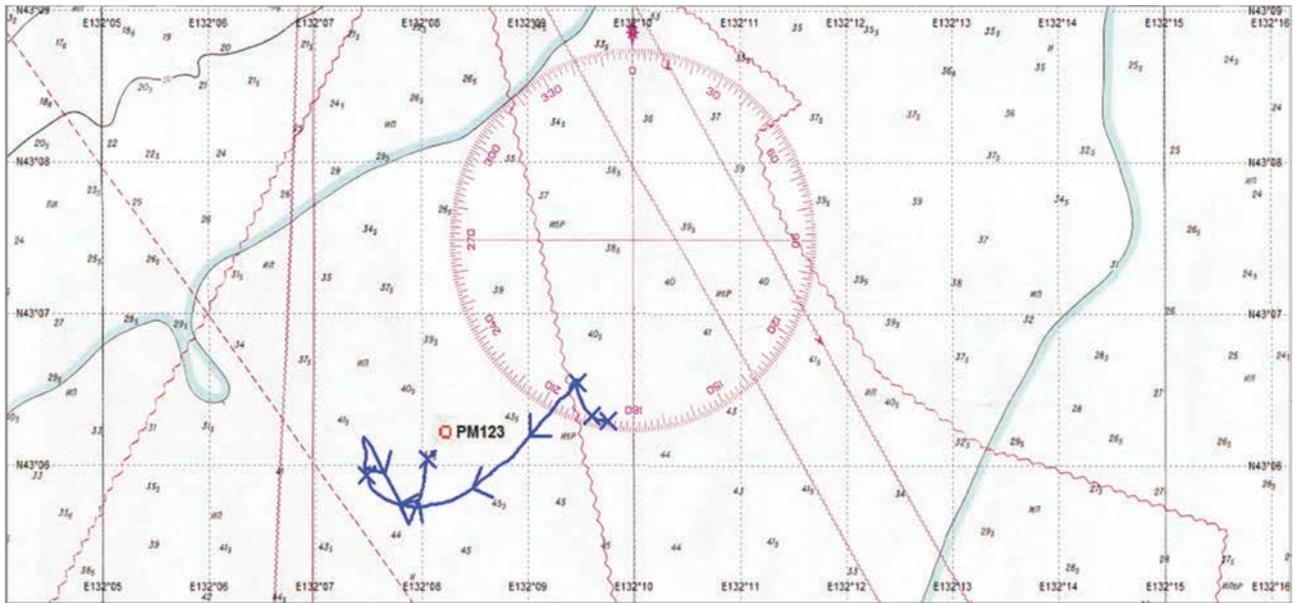


Рис. 2. Схема маневрирования НИС «Юрий Молоков» относительно приемных модулей ПМ-1, 2, 3

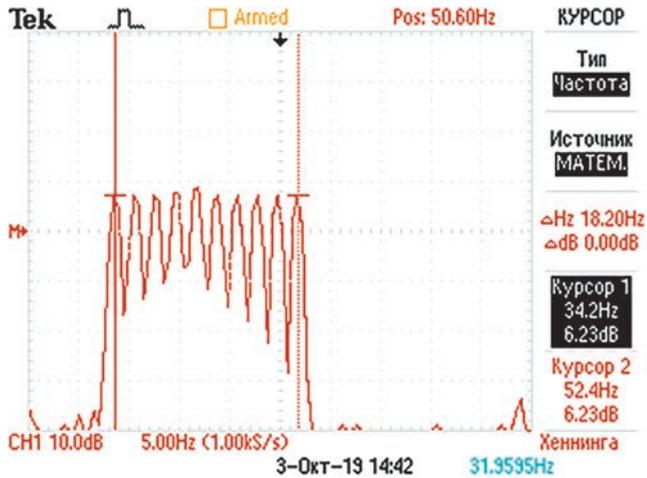


Рис. 3. Спектр полигармонического сигнала в диапазоне сигнала в диапазоне частот 34–43 Гц

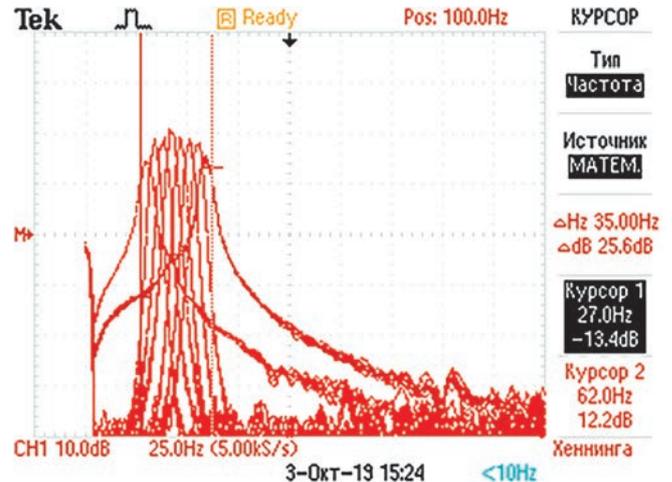


Рис. 4. Спектр ЛЧМ-сигнала в диапазоне частот 30–60 Гц

Эксперимент проводился на акватории Уссурийского залива. В качестве естественного источника шума использовались НИС «Юрий Молоков» и его дискретные составляющие вально-лопастного звуоряда (ВЛЗР). В качестве модельного сигнала использовался полигармонический сигнал и ЛЧМ-сигнал, излучаемый буксируемым электродинамическим излучателем. Карта района проведения эксперимента, схема маневрирования НИС «Юрий Молоков» с буксируемым излучателем и место постановки приемных модулей ПМ-123 поясняются рис. 2. Приемная система установлена в точке РМ123, горизонты установки приемных модулей  $z_1 = 40$  м,  $z_2 = 37$  м,  $z_3 = 34$  м, глубина места  $h = 43-44$  м, горизонт буксировки источника  $z_0 = 10$  м. Спектры излучаемых сигналов поясняются рис. 3–6.

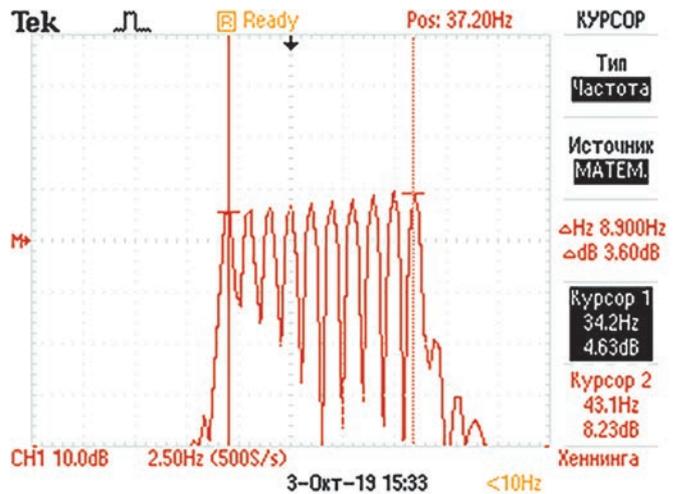


Рис. 5. Спектр полигармонического сигнала в диапазоне частот 34–52 Гц с шагом 2 Гц

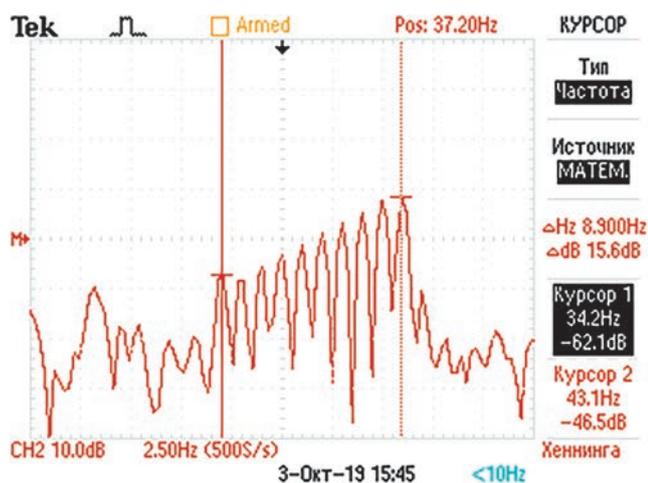


Рис. 6. Спектр полигармонического сигнала на контрольном гидрофоне

### ■ Обработка сигналов, спектральный анализ и оценка помехоустойчивости

Обработка сигналов предполагает спектральный анализ на основе БПФ в каналах комбинированного приемника, вычисление полного набора информативных параметров, характеризующих энергетическую структуру звукового поля в скалярно-векторном описании, и построение соответствующих сонограмм в рабочем диапазоне частот в рабочем интервале времени. Сонограммы звукового поля для излучаемых модельных сигналов в 4 каналах комбинированного приемника поясняются рис. 7 для приемного модуля ПМ-1. Сонограммы звукового поля для дискретных составляющих ВЛЗР НИС «Юрий Молоков» поясняются рис. 8–9. Важно отметить, что все дискретные составляющие ВЛЗР в диапазоне 2–20 Гц, представленные на сонограммах, меньше первой критической частоты для модельного волновода Пекериса. Для оценки потенциальной помехоустойчивости комбинированных приемников была выполнена в блоке обработки сигналов (БОС) обработка всей скалярно-векторной информации, описывающей энергетическую структуру звукового поля. Как показано в работах [1–2], полное описание энергетической структуры содержит 16 информативных параметров. В число этих параметров входят квадрат звукового давления, 3 компоненты вещественной составляющей вектора интенсивности, 3 компоненты мнимой составляющей вектора интенсивности, 3 компоненты ротора вектора интенсивности, 3 квадратичные компоненты вещественной части вектора градиента давления и 3 квадратичные компоненты мнимой части вектора градиента давления. Эти параметры подобны, но не тождественны, компонентам 4-мерного тензора второго ранга (тензора плотности потока мощности), впервые введенного в работе [4].

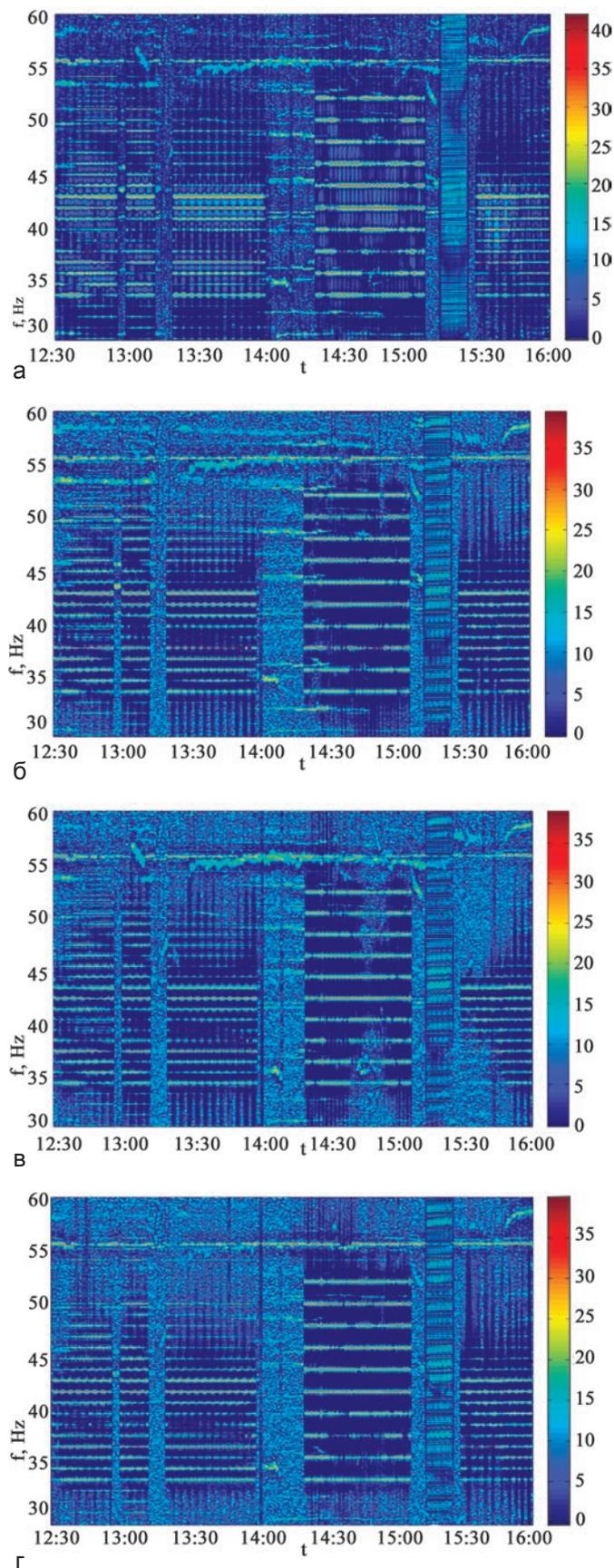
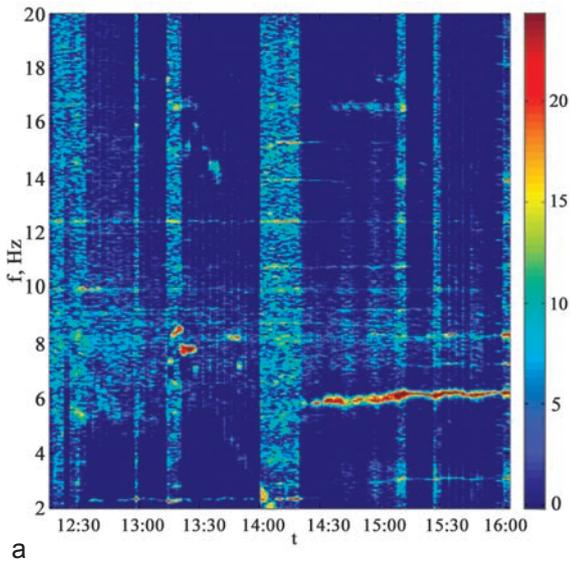
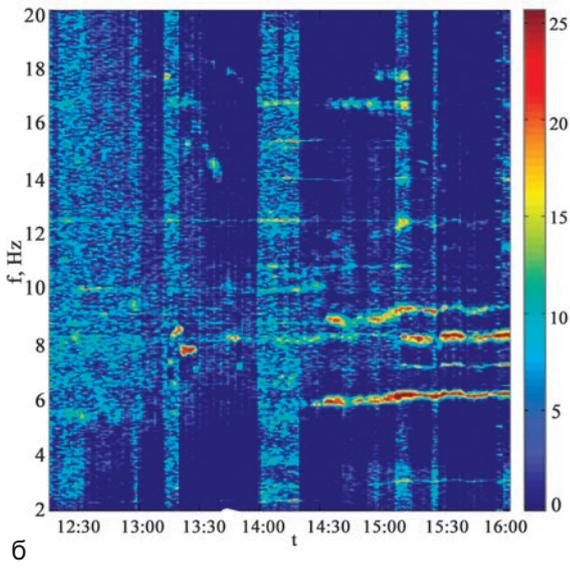


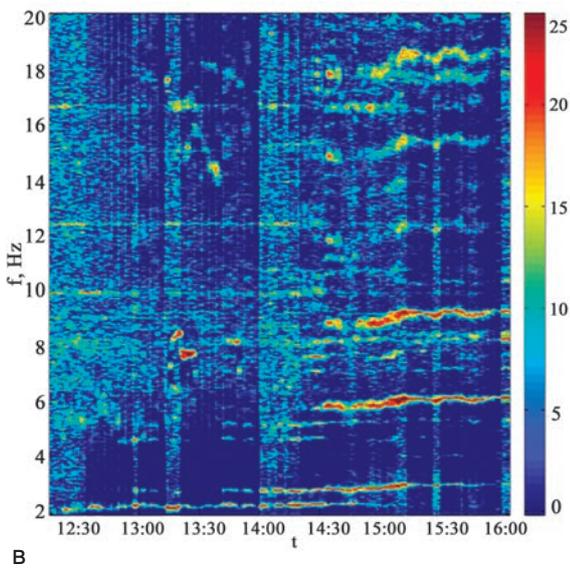
Рис. 7. Сонограммы для отношения (S/N) на выходе канала звукового давления (а) и в векторных каналах ( $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$ ), (б, в, г), приемный модуль ПМ-1



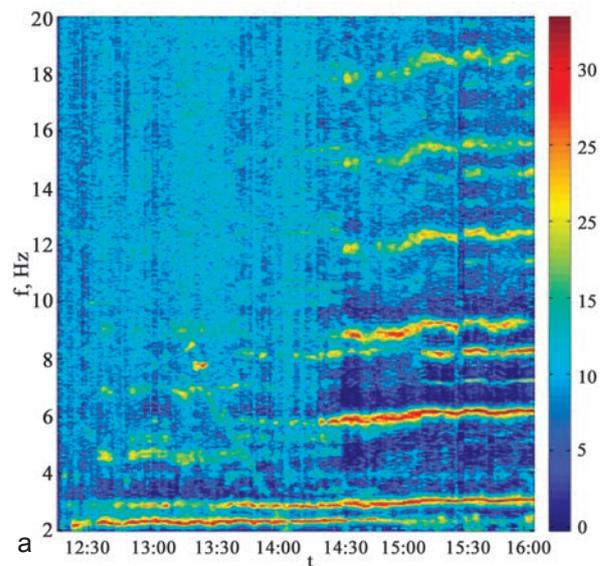
а



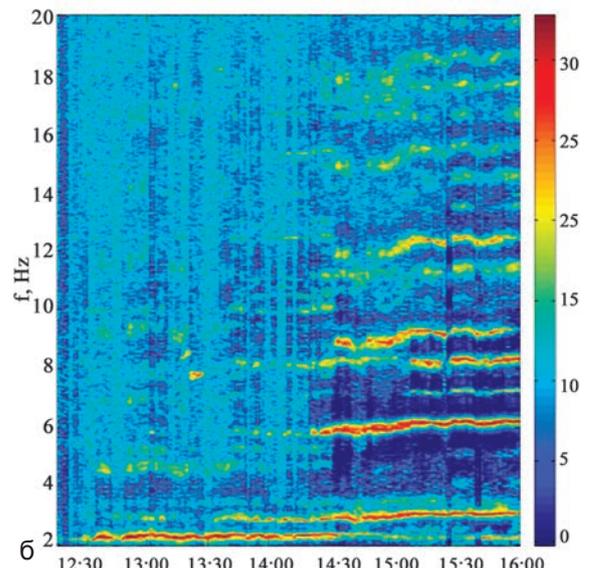
б



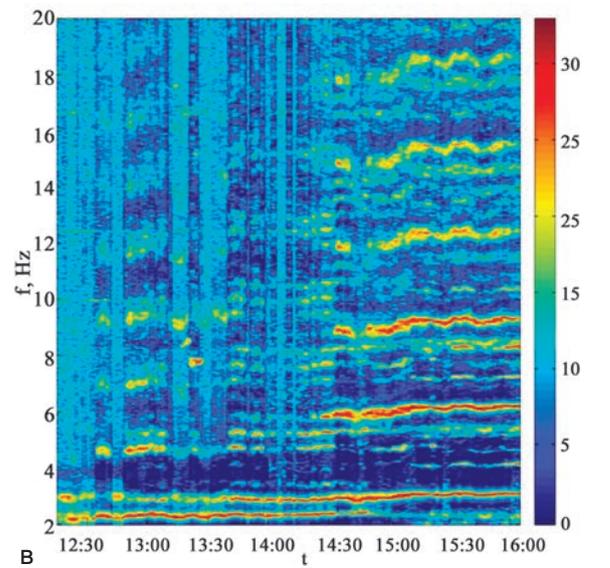
в



а



б



в

Рис. 8. Сонограммы на выходе канала звукового давления для отношения (S/N), приемные модули: ПМ-1(а); ПМ-2(б); ПМ-3 (в)

Рис. 9. Сонограммы на выходе БОС для отношения (S/N), приемные модули: ПМ-1(а); ПМ-2(б); ПМ-3 (в)

На рис. 9 поясняются сонограммы звукового поля, вычисленные на выходе блока обработки сигналов БОС. В этом блоке вычисляется максимальное отношение (S/N) из 16 возможных в диапазоне инфразвуковых частот 2–20 Гц. На рис. 10 поясняются сонограммы для оценки потенциальной помехоустойчивости комбинированного приемника для трех приемных модулей. Можно отметить, что несмотря на различный уровень сигналов на приемных модулях антенны все КП обнаруживают широкий набор дискретных составляющих ВЛЗР после обработки всех 16 информативных параметров, а потенциальная помехоустойчивость каждого из них оценивается в 25–30 дБ. Наиболее яркие дискретные составляющие ВЛЗР соответствуют лопастным частотам (3 Гц, 6 Гц, 9 Гц и т.д.). Менее яркие дискретные составляющие соответствуют вальным частотам, которые идут с шагом в 1 Гц, что соответствует 3-лопастному винту и гребному валу, совершающему 60 об/мин. Оценки помехоустойчивости КП в звуковом поле полигармонического сигнала соответствуют оценкам, полученным в поле дискретных составляющих ВЛЗР.

Можно отметить в сравнительном плане, что проблеме повышения помехоустойчивости КП и разработке соответствующих алгоритмов обработки всей скалярно-векторной информации посвящено достаточно большое количество работ. Наиболее оригинальными из них являются работы [5–9], в которых предлагается использовать для этих целей двумерную спектральную обработку сплошного спектра шумов обтекания движущегося шумового объекта (ШО), разработанную первоначально в работах [10–11]. Однако оценки помехоустойчивости, точности пеленгования и определения КПДЦ предложенного метода обработки получены в звуковом поле широкополосного модельного источника, моделирующего сплошной спектр шумов обтекания реального ШО. Хорошо известно, что сплошной спектр шумов обтекания появляется при достаточно большой скорости движения ШО, тогда как дискретные составляющие ВЛЗР присутствуют в спектре шумов при любой скорости движения ШО. Кроме того, в инфразвуковом диапазоне частот они являются наиболее информативными составляющими звукового портрета ШО, тогда как уровень шумов обтекания оказывается минимальным. По этой причине рассмотренные выше методы повышения потенциальной помехоустойчивости КП в инфразвуковом диапазоне частот и ее экспериментальные оценки в поле реального ШО можно считать приоритетными.

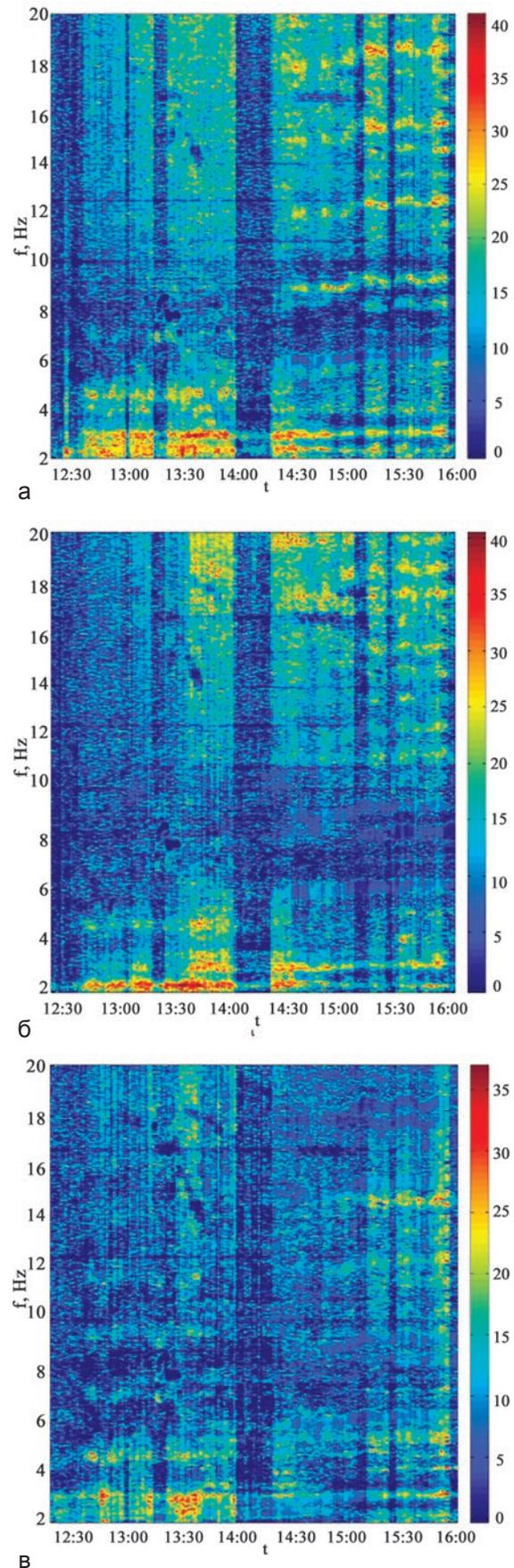


Рис. 10. Сонограммы для оценки помехоустойчивости КП, приемные модули: ПМ-1 (а); ПМ-2 (б); ПМ-3 (в)

**■ Анализ вертикальной структуры звукового поля**

Для анализа вертикальной структуры звукового поля был выполнен расчет проходных характеристик для отношения уровня суммарного процесса к помехе  $(S+N)/N$  в каналах КП в диапазоне 16–20 Гц. Результаты расчета поясняются рис. 11, на котором верхняя строка соответствует каналу звукового давления, а последующие строки соответствуют ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) компонентам вектора интенсивности в векторных каналах КП. Наибольший (средний на трассе) уровень (12 дБ в канале звукового давления) дискретных составляющих соответствует приемному модулю ПМ-3, горизонтт позиционирования которого

максимально приближен к горизонту источника (поверхности моря), а наименьший уровень (7 дБ в канале звукового давления) соответствует приемному модулю ПМ-1, горизонтт позиционирования которого максимально приближен к морскому дну. С учетом того, что в этом диапазоне частот все дискретные составляющие ВЛЗР меньше первой критической частоты волновода, можно предположить, что звуковое поле представлено обобщенной (гибридной) волной нулевого порядка, локализованной на горизонте источника. Уровень такой волны убывает экспоненциально быстро с глубиной [12]. Можно, однако, предположить, что на предельно низких частотах глубина проникновения звуковых волн в морское дно увеличивается, а при определении структуры звуко-

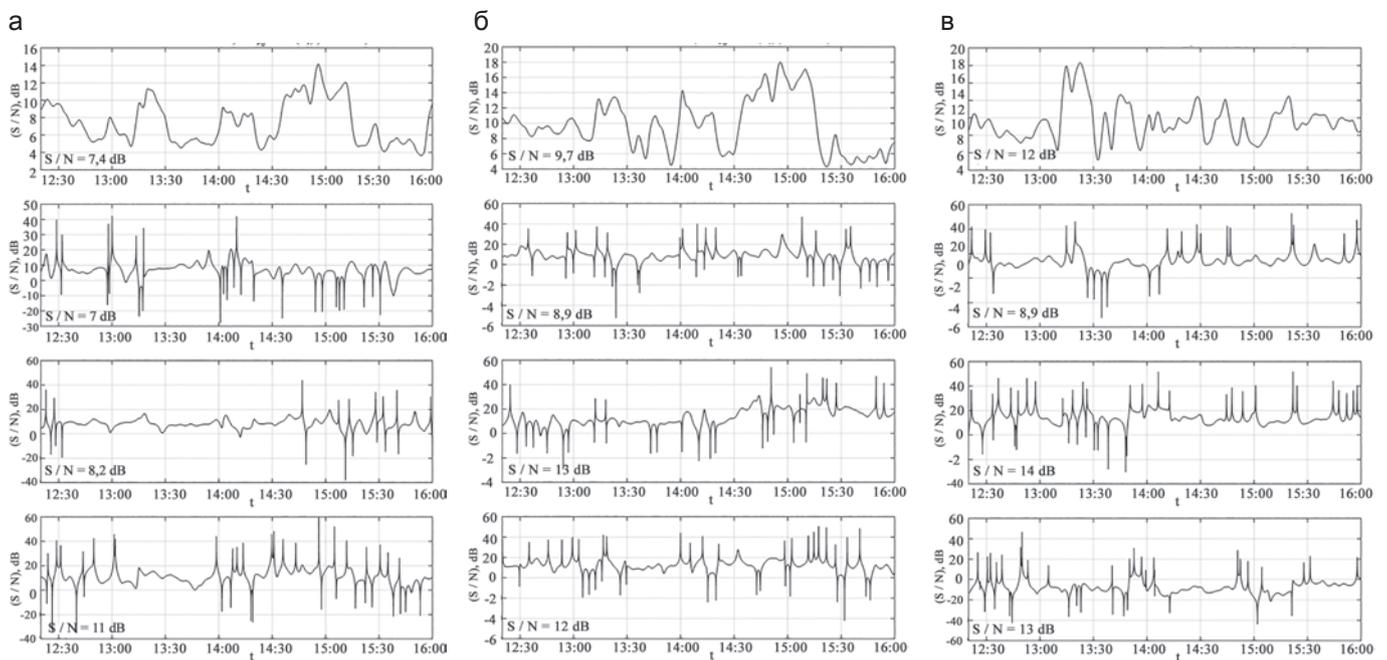
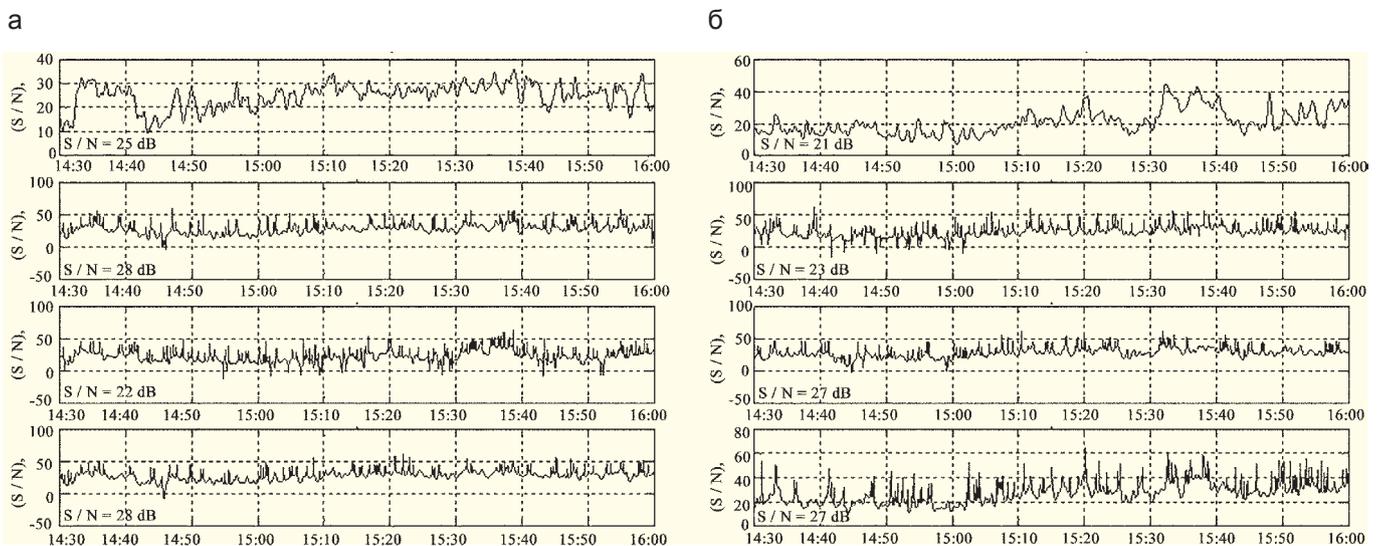


Рис. 11. Проходные характеристики для отношения  $(S/N)$  в каналах КП, приемные модули: ПМ-1 (а); ПМ-2 (б); ПМ-3 (в), частотный диапазон 16–20 Гц, время усреднения 50 с



вого поля необходимо учитывать сдвиговую упругость морского дна и пограничные волны Рэлея–Шолте, возникающие на границе раздела вода–морское дно [12].

На рис. 12 приведены проходные характеристики для отношения  $(S+N)/N$  в каналах КП в диапазоне 2–10 Гц. В этом частотном диапазоне наибольший (средний на трассе) уровень (25 дБ в канале звукового давления) дискретных составляющих соответствует приемному модулю ПМ-1, горизонт позиционирования которого максимально приближен к морскому дну. Наименьший средний уровень (15 дБ в канале звукового давления) соответствует приемному модулю ПМ-3, горизонт позиционирования которого максимально удален от морского дна. С учетом этого можно предположить, что звуковое поле в этом диапазоне частот представлено пограничной волной Рэлея–Шолте, локализованной на границе раздела вода – морское дно. Уровень такой волны убывает экспоненциально быстро при удалении от границы раздела [12]. На всех проходных характеристиках хорошо видна интерференционная структура звукового поля, обусловленная интерференцией дискретных составляющих ВЛЗР. Однако интерференционная структура на проходных характеристиках в канале звукового давления обусловлена только интерференцией нормальных волн и не содержит локальных экстремумов отношения  $(S+N)/N$ , которые появляются в векторных каналах.

Характерные максимумы отношения  $(S+N)/N$  в векторных каналах комбинированного приемника соответствуют процессам компенсации векторных потоков мощности в поле помехи ( $N$ ). Характерные минимумы отношения  $(S+N)/N$  соответствуют процессам компенсации векторных потоков мощности в суммарном поле  $(S+N)$ , как это поясняется в работе [2]. Это означает, что пространственно-частотная структура звукового поля в векторных каналах комбинированного приемника существенно усложняется локальными процессами компенсации векторных потоков мощности, увеличивая в то же время вероятность реализации повышенного отношения  $(S/N)$  при длительном наблюдении.

### ■ Анализ пространственно-временной структуры звукового поля

Для оценки корреляционных характеристик звукового поля на апертуре антенны и его пространственно-временной структуры были обработаны ЛЧМ-сигналы, сформированные в полосе 30–60 Гц, излучаемые буксируемым электродинамическим из-

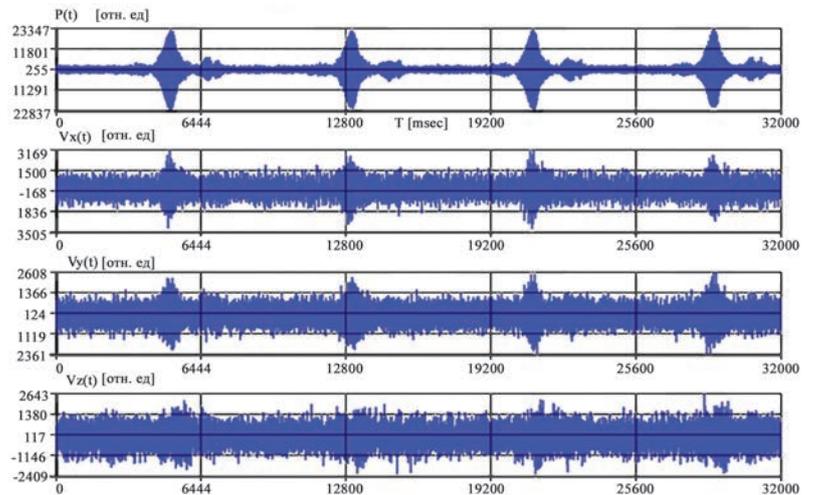
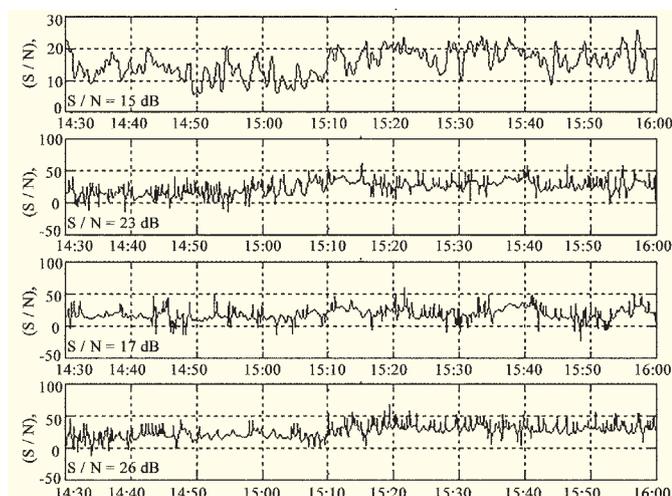


Рис. 13. Временная структура сигналов в каналах КП, приемный модуль ПМ-1

В



лучателем. Длительность ЛЧМ-сигнала составляла 4 с, а период следования 8 с. На рис. 13 поясняется временная структура сигналов и их уровень на фоне помехи в каналах комбинированного приемника. Верхняя строка соответствует каналу звукового давления  $P(t)$ , а последующие строки соответствуют ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) компонентам вектора колебательной скорости  $V(t)$  в векторных каналах КП. Расстояние между излучателем и приемной системой изменялось в пределах 1,0–2,0 км. На рис. 14 поясняется структура функций автокорреляции  $F_{pp}(\tau) = P(t) \times P(t-\tau)$  и вза-

Рис. 12. Проходные характеристики для отношения  $(S/N)$  в каналах КП, приемные модули: ПМ-1 (а); ПМ-2 (б); ПМ-3 (в); частотный диапазон 2–10 Гц, время усреднения 50 с

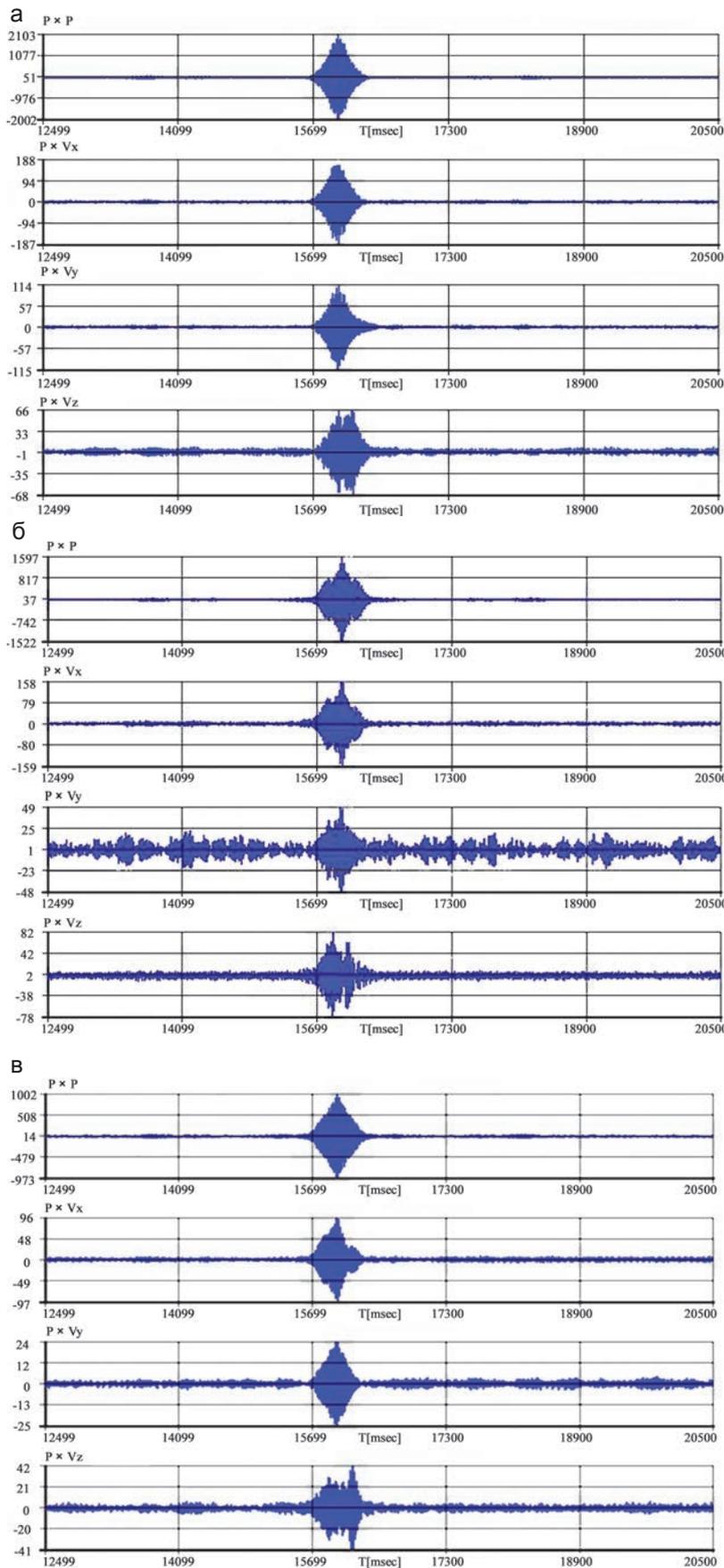


Рис. 14. Функции автокорреляции и взаимной корреляции между сигналом  $P(t)$  и сигналами в каналах  $P(t)$ ,  $V_x(t)$ ,  $V_y(t)$ ,  $V_z(t)$ , приемные модули: ПМ-1 (а); ПМ-2 (б); ПМ-3 (в)

имной корреляции  $F_{pV_i}(\tau) = P(t) \times V_i(t-\tau)$ , ( $I = x, y, z$ ) сигналов в каналах приемных модулей при минимальном (траверсном) расстоянии между излучателем и приемной системой. Можно отметить, что корреляционная обработка сигналов в каналах комбинированного приемника позволяет разрешить в корреляционном отклике вклад отдельных нормальных волн в суммарное звуковое поле. В соответствии с модельным описанием в этом диапазоне частот суммарное звуковое поле формируется тремя модами. Их количество можно отождествить с количеством максимумов огибающей корреляционного отклика в каналах комбинированного приемника. Можно также отметить, что дисперсионные искажения оказались явно выраженными в вертикальном канале КП, который в силу своей направленности оказался наиболее чувствительным к лучам, идущим под крутыми углами скольжения.

При увеличении расстояния между излучателем и приемной системой изменяются вклад отдельных нормальных волн в суммарное звуковое поле и, соответственно, форма огибающей корреляционного отклика.

На рис. 15–16 поясняются структура функций взаимной корреляции и автокорреляции в логарифмическом масштабе в каналах КП при увеличенном расстоянии между излучателем и приемной системой. Форма корреляционного отклика в этом случае упрощается и подтверждает доминирующий вклад в суммарное звуковое поле одной нормальной волны, которой может быть, вероятнее всего, пограничная волна Рэлея–Шолте, локализованная на границе раздела вода – морское дно. Можно отметить хорошие корреляционные свойства звукового поля в каналах КП и на апертуре антенны, причем выигрыш в отношении (S/N) в результате корреляционной обработки сигналов составляет 10–20 дБ.

Наибольшее сжатие ЛЧМ-сигнала после корреляционной обработки наблюдается в векторных каналах комбинированного приемника. Эта особенность объясняется тем, что спад частотной характеристики излучателя в

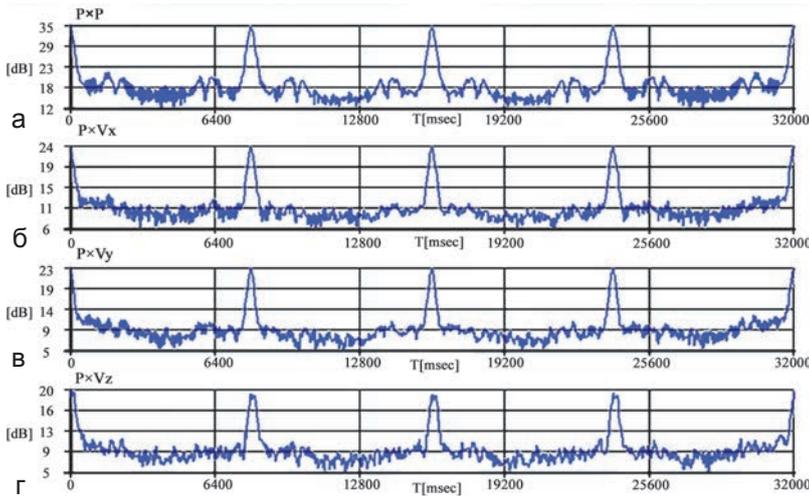


Рис. 15. Функции автокорреляции и взаимной корреляции между сигналом  $P(t)$  и сигналами в каналах  $P(t), V_x(t), V_y(t), V_z(t)$ ; ПМ-1(а); ПМ-2(б); ПМ-3 (в); ПМ-4 (г);  $V_z(t)$ , приемный модуль ПМ-1, масштаб логарифмический

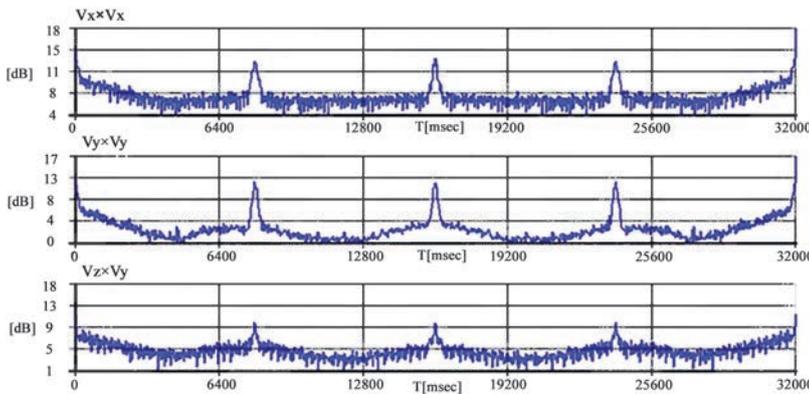


Рис. 16. Функции автокорреляции в векторных каналах  $V_x(t), V_y(t), V_z(t)$ , приемный модуль ПМ-1, масштаб логарифмический

области частот выше резонансной частоты излучателя компенсируется ростом чувствительности векторного приемника с ростом частоты. В результате частотная характеристика чувствительности тракта излучатель–приемная система становится более равномерной в рабочей полосе частот ЛЧМ-сигнала. Малая амплитуда корреляционного отклика в вертикальном канале объясняется направленными свойствами вертикального канала и горизонтальным, в основном, распространением потока мощности в волноводе. На рис. 17 поясняются коэффициенты автокорреляции  $K_{pp}(\tau)$  и взаимной корреляции  $K_{pv}(\tau)$  в каналах комбинированного приемника для приемных модулей ПМ-1, ПМ-2, ПМ-3.

$$K_{pp}(\tau) = \frac{F_{pp}(\tau)}{F_{pp}(0)}, K_{pv}(\tau) = \frac{F_{pv}(\tau)}{\sqrt{F_{pp}(0)F_{vv}(0)}}$$

где  $F_{pp}(\tau) = P(t) \times P(t-\tau)$ ,  $F_{vv}(\tau) = V(t) \times V(t-\tau)$ ,  $F_{pv}(\tau) = P(t) \times V(t-\tau)$  – автокорреляционные и взаимно-корреляционные функции (корреляционные свертки сигналов) в каналах комбинированного приемника.

Можно отметить, что коэффициенты взаимной корреляции максимальны в горизонтальных каналах КП (0,53–0,28) и минимальны в вертикальном канале (0,24–0,19). Кроме того, коэффициенты взаимной корреляции убывают по мере удаления КП от границы раздела вода–морское дно. Это можно объяснить придонной локализацией потоков мощности в рассматриваемом случае мелкого моря и инфразвуковых частот и ростом шумовой помехи по мере приближения КП к источнику шума, каким является сам катмаран и его дискретные составляющие ВЛЗР.

Представляет определенный интерес оценить возможности вертикально ориентированной антенны, состоящей из комбинированных приемников, каждый из которых обладает дипольной направленностью, определять угол места на источник сигнала. Для этого были вычислены взаимно-корреляционные функции между сигналами, регистрируемыми приемными модулями ПМ-1 и ПМ-3, расстояние между которыми составляет 6 м, но существенно меньше длины волны в рабочем диапазоне частот. По результатам взаимно-корреляционной обработки сигналов в каналах приемных модулей ПМ-1 и ПМ-3, угол скольжения в месте приема можно определить по формулам:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{c_1 \Delta \tau_{13}}{\ell_{13}}\right), \quad (1)$$

$$\beta = \arctg\left(\frac{F_z}{F_r}\right),$$

где  $\Delta \tau_{13}$  – момент времени, соответствующий максимуму взаимно-корреляционной функции  $F_{13}(\tau) = P_1(t) \times P_3(t-\tau)$ ,  $c_1$  – скорость звука в воде,  $\ell_{13} = 6$  м – расстояние между приемными модулями ПМ-1 и ПМ-3,  $F_z(\tau) = P(t) \times V_z(t-\tau)$ ,  $F_r(\tau) = P(t) \times V_r(t-\tau)$  – взаимно-корреляционные функции для вертикального и горизонтального каналов приемного модуля ПМ-1, взятые при  $\tau = 0$ .

Обе оценки по формулам (1) дают близкие значения угла скольжения  $\beta = 11-12^\circ$ , которые позволяют определить эффективное значение фазовой скоро-

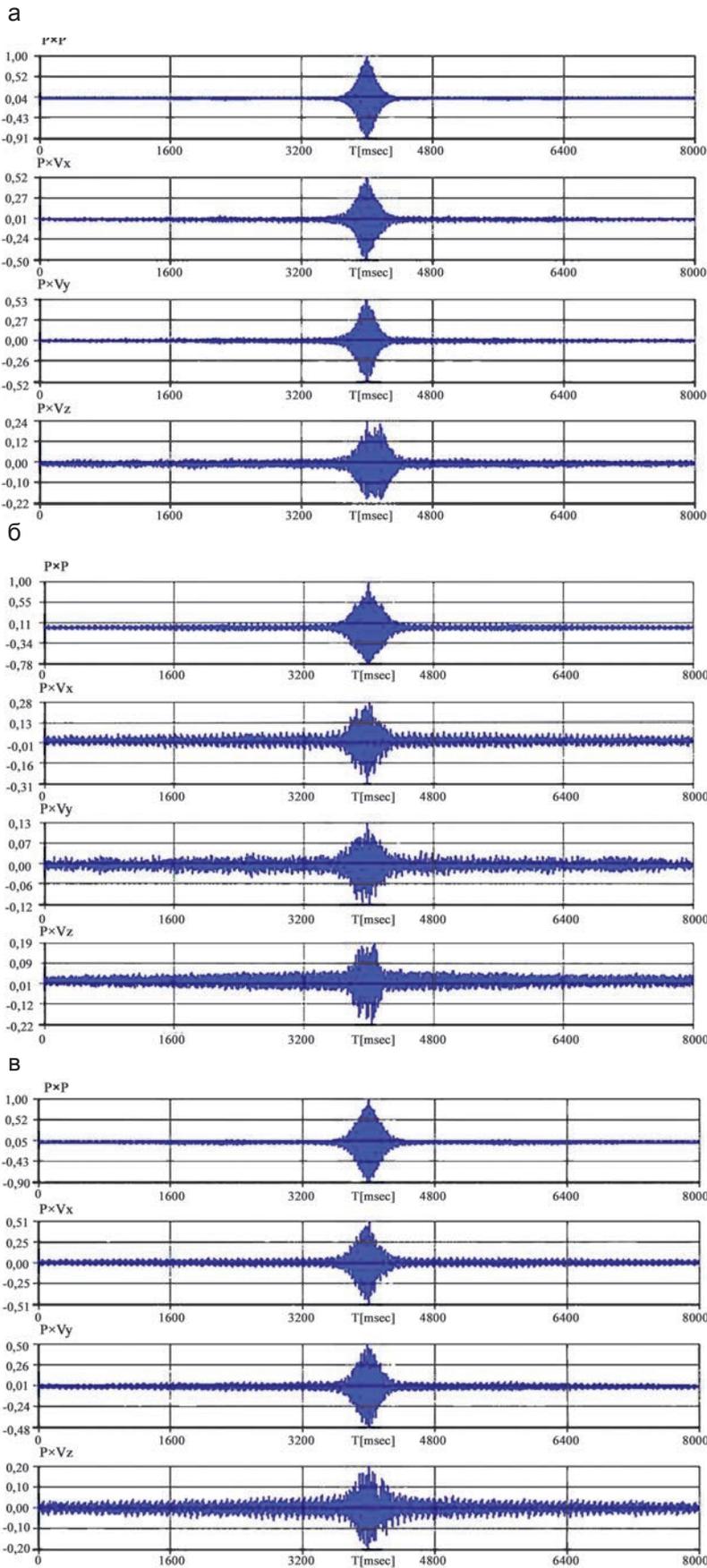


Рис. 17. Коэффициенты автокорреляции и взаимной корреляции в каналах КП, приемные модули: ПМ-1 (а); ПМ-2 (б); ПМ-3 (в);

сти распространения нормальных волн  $c_{\phi} = c_1 / \cos\beta$ , усредненной по рабочей полосе частот ЛЧМ-сигнала. В свою очередь, знание эффективной фазовой скорости распространения группы нормальных волн в рабочей полосе частот необходимо, например, для организации когерентной обработки сигналов на апертуре горизонтально ориентированной антенны, решающей проблему пеленгования источника. Иначе говоря, приемная система Т-образной формы, содержащая вертикально ориентированную антенну и горизонтально ориентированную антенну, оказывается наиболее эффективной, если ее элементами являются комбинированные приемники, обладающие повышенной помехоустойчивостью в условиях мелкого моря и инфразвуковых частот. Вертикально ориентированная антенна позволяет определять угол места источника и эффективную фазовую скорость группы нормальных волн, формирующих звуковое поле в волноводе в широкой полосе частот, даже если ее апертура существенно меньше длины волны. Горизонтально ориентированная антенна решает проблему пеленгования источника методами когерентной обработки сигналов с использованием эффективной фазовой скорости, учитывающей дисперсионные свойства волновода. По совокупности положительных свойств такая комбинированная (Т-образная) антенна позволяет решать наиболее эффективно проблему определения координат и параметров движения цели (КПДЦ) в условиях мелкого моря и инфразвуковых частот методами активно-пассивной локации.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ пространственно-частотной и пространственно-временной структуры звукового поля в условиях мелкого моря и инфразвуковых частот с использованием вертикально ориентированной антенны с комбинированными приемниками позволяет сделать следующие выводы.

Результаты спектрального анализа сигналов в каналах комбинированных приемников в диапазоне предельно низких частот 2–20 Гц подтверждают ранее полученные оценки повышенной помехоустойчивости комбинированных приемников (25–30 дБ). Для реализации повышенной помехоустойчивости комбинированных приемников разработано программное обеспечение, в котором использовано полное описание энергетической структуры звукового поля, представленной набором 16 информативных параметров. Важность полученных оценок заключается в том, что в этом диапазоне частот практически невозможно использование низкочастотных излучателей модельных сигналов. Использование в эксперименте вертикально ориентированной антенны позволило также идентифицировать нормальные волны, вносящие основной вклад в пространственную структуру звукового поля в рабочем диапазоне частот.

Результаты корреляционной обработки сложных ЛЧМ-сигналов, излучаемых низкочастотным электродинамическим излучателем, позволяют оценить

корреляционные свойства звукового поля на апертуре антенны. Полученные оценки коэффициентов корреляции свидетельствуют о предпочтительности использования комбинированных приемников (в сравнении с гидрофоном), частотная характеристика которых компенсирует характерный спад чувствительности резонансного излучателя в диапазоне частот выше резонансной. Взаимно-корреляционная обработка сигналов на апертуре антенны позволяет также повысить точность определения угла места источника и определить эффективную фазовую скорость. Знание этой величины необходимо для организации аддитивной обработки сигналов на апертуре горизонтально ориентированных антенн.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «Новые вызовы климатической системы Земли», подпрограммы № 18-1-004 «Изучение фундаментальных основ взаимодействия разномасштабных гидроакустических, гидрофизических и геофизических процессов».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б., Злобин Д.В., Косарев Г.В. Акустика мелкого моря в скалярно-векторном описании: теория и эксперимент. Владивосток: Дальнаука, 2019. 360 с.
2. Касаткин Б.А., Касаткин С.Б. Экспериментальная оценка помехоустойчивости комбинированного приемника в инфразвуковом диапазоне частот // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 1 (27). С. 38–47.
3. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
4. Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Переселков С.А. Голографический метод оценки пеленга на шумовой источник векторными приемниками // Гидроакустика. 2018. Вып. 35 (3). С. 15–23.
5. Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Переселков С.А. Применение робастного голографического метода для обнаружения и оценки координат малозумных движущихся объектов в условиях надводного судоходства // Гидроакустика. 2019. Вып. 38 (2). С. 47–58.
6. Кузнецов Г.Н., Белова Н.И., Боровский П.А. Сравнительная оценка точности пеленгования движущегося источника с использованием скалярной антенны или векторно-скалярного модуля. Метрология гидроакустических измерений // Материалы Всерос. науч.-техн. конф. Менделеево, 2013. Т. 2. С. 150–155.
7. Белов А.И., Кузнецов Г.Н. Пеленгование и подавление векторно-скалярных сигналов в мелком море с учетом их корреляционной и модовой структуры // Акуст. журн. 2016. Т. 62, № 3. С. 308–317.
8. Казначеев И.В., Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Переселков С.А. Интерферометрический метод обнаружения движущегося источника звука векторно-скалярным приемником // Акуст. журн. 2018. Т. 64, № 1. С. 33–45.
9. Интерференция широкополосного звука в океане: сб. науч. тр. Горький: Институт прикладной физики АН СССР, 1984. 184 с.
10. Орлов Е.Ф., Шаронов Г.А. Интерференция звуковых волн в океане. Владивосток: Дальнаука, 1998. 195 с.
11. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Пограничные волны в проблеме обнаружения подводных источников шума // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4 (30). С. 37–48.

