

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН, ФОРМИРУЮЩИХ ЗВУКОВОЕ ПОЛЕ В МЕЛКОМ МОРЕ В ИНФРАЗВУКОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ. Часть II

Касаткин С.Б.

Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Владивосток

E-mail: kasatkas@marine.febras.ru

Аннотация

Анализируются результаты экспериментальных исследований звукового поля, зарегистрированного комбинированными приемниками, образующими вертикально ориентированную двухэлементную антенну. Звуковое поле формировалось дискретными составляющими вально-лопастного звукоряда шумового сигнала НИС «Юрий Молоков» в инфразвуковом диапазоне частот 2–20 Гц, а также буксируемым низкочастотным излучателем полигармонического сигнала в диапазоне частот 30–60 Гц. Глубина моря и рабочий диапазон частот 2–20 Гц исключали возможность возбуждения нормальных волн дискретного спектра в модельном волноводе Пекериса в этом диапазоне частот. По результатам спектрального анализа шумового сигнала получена оценка потенциальной помехоустойчивости комбинированного приемника при использовании полного набора информативных параметров, характеризующих энергетическую структуру звукового поля. По результатам анализа вертикальной структуры звукового поля в инфразвуковом диапазоне частот был сделан вывод о том, что звуковое поле сформировано неоднородными нормальными волнами Шолте, регулярной и обобщенной (гибридной). В дальней зоне источника доминирует регулярная волна Шолте, локализованная на границы раздела вода – морское дно. В ближней зоне источника возрастает роль обобщенной волны Шолте, локализованной на горизонте источника, а звуковое поле формируется парой волн Шолте, регулярной и обобщенной.

Ключевые слова: комбинированный приемник, шумовое поле, помехоустойчивость, обобщенные неоднородные волны, гибридные волны.

IDENTIFICATION OF NORMAL WAVES FORMING A SOUND FIELD IN A SHALLOW SEA AT THE INFRASONIC FREQUENCY RANGE. Part II

Kasatkin S.B.

*Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the
Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Sukhanova st. 5a*

E-mail: kasatkas@marine.febras.ru

Abstract

The results of experimental studies of the sound field recorded by combined receivers forming a vertically oriented two-element antenna are analyzed. The sound field was formed by discrete components of the vane-blade scale of the noise signal of the science ship «Yuri Molokov» in the infrasonic frequency range of 2–20 Hz, as well as by a towed low-frequency emitter of a polyharmonic signal in the frequency range 30–60 Hz. The depth of the sea and the operating frequency range of 2–20 Hz excluded the possibility of exciting normal waves of the discrete spectrum in the model Pekeris waveguide in this frequency range. Based on the results of spectral analysis of the noise signal, an estimate of the potential noise immunity of the combined receiver was obtained using a full set of informative parameters characterizing the energy structure of the sound field. Based on the results of the analysis of the vertical structure of the sound field in the infrasonic frequency range, it was concluded that the sound field is formed by inhomogeneous normal Scholte waves, regular and generalized (hybrid). In the far zone of the source, a regular Scholte wave dominates, localized at the water – seabed interface. In the near-field zone of the source, the role of the generalized Scholte wave localized at the source horizon increases, and the sound field is formed by a pair of Scholte waves, regular and generalized.

Keywords: combined receiver, noise field, noise immunity, generalized non-uniform waves, group velocity

ORCID id: 0000-0002-0945-8355

Введение

Звуковые поля, формируемые в мелком море в инфразвуковом диапазоне частот движущимся источником, надводным или подводным, играют важную роль в проблеме разработки средств освещения подводной обстановки (СОПО). Проблема заключается в том, что в модельном волноводе Пекериса, который чаще всего используется в классическом описании звуковых полей, волновое движение, представленное нормальными волнами дискретного спектра, на частотах, меньших первой критической частоты модельного волновода Пекериса, отсутствует. В первой части экспериментального исследования этой проблемы [1] были получены убедительные доказательства доминирующей роли неоднородных обобщенных волн (гибридных волн), локализованных на горизонте источника, в формировании звукового поля инфразвукового диапазона. Эксперимент [1] проводился в ближ-

ней зоне источника на расстоянии 1–2 км от него в осеннее время года (октябрь), когда влияние придонного звукового канала в значительной мере ослаблено. Цель настоящей работы заключается в дальнейшем исследовании пространственно-частотной структуры звуковых полей инфразвукового диапазона в других гидрологических условиях и на достаточно больших расстояниях от источника. Отметим, что неоднородные обобщенные волны (гибридные волны) появляются при решении граничной задачи (ГЗ) для модельного волновода Пекериса, а также для более сложного волновода жидкий слой – твердое полупространство в несамосопряженной модельной постановке. Такая модельная постановка является естественной и математически корректной для открытых систем типа волновода, нагруженного на полупространство. Основные особенности модельного решения ГЗ для открытых волноводов в классе обобщенных функций на частотах, меньших первой критической частоты, приведены в работе [2].

Состав оборудования и место проведения эксперимента

Для проведения экспериментальных исследований были подготовлены приемные модули ПМ-1, ПМ-2, оснащенные комбинированными приемниками (КП). Эксперимент проводился в акватории Уссурийского залива. В качестве источника звуковых сигналов использовались НИС «Юрий Молоков» и его дискретные составляющие вальнолопастного звукоряда (ВЛЗР), а также низкочастотный излучатель полигармонического сигнала в полосе частот 30–60 Гц. Горизонты установки приемных модулей ПМ-1, ПМ-2 составляют 16 м и 24 м соответственно, глубина места $h = 43\text{--}44$ м. Дистанция между ШО и приемной системой изменялась от 10 миль в начальной точке трассы до 1 мили в конечной точке. Профиль вертикального распределения скорости звука соответствовал придонному звуковому каналу. Волнение моря за время проведения эксперимента было минимальным и не превышало 2–3 балла. Схема проведения эксперимента поясняется рис. 1. В качестве рабочего использован обратный галс в интервале времени 13 час. 00 мин. – 15 час. 30 мин., в течение которого расстояние между НИС «Юрий Молоков» и приемной системой РМ123 изменялось от 10 миль до 1 мили.

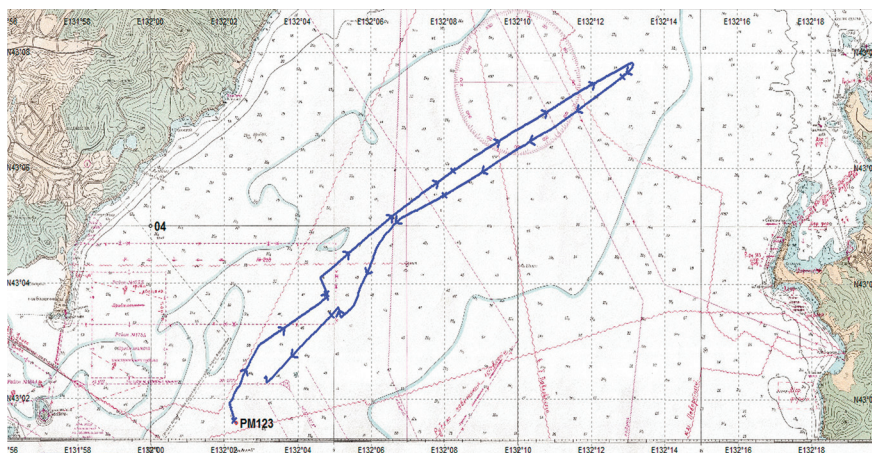


Рис. 1. Схема постановки приемной системы и маневрирования НИС «Юрий Молоков»

Обработка сигналов и оценка потенциальной помехоустойчивости КП

Обработка сигналов предполагает спектральный анализ сигналов на основе БПФ в каналах комбинированного приемника, вычисление полного набора информативных параметров, характеризующих энергетическую структуру звукового поля в скалярно-векторном описании, построение проходных характеристик и соответствующих сонограмм звукового поля в рабочем диапазоне частот в рабочем интервале времени. Для оценки потенциальной помехоустойчивости КП в составе вертикальной антенны была выполнена в блоке обработки сигналов (БОС), компаратора, обработка всей скалярно-векторной информации, представленной набором 16 информативных параметров, как это описано в работе [1], по дискретным составляющим ВЛЗР НИС «Юрий Молоков». Сонограммы звукового поля в инфразвуковом диапазоне частот 2,0–20 Гц для отношения сигнал-помеха (S/N) в канале звукового давления для приемных модулей ПМ-1 и ПМ-2 поясняются рис. 2 а, б соответственно. Можно отметить, что на больших расстояниях уровень дискретных составляющих ВЛЗР, зарегистрированных ПМ-2, существенно выше уровня соответствующих дискретных составляющих, зарегистрированных ПМ-1. Поскольку все дискретные

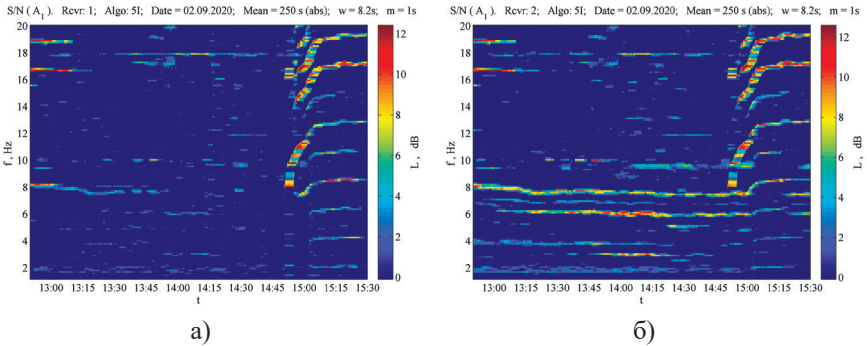


Рис. 2. Сонограммы звукового поля для отношения (S/N) в канале звукового давления: а) ПМ-1; б) ПМ-2

составляющие ВЛЗР ниже первой критической частоты модельного волновода Пекериса, сам факт существования волнового движения на столь больших расстояниях можно объяснить только в рамках обобщенного модельного решения ГЗ, соответствующего несамосопряженной модельной постановке [2]. Сонограммы звукового поля в инфразвуковом диапазоне частот 2,0–20 Гц для отношения сигнал-помеха (S/N) на выходе компаратора для приемных модулей ПМ-1 и ПМ-2 поясняются рис. 3 а, б соответственно. Можно отметить, что обработка сигналов по полному набору информативных параметров позволила существенно повысить отношение (S/N) на выходе компаратора для слабых сигналов, зарегистрированных обоими приемными модулями на больших расстояниях. Наконец, рис. 4 поясняет оценку

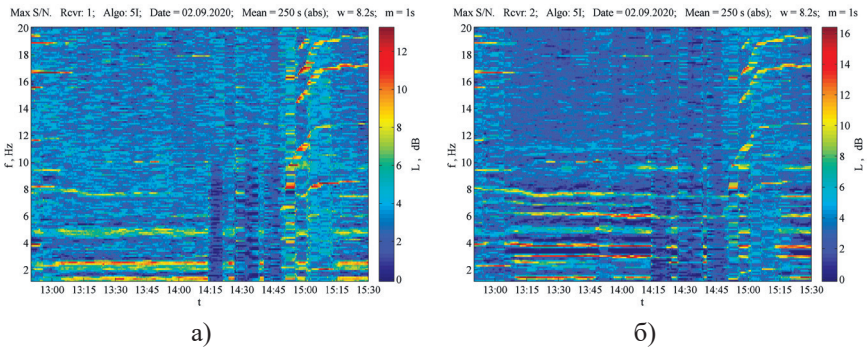


Рис. 3. Сонограммы звукового поля для отношения (S/N) на выходе компаратора: а) ПМ-1; б) ПМ-2

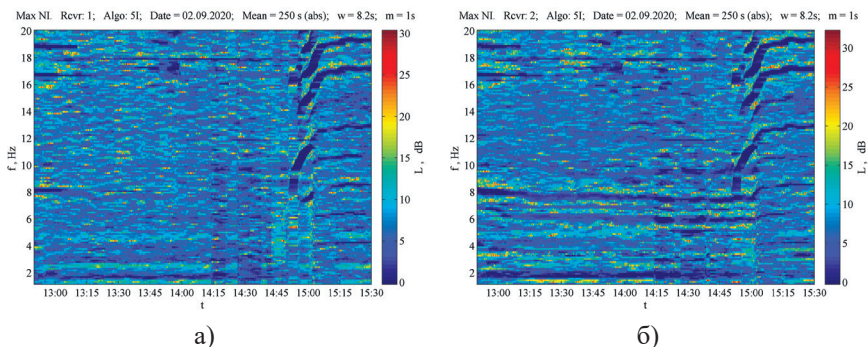


Рис. 4. Сонограммы для оценки потенциальной помехоустойчивости КП: а) – ПМ-1; б) – ПМ-2

помехоустойчивости КП в инфразвуковом диапазоне частот. Можно отметить, что потенциальная помехоустойчивость КП правильно оценивается (15–20 дБ) только при регистрации слабых по уровню сигналов, которые усиливаются приемным трактом без амплитудных искажений. При регистрации сильных по уровню сигналов, которые усиливаются приемным трактом с ограничением по амплитуде, оценки помехоустойчивости оказываются существенно заниженными 3–5 дБ.

Для анализа вертикальной структуры звукового поля были построены проходные характеристики для отдельной дискретной составляющей ВЛЗР в полосе 7,5–8,5 Гц в дальней зоне источника в диапазоне расстояний 10,0–1,0 миль. Проходные характеристики в каналах комбинированных приемников поясняются рис. 5. Верхние строчки относятся к каналу звукового давления. Нижние строчки относятся к векторным каналам (x, y, z). Красный цвет относится к суммарному полю сигнал плюс помеха (S + N), синий цвет к помехе (N), которая выделялась из суммарного процесса частотным окном Хэмминга. Логарифмические уровни векторных компонент, будучи положительно определенными, отображаются в сторону положительных значений, если сама компонента является положительной, и в сторону отрицательных значений, если сама компонента является отрицательной. Цифрами на рисунках отмечены средние по трассе значения отношения (S/N). Можно отметить наличие знакопеременной составляющей в векторных каналах КП. Эта особенность проходных характеристик

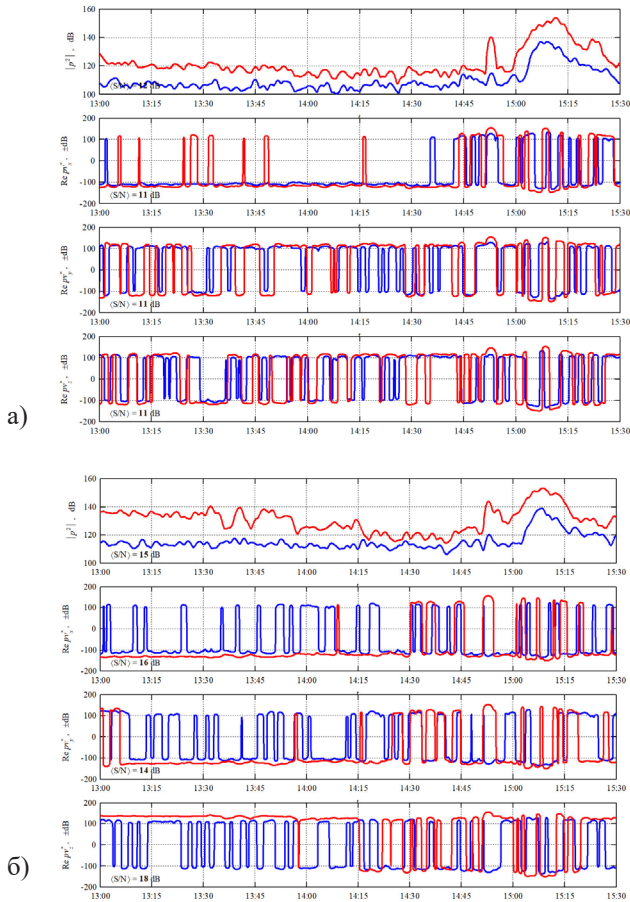


Рис. 5. Проходные характеристики в каналах КП:
 а) – ПМ-1; б) – ПМ-2. Время усреднения 150 с

связана с наличием в суммарном звуковом поле инфразвукового диапазона вытекающих (в полупространство) нормальных волн комплексного спектра. В свою очередь, вытекающие волны продолжаютя в волновод стоячими волнами (в несамосопряженной модельной постановке), в которых возрастает роль вихревых структур (знакопеременных) в векторных каналах КП [3]. По проходным характеристикам для отношения (S/N) можно оценить средний по трассе коэффициент затухания неоднородной волны (вертикального волнового числа) и вычислить групповую скорость, как это сделано в работе [1].

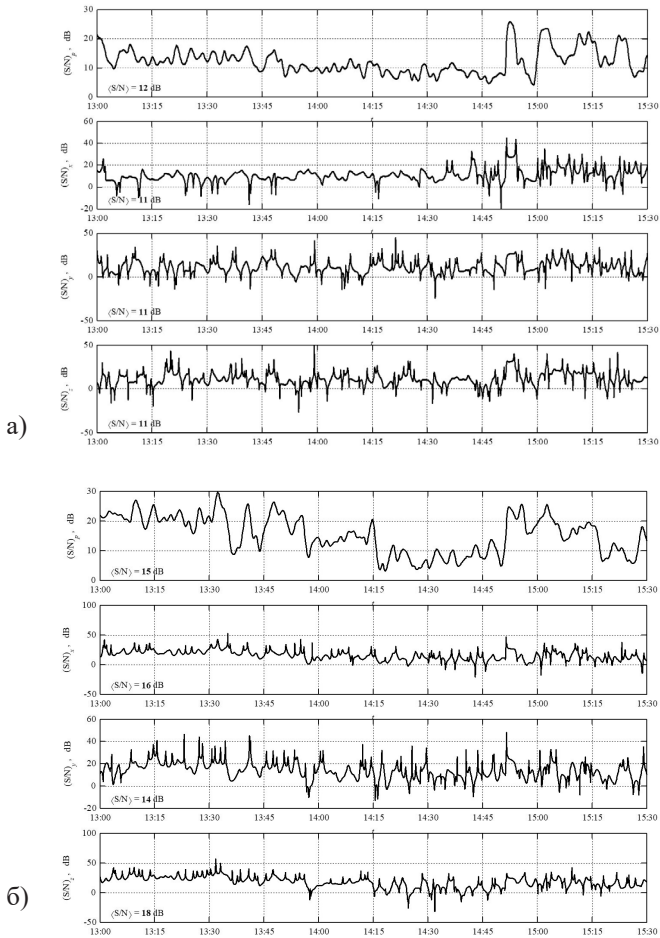


Рис. 6. Проходные характеристики для отношения (S/N) в каналах КП: а) ПМ-1; б) ПМ-2

Ее численная оценка (1140 м/с) неплохо соответствует ранее полученным данным [1] в этом диапазоне частот.

Однако она заметно превышает скорость поперечной волны по данным работы [4], а, следовательно, и скорость регулярной волны Шолте в консолидированных осадках верхнего слоя морского дна. Можно ожидать, что с дальнейшим увеличением частоты и появлением первой пары нормальных волн высшего порядка, локализованных в придонном звуковом канале, локализация суммарного звукового

поля вблизи дна сохранится, а групповая скорость будет расти. Рис. 7, 8 поясняют проходные характеристики для частоты 35 Гц полигармонического сигнала, излучаемого буксируемым излучателем. Проходные характеристики, поясняемые рис. 7, 8, полностью подтверждают это предположение, а групповая скорость совместного волнового движения увеличивается до 1420 м/с.

Наконец, можно проанализировать пространственную структуру звукового поля в ближней зоне источника, которая поясняется рис. 9, 10 для дискретной составляющей ВЛЗР в полосе 3,5–4,5 Гц.

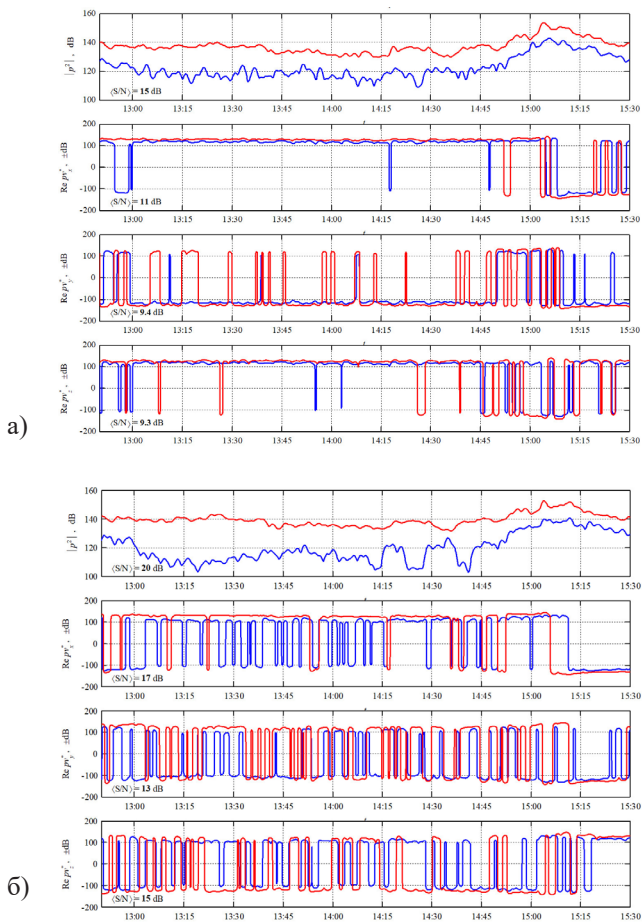


Рис. 7. Проходные характеристики в каналах КП:
а) ПМ-1; б) ПМ-2, Время усреднения 150 с

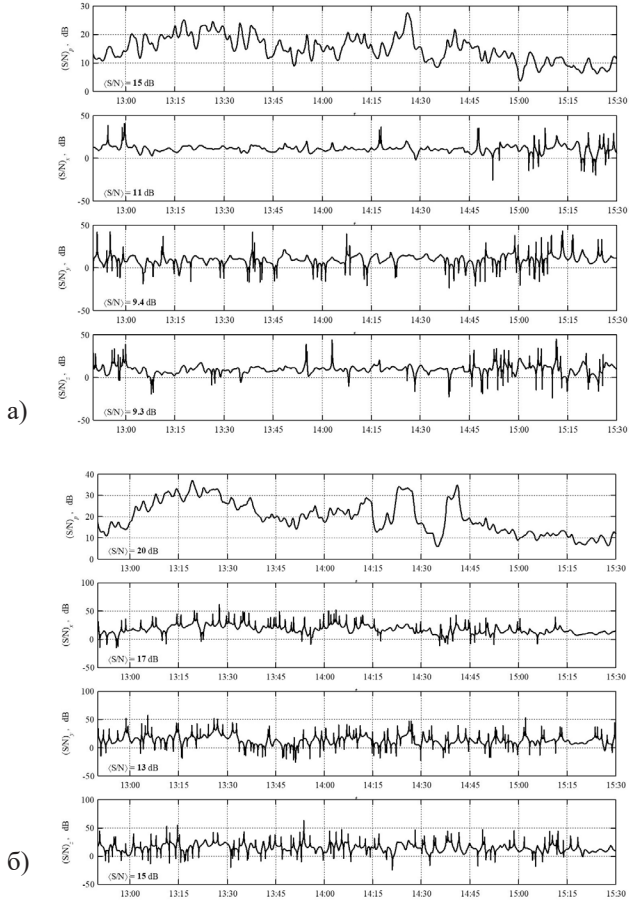


Рис. 8. Проходные характеристики для отношения (S/N) в каналах КП: а) ПМ-1; б) ПМ-2

Можно отметить, что в этом диапазоне малых расстояний и рабочих частот уровни сигналов на обоих приемных модулях, разнесенных по глубине на 8 м, отличаются незначительно ($\pm(1-2)$ дБ). Этот экспериментальный факт вполне объясним соизмеримым вкладом обобщенной волны Шолте, локализованной на горизонте источника, и регулярной волны Шолте, локализованной на границе раздела вода – морское дно. Пример звукового поля, сформированного этой парой неоднородных волн Шолте, приведен в работе [2]. Там же приведены примеры вихревых структур в поле горизонтальных потоков мощно-

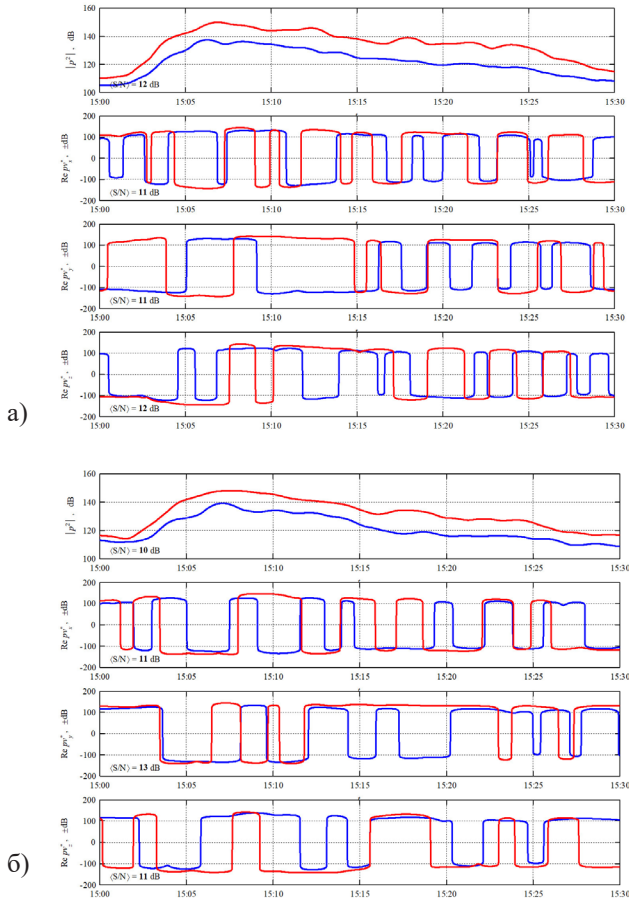


Рис. 9. Проходные характеристики в каналах КП:
 а) ПМ-1; б) ПМ-2. Время усреднения 150 с

сти, которые хорошо подтверждаются наличием вихревых (знакопеременных) структур в векторных каналах КП на рис. 9.

Заключение

Выполнено экспериментальное исследование пространственно-частотной структуры звуковых полей в мелком море в наиболее интересном инфразвуковом диапазоне частот в диапазоне расстояний 1–18 км. Показаны преимущества обработки всей скалярно-векторной

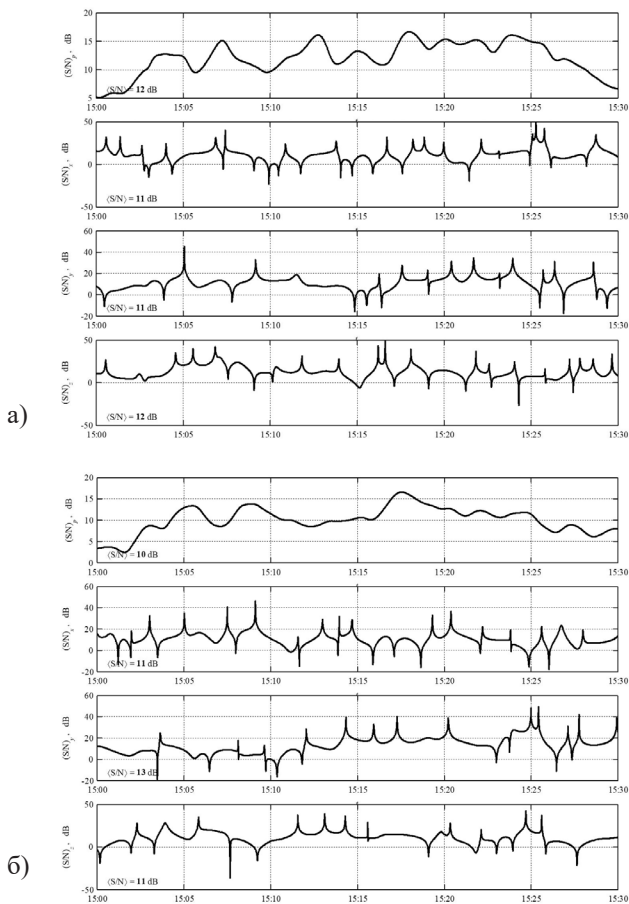


Рис. 10. Проходные характеристики для отношения (S/N) в каналах КП: а) ПМ-1; б) ПМ-2

информации по полному набору информативных параметров, характеризующих энергетическую структуру звуковых полей. Полученные в настоящем эксперименте оценки потенциальной помехоустойчивости комбинированного приемника хорошо подтверждают ранее полученные оценки (15–25 дБ). Использование в эксперименте пары комбинированных приемников, разнесенных по вертикали на 8 м, позволило исследовать вертикальную структуру звукового поля на частотах, меньших первой критической частоты модельного волновода Пекериса, и подтвердить решающую роль неоднородных волн

Шолте, регулярной и обобщенной, в формировании звукового поля в этом диапазоне частот. Экспериментально подтверждено существование обобщенных (гибридных) волн и также вихревых структур в звуковом поле инфразвукового диапазона. Этот экспериментальный факт подтверждает также целесообразность использования несамосопряженной модельной постановки при решении граничных задач прикладной гидроакустики.

Литература

1. Касаткин С.Б. Идентификация нормальных волн, формирующих звуковое поле в мелком море в инфразвуковом диапазоне частот. Часть I. // Настоящий сборник.
2. 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. 2019. 360 с.
3. 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.
4. Свининников А.И. Петрофизика западной части Тихого океана и окраинных морей востока Азии. Владивосток. Дальнаука. 2004. С. 226–235.

References

1. Kasatkin S.B. Identification of normal waves forming a sound field in a shallow sea in the infrasonic frequency range. Part I. // This collection.
2. Kasatkin B.A., Zlobina N.V., Kasatkin S.B., Zlobin D.V., Kosarev G.V. Acoustics of the shallow sea in scalar – vector description. Theory and experiment. Vladivostok. 2019. 360p.
3. Shchurov V.A., Kuleshov V.P., Cherkasov A.V. Vortex properties of the acoustic intensity vector in a shallow sea // Akust. zhurn. 2011. V. 57. No. 6. P. 837–843.
4. Svininnikov A.I. Petrophysics of the western frequencies of the Pacific Ocean and the marginal seas of the east of Asia. Vladivostok. Dalnauka. 2004. P. 226–235.