

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ КОМБИНИРОВАННОГО ПРИЕМНИКА НА БОРТУ ПОДВОДНОГО ПЛАНЕРА (ГЛАЙДЕРА)

Б.А. Касаткин, С.Б. Касаткин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских технологий ДВО РАН¹

При работе приемной системы на борту движущегося носителя возникает специфическая проблема уменьшения собственных шумов носителя, уровень которых зависит от типа приемной системы и алгоритмов обработки сигналов. В настоящей работе рассматриваются особенности работы комбинированного приемника на борту подводного планера (глайдера) в собственных шумах обтекания, которые возникают при изменении горизонта позиционирования глайдера. Предложено полное описание энергетической структуры звукового поля, включающее 16 информативных параметров. В их число входят квадрат звукового давления, компоненты комплексного вектора интенсивности, компоненты вещественного ротора вектора интенсивности и квадратичные компоненты комплексного вектора градиента давления. Приводятся результаты натурального эксперимента, выполненного в мелком море, в котором глайдер, оснащенный комбинированным приемником, периодически изменял горизонт позиционирования в режиме погружение – всплытие. Анализируются в сравнительном плане уровни шумов обтекания на выходе канала звукового давления и на выходе векторных каналов при различном определении информативных параметров, характеризующих звуковое поле в скалярно-векторном описании. Приводятся оценки уровня шумов обтекания, подтверждающие преимущества комбинированного приемника в сравнении с гидрофоном при его работе в составе бортовой приемной системы в ближнем поле собственных шумов обтекания. Рассматриваются особенности работы комбинированного приемника на борту подводного планера (глайдера) в собственных шумах обтекания, которые возникают при изменении горизонта позиционирования глайдера. Анализируются в сравнительном плане уровни шумов обтекания на выходе канала звукового давления и на выходе векторных каналов при различном определении информативных параметров, характеризующих звуковое поле в скалярно-векторном описании. Приводятся результаты натурального эксперимента, подтверждающие преимущества комбинированного приемника в сравнении с гидрофоном при его работе в составе бортовой приемной системы в ближнем поле собственных шумов обтекания.

ВВЕДЕНИЕ

При использовании гидроакустических приемных систем, решающих проблему обнаружения и определения координат и параметров движения цели (КПДЦ) на борту движущегося носителя, надводного корабля или подводной лодки, возникает проблема защиты приемной системы от собственных шумов носителя. Такие шумы, чаще всего именуемые структурной помехой, включают шумы обтекания и шумы вибрационного типа, возникающие при работе электромеханических устройств и преобразователей, содержащих вращающиеся элементы, роторы, гребные валы и т.д. С вибрационной помехой связаны, как правило, изгибные колебания тонкостенных элементов конструкции планера. Особенность структурной

помехи заключается прежде всего в том, что она формирует в водной среде ближнее звуковое поле, которое по определению является реактивным полем в диапазоне низких звуковых и инфразвуковых частот. Здесь и далее по тексту под реактивным полем понимается звуковое поле, в котором давление и колебательная скорость сдвинуты по фазе на 90° . В таком поле реактивная составляющая существенно превышает активную составляющую поля, для которой давление и колебательная скорость являются синфазными. Перспективность использования приемных систем на основе векторных или комбинированных приемников (КП) для работы в ближнем поле струк-

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

турной помехи неоднократно подчеркивалась в работах Клячкина В.И., полный перечень которых можно найти в монографиях [1–3], также содержащих обширный перечень работ этого направления. Однако основные выводы о перспективности использования комбинированных приемников, полученные в этих работах, были сформулированы либо на основе теоретического анализа, либо на основе численных экспериментов. Экспериментальная оценка шумов обтекания при работе комбинированного приемника была предпринята в модельном эксперименте в работе [4]. Наконец, реальное предложение по практическому использованию комбинированного приемника в качестве бортового приемного устройства, работающего в ближнем поле структурной помехи, было защищено патентом [5]. В этом патенте предлагалось установить комбинированный приемник на борту подводного планера (глайдера), собственные шумы обтекания которого в режиме дрейфа минимальны. В соответствии с содержанием этого изобретения, установленный на глайдере комбинированный приемник должен иметь обтекатель, заполненный в рабочем положении водой. Для заполнения обтекателя водой и ее слива после окончания работы обтекатель должен иметь отверстия, соединяющие внутренний объем обтекателя с внешней средой, которые могут служить причиной возникновения турбулентных потоков в самом обтекателе при перемещении глайдера по глубине. Цель настоящей работы заключается в исследовании влияния собственных шумов обтекания на работу комбинированного приемника при его размещении на борту глайдера, а также влияния конструктивных особенностей обтекателя на уровень собственных шумов обтекания.

■ Методика экспериментальных исследований.

Для проведения экспериментальных исследований в ИПМТ ДВО РАН был разработан подводный планер, на борту которого были размещены в носовом и кормовом отсеках приемные модули, содержащие комбинированные приемники в гибкой подвеске и датчики углового положения, защищенные от внешней среды обтекателями в полном соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [5]. Общий вид глайдера во время подготовки его к работе приведен на рис. 1.

Обтекатель приемного модуля ПМ-1, расположенного в носовом отсеке, имел сравнительно большое отверстие для связи внутреннего объема воды с внешней средой. Обтекатель приемного модуля



Рис. 1. Подготовка глайдера к работе

ПМ-2, расположенного в кормовом отсеке, имел набор отверстий малого диаметра для связи внутреннего объема воды с внешней средой. Предполагалось, что шумы обтекания, вызываемые турбулентным движением воды в обтекателе, будут сравнительно большими для приемного модуля ПМ-1, расположенного в носовом обтекателе и сравнительно малыми для приемного модуля ПМ-2, расположенного в кормовом обтекателе. Для изменения горизонта позиционирования планера включался на короткое время гидравлический насос, который изменял плавучесть планера и его дифферент, в результате чего планер перемещался по вертикали, всплывая или погружаясь на заданную глубину. Полный цикл погружение-всплытие занимал примерно 30 м, после чего все операции повторялись снова. Информация, которая регистрировалась в каналах комбинированного приемника, обрабатывалась в соответствии с разработанным авторским программным обеспечением. Программное обеспечение позволяло вычислять с использованием мультипликативных алгоритмов обработки 16 информативных параметров, которые составляют полное описание скалярно-векторной энергетической структуры звукового поля. Полный перечень информативных параметров и их вклад в помехоустойчивость комбинированного приемника

приведен в работе [6] и включает в себя звуковое давление $p(z,r)$, компоненты комплексного вектора интенсивности $\bar{I}(z,r)$, компоненты вещественного ротора вектора интенсивности $rot\bar{I}(z,r)$ и компоненты комплексного вектора градиента давления $\bar{g}(z,r)$:

$$\begin{aligned} A_1 &= p, A_2 = I_{1x}, A_3 = I_{1y}, \\ A_4 &= I_{1z}, A_5 = I_{2x}, A_6 = I_{2y}, \\ A_7 &= I_{2z}, A_8 = rot_x \bar{I}, A_9 = rot_y \bar{I}, \\ A_{10} &= rot_z \bar{I}, A_{11} = g_{1x}^2, A_{12} = g_{1y}^2, \\ A_{13} &= g_{1z}^2, A_{14} = g_{2x}^2, A_{15} = g_{2y}^2, A_{16} = g_{2z}^2, \\ \bar{I} &= \bar{I}_1 + i\bar{I}_2, \bar{g} = \bar{g}_1 + i\bar{g}_2, p = p_1 + ip_2. \end{aligned}$$

Эксперимент проводился на акватории залива Петра Великого при глубине места 30–32 м. Подводный планер периодически изменял глубину погружения от минимального значения до максимального значения, дрейфуя по течению. В районе работы планера находились четыре движущихся судна, а приемные модули регистрировали как шумы обтекания звукового диапазона, так и дискретные составляющие вально-лопастного звуоряда (ВЛЗР) этих судов. Общий вид сонограмм звукового поля в диапазоне 2–500 Гц на выходе канала звукового давления поясняется рис. 2, а, б. Широкополосные шумы, представленные на сонограммах вертикальными линиями, соответствуют работе гидравлического насоса, который включается и выключается периодически для погружения-всплытия планера. Изолинии равной интенсивности (ИРИ) в виде гипербол, вогнутых подошвой вниз в точках траверза в моменты времени 16 ч 30 м и 17 ч 5 м, соответствуют шумам обтекания судов, проходящих мимо планера. Синий фон на сонограммах соответствует фоновым шумам моря. Все остальные шумы, уровень которых отмечен зелено-красной палитрой, формально можно отнести либо к собственным шумам обтекания самого планера при маневрировании по глубине, либо к шумам обтекания комбинированного приемника, которые возникают при таком маневрировании. Наиболее ярко, как и предполагалось, шумы обтекания выражены на сонограмме для приемного модуля ПМ-1, который находится в носовом обтекателе. При погружении планера на максимальную глубину частотный диапазон собственных шумов обтекания расширяется примерно до 120 Гц, при всплытии планера частотный диапазон шумов обтекания сужается за счет вырождения высокочастотных составляющих.

Три характерные области с треугольной геометрией и с повышенным уровнем собственных шумов обтекания на сонограмме рис. 2, а соответствуют трем

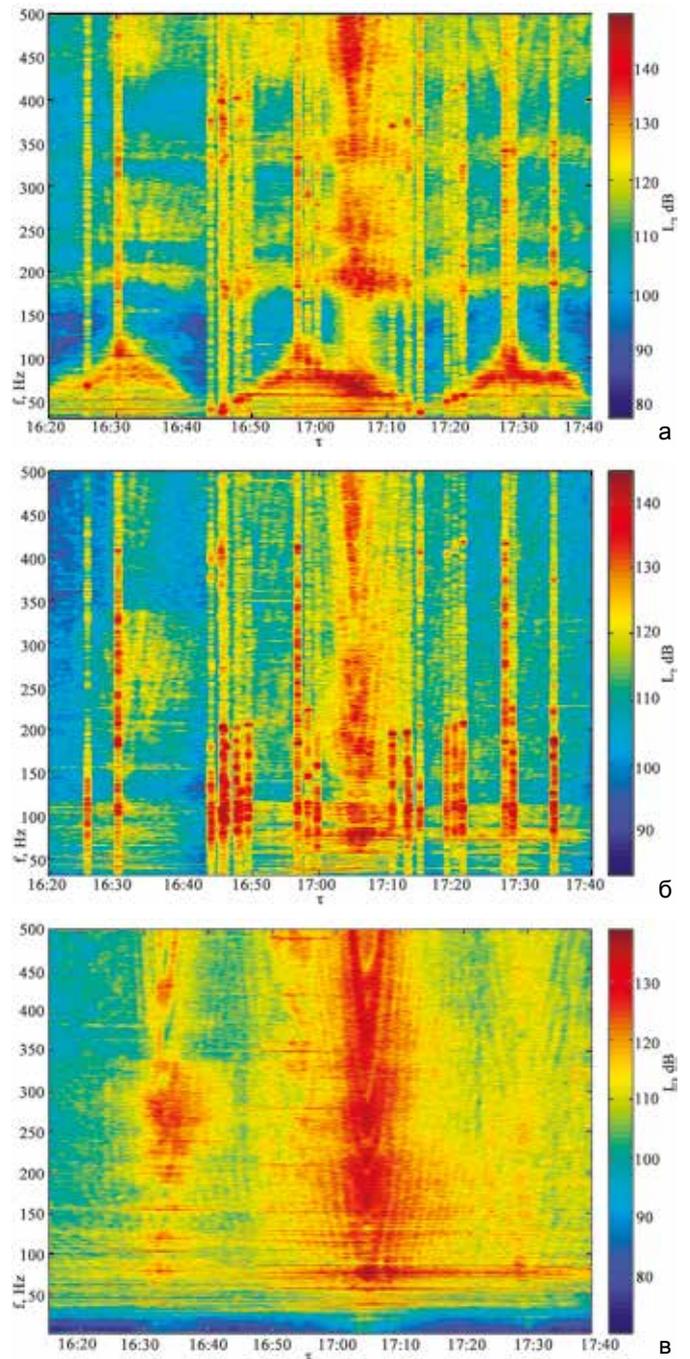


Рис. 2. Сонограммы звукового поля на выходе канала звукового давления: а – приемный модуль ПМ-1; б – приемный модуль ПМ-2; в – приемный модуль ПМ-3

циклом погружение–всплытие планера. Дискретные составляющие на сонограмме соответствуют шумам ближнего судоходства. Сонограмма для приемного модуля ПМ-2 содержит все те же составляющие суммарного звукового поля, но собственные шумы обтекания для этого модуля на 15–20 дБ меньше, чем для приемного модуля ПМ-1, что свидетельствует о критичности выбора конструкции обтекателя для приемных модулей. Оптимальная конструкция обтекателя

должна обеспечить минимальную связь внутреннего объема воды в обтекатель с внешним объемом и минимальную вероятность возникновения турбулентных потоков внутри обтекателя при маневрировании планера по глубине.

На рис. 2, в приведена сонограмма звукового поля в том же диапазоне частот 2–500 Гц в том же интервале наблюдения на выходе канала звукового давления приемного модуля ПМ-3, стационарно установленного рядом с дрейфующим глайдером на глубине позиционирования 20 м. На этой сонограмме хорошо видны четыре системы ИРИ и траверзные моменты времени 16 ч 30 м, 16 ч 5 м, 17 ч 5 м, 17 ч 30 м, соответствующие четырем движущимся судам, которые находились на акватории во время проведения эксперимента. Можно отметить хорошее качественное соответствие сонограмм для приемных модулей ПМ-2 и ПМ-3. Однако наименьший уровень собственных шумов обтекания соответствует приемному модулю ПМ-3, что также свидетельствует о критичности выбора конструкции обтекателя для приемного модуля ПМ-2, который установлен на планере, выполняющем маневрирование по глубине.

Анализ уровня шумов обтекания по различным информативным параметрам

Для анализа вклада собственных шумов обтекания в различные информативные параметры, характеризующие энергетическую структуру звукового поля, рассмотрим более подробно сонограммы звукового поля для приемного модуля ПМ-1 в интервале времени 16 ч 15 м – 16 ч 45 м. Этот интервал соответствует первому сеансу погружение–всплытие планера, а наиболее информативным для анализа шумов обтекания является диапазон частот 50–100 Гц. Рис. 3, а, б поясняют сонограммы звукового поля для первых двух информативных параметров, звукового давления p^2 и компоненты I_{1x} вещественной составляющей вектора интенсивности. Можно отметить, что уровень шумовой помехи по параметру $A_2 = I_{1x}$ в среднем на 7–10 дБ меньше, чем по параметру $A_2 = p^2$. Эти оценки подтверждают ранее сделанный вывод о реактивном характере ближнего поля структурной помехи. Можно отметить также явную асимметрию уровня шумов в горизонтальных (x, y) каналах комбинированного приемника.

Рис. 4, а, б поясняют сонограммы звукового поля для следующих двух информативных параметров, $A_3 = I_{1y}$ и $A_4 = I_{1z}$ вещественной составляющей вектора интенсивности. Можно отметить, что уровень горизонтальной компоненты вектора интенсивности

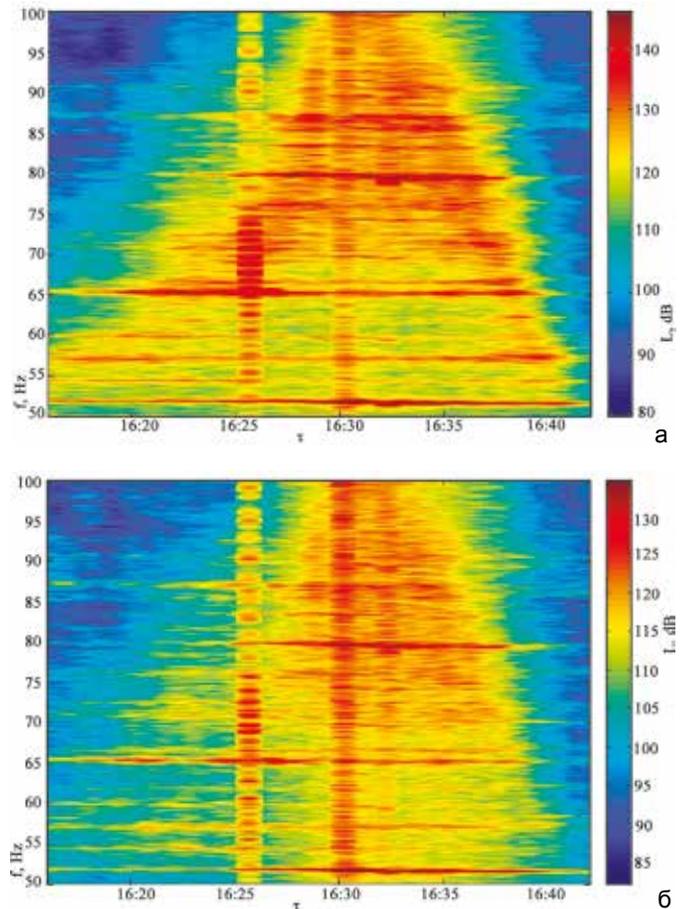


Рис. 3. Сонограммы звукового поля шумов обтекания для приемного модуля ПМ-1: а – параметр A_1 ; б – параметр A_2

сти I_{1y} примерно такой же, как и для горизонтальной компоненты I_{1x} , а средний уровень вертикальной компоненты I_{1z} на 2–3 дБ выше среднего уровня горизонтальных компонент вектора интенсивности. Сонограммы для следующих информативных параметров A_5 , A_6 поясняются рис. 5, а, б. Эти сонограммы характеризуют уровень шумов обтекания в горизонтальных компонентах реактивной составляющей вектора интенсивности, которые примерно соответствует в среднем уровню шумов по параметрам A_2 , A_3 .

Отмеченная ранее асимметрия уровня шумов в горизонтальных (x, y) каналах комбинированного приемника сохраняется и для реактивной составляющей вектора интенсивности, что можно объяснить направленными свойствами комбинированного приемника и анизотропией углового спектра шумовой помехи.

Большой интерес представляет вклад шумовой помехи в вихревую составляющую вектора интенсивности, которая впервые была обнаружена экспериментально в работе [7]. При наличии вихревой составляющей в поле вектора интенсивности ротор вектора интенсивности

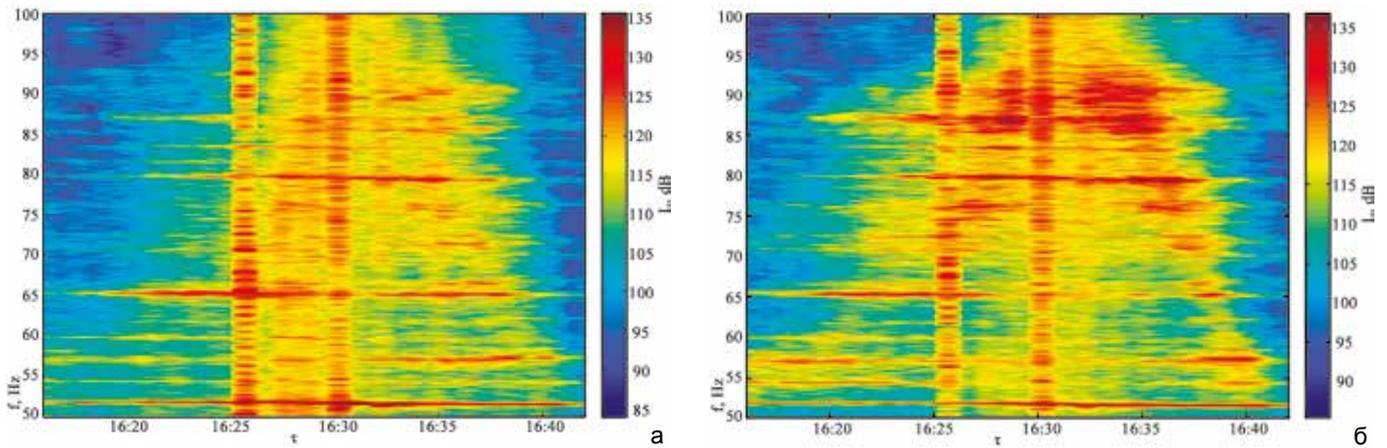


Рис. 4. Сонограммы звукового поля шумов обтекания для приемного модуля ПМ-1: а – параметр A_3 ; б – параметр A_4

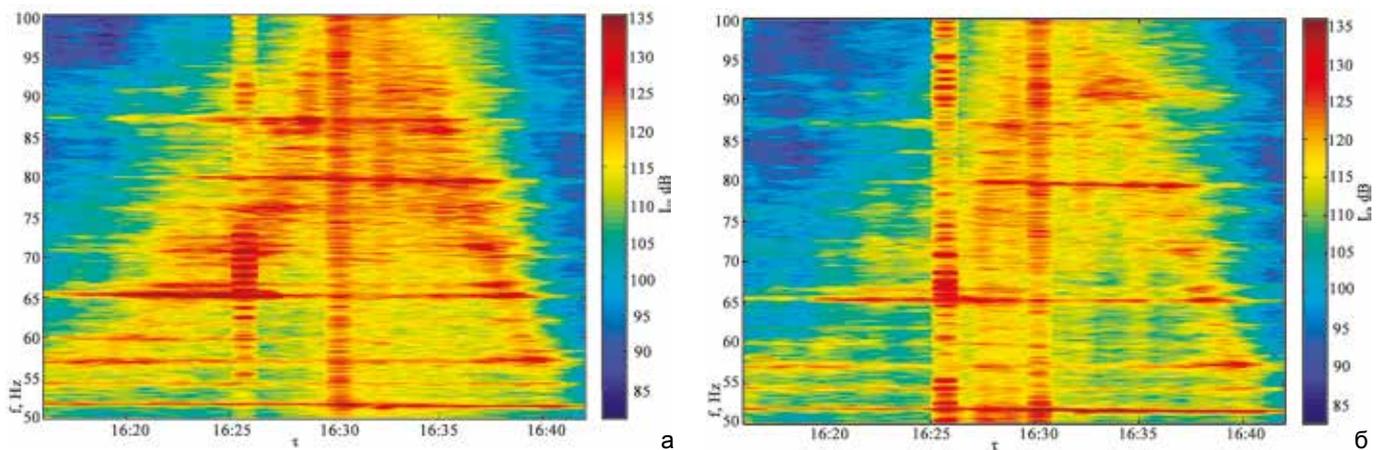


Рис. 5. Сонограммы звукового поля шумов обтекания для приемного модуля ПМ-1: а – параметр A_5 ; б – параметр A_6

сти отличен от нуля, а в полный набор информативных параметров, характеризующих энергетическую структуру звукового поля, включены параметры $A_8 - A_{10}$.

В случае, если звуковое поле формируется в регулярном волноводе с плоскопараллельными границами, вихревая составляющая вектора интенсивности локализована в вертикальной плоскости, а ротор вектора интенсивности имеет только горизонтальную компоненту. В случае нерегулярного 3D-волновода все три компоненты вихревой составляющей вектора интенсивности и ротора вектора интенсивности отличны от нуля, но вертикальная компонента ротора вектора интенсивности остается минимальной из трех компонент. Рис.6, а, б поясняют сонограммы звукового поля шумов обтекания для следующих двух информативных параметров, $A_8 = rot_x \bar{I}$, $A_{10} = rot_z \bar{I}$, причем уровень шумовой помехи по параметрам A_8 , A_{10} продолжает снижаться еще на 5–7 дБ в сравнении с уровнем горизонтальных компонент вектора интенсивности.

Можно предположить, что вклад шумов обтекания в оставшиеся информативные параметры, которые связаны с компонентами вектора градиента давления и пропорционального ему вектора колебательного ускорения, окажется минимальным, т.к. эти информативные параметры не связаны со звуковым давлением, для которого вклад шумов обтекания оказался максимальным.

Это предположение подтверждается сонограммами, приведенными на рис. 7, а, б, для вклада шумов обтекания в параметры $A_{11} = g_{1x}^2$, $A_{12} = g_{1y}^2$ и сонограммами, приведенными на рис. 8 а, б для вклада шумов обтекания в параметры $A_{14} = g_{2x}^2$, $A_{15} = g_{2y}^2$, которые оказались минимальными в сравнении с рассмотренными ранее для других информативных параметров. Отмеченная ранее асимметрия уровня шумов в горизонтальных (x, y) каналах комбинированного приемника сохраняется и для составляющих комплексного вектора градиента давления, что можно также объяснить направленными свойствами комбинированного приемника и анизотропией углового спектра шумовой помехи.

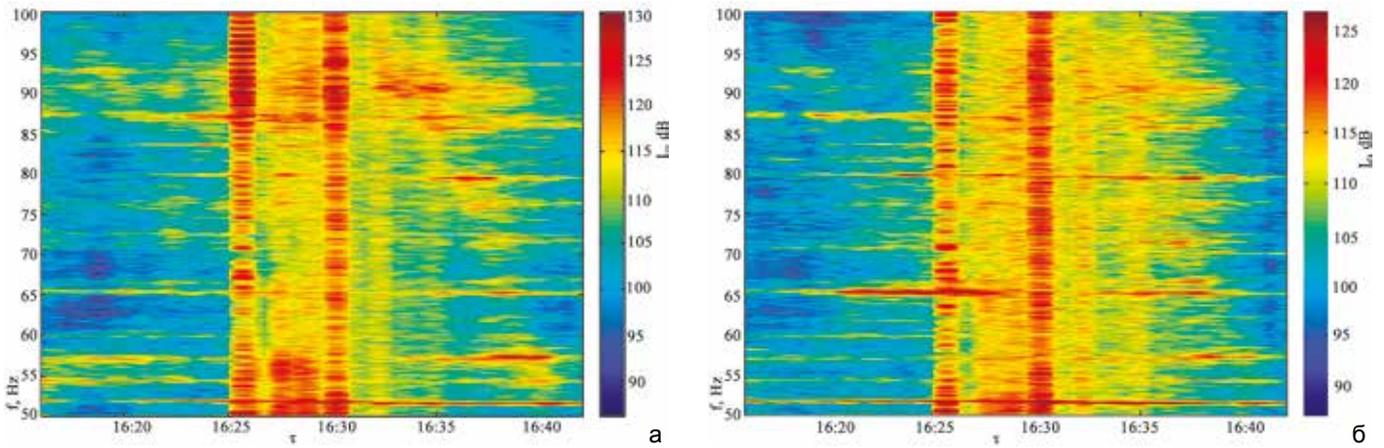


Рис. 6. Сонограммы звукового поля шумов обтекания для приемного модуля ПМ-1: а – параметр A_8 ; б – параметр A_{10}

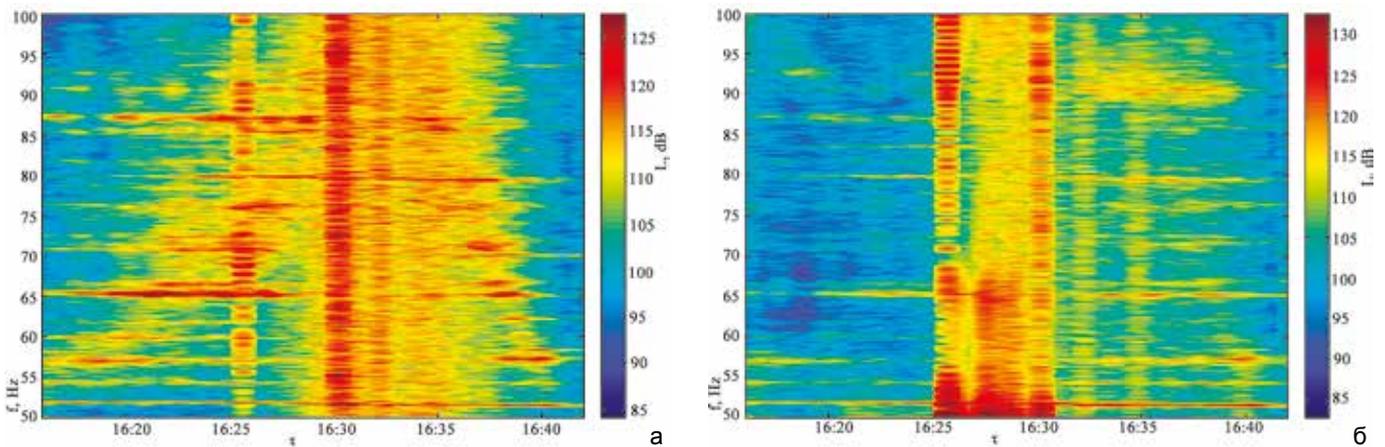


Рис. 7. Сонограммы звукового поля шумов обтекания для приемного модуля ПМ-1: а – параметр A_{11} ; б – параметр A_{12}

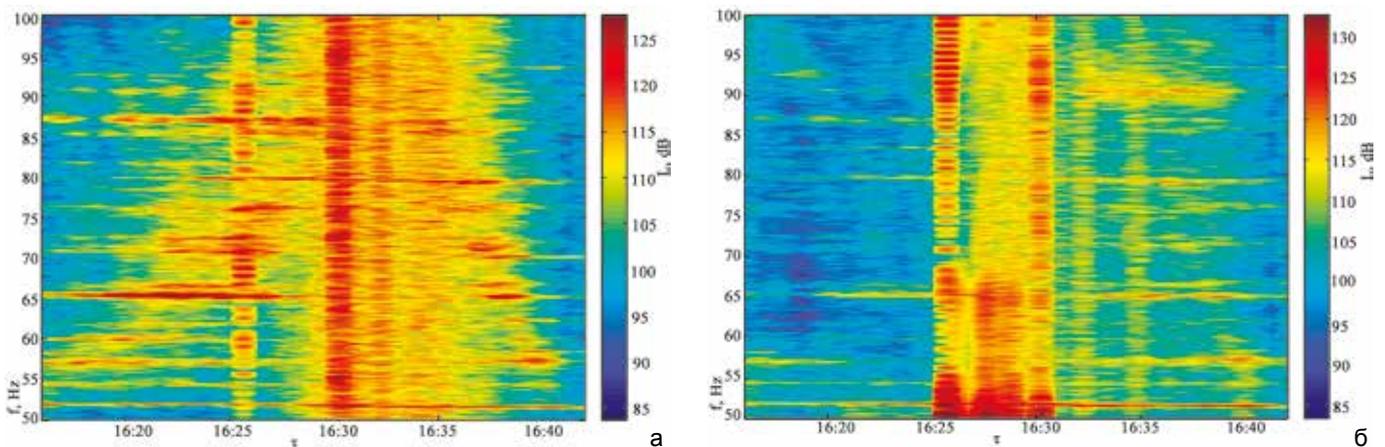


Рис. 8. Сонограммы звукового поля шумов обтекания для приемного модуля ПМ-1: а – параметр A_{14} ; б – параметр A_{15}

Подводя итог сравнительному анализу уровней помех обтекания в каналах комбинированного приемника, полученных на основе экспериментальных данных, можно утверждать, что они хорошо подтверждают сделанные ранее в работе [1] выводы, полученные на основе теоретического анализа и

численных экспериментов. Эти выводы однозначно свидетельствуют о перспективности использования комбинированного приемника в составе бортовых приемных систем, предназначенных для работы в шумовом поле структурной помехи, которое по определению является реактивным полем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует отметить, что близкие по существу выводы были сделаны и относительно структуры фоновых шумов моря в монографиях [8–9]. В этих работах на основе анализа спектральной плотности мощности помехи на выходе канала звукового давления S_{p_2} , спектральной плотности мощности помехи при взаимно-корреляционной (pv) обработке S_{pv} и спектральной плотности мощности помехи на выходе векторного канала S_{v_2} были получены неравенства $S_{p_2} > S_{pv} > S_{v_2}$. Эти неравенства хорошо выполняются в широком диапазоне рабочих частот и условий наблюдения фоновых шумов моря. С другой стороны, эти неравенства хорошо подтверждают и тот факт, что фоновые шумы моря формируют реактивное, в основном, звуковое поле со структурой типа стоячих волн, в котором полностью (в случае изотропного поля) или частично (при наличии анизотропии) скомпенсированы направленные потоки мощности, а наиболее защищенными от шумовой помехи оказываются векторные каналы комбинированного приемника.

Выполненное исследование подтверждает также целесообразность использования полного набора информативных параметров, характеризующих энергетическую структуру ближнего поля структурной помехи, для успешного решения проблемы обнаружения слабых сигналов на фоне собственных шумов носителя. Соответствующее программное обеспечение, защищенное патентами [10–11], увеличивает потенциальные возможности подводного планера как носителя приемной системы на основе комбинированных приемников, наиболее успешно решающей проблему обнаружения слабых сигналов на фоне собственных шумов носителя.

Выполнено экспериментальное исследование в морских условиях шумового поля структурной помехи на выходе каналов комбинированного приемника, размещенного на борту подводного планера (глайдера). Эта помеха формируется шумами обтекания самого планера при его маневрировании по глубине, шумами обтекания комбинированного приемника в обтекателе, а также вибрационной составляющей помехи, связанной с работой бортовых электромеханических устройств. Получены количественные оценки структурной помехи, подтверждающие повышенную помехозащищенность (на 15–20 дБ) векторных каналов в сравнении с каналом звукового давления и повышенную помехозащищенность (на 7–10 дБ) (pv)-канала с взаимно-корреляционным алгоритмом обработки в сравнении с каналом звукового давления в рассмотренном конкретном случае работы комбинированного приемника на борту глайдера. Оценки получены для полного набора информативных параметров, описывающих энергетическую структуру звукового поля. Полученные результаты подтверждают предпочтительность использования комбинированного приемника в составе бортовых приемных систем, решающих проблему обнаружения слабых сигналов на фоне собственных шумов носителя. Кроме того, полученные результаты подтверждают предпочтительность использования полного набора из 16 информативных параметров, описывающих энергетическую структуру шумового поля, среди которых всегда найдется параметр, обладающий наибольшей помехозащищенностью в ближнем поле структурной помехи, угловой спектр которой обладает явно выраженной анизотропией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клячкин В.И. Вероятностные задачи статистической гидроакустики. Ч. 1. Санкт-Петербург: Наука, 2007. 629 с.
2. Селезнев И.А., Глебова Г.М., Жбанков Г.А., Мальцев А.М., Харахашьян А.М. Вероятностные характеристики обнаружения сигналов одиночным векторно-скалярным модулем // Подводные исследования и робототехника. 2016. № 2 (22). С. 44–49.
3. Селезнев И.А., Глебова Г.М., Жбанков Г.А., Харахашьян А.М. Экспериментальное исследование характеристик векторно-скалярного поля структурной помехи // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 1 (27). С. 55–61.
4. Ермоленко А.С., Подгайский Ю.П. Результаты натурных исследований потока энергии акустических полей // Гидроакустика. 2019. Вып.39 (3). С. 21–27.
5. Пат. 106880 РФ, МПК H04R 1/44. Подводный планер для мониторинга векторных акустических полей / Щуров В.А., Иванов Е.Н., Щеглов С.Г., Черкасов А.В. – № 2013112526/28; заявл.: 21.03.2013. опублик.: 20.11.2014. Бюл. № 21.
6. 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.
7. Щуров В.А., Ляшков А.С., Щеглов С.Г., Ткаченко Е.С., Иванова Г.Ф., Черкасов А.В. Локальная структура интерференционного поля мелкого моря // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 1 (17). С. 58–67.
8. Щуров В.А. Векторная акустика океана. Владивосток: Дальнаука, 2003. 308 с.
9. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
10. Пат. 2664973 РФ, МПК B63G8. Подводный планер для локализации источника звука / Касаткин Б.А., Касаткин С.Б. – № 2017119841; заявл.: 07.06.2017; опублик.: 24.08.2018. Бюл. № 24.
11. Пат. 2687886 РФ, МПК G01S 3/80. Гидроакустический комплекс для обнаружения движущегося подводного источника звука, измерения азимутального угла на источник звука и горизонта источника звука в мелком море / Касаткин Б.А., Касаткин С.Б. – № 2011148402; заявл.: 28.11.2011; опублик.: 16.05.2019. Бюлл. №14.