#### УДК 534.6: 534.143

# ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ВЕКТОРНО-ФАЗОВЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЫ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Ю.В. Матвиенко<sup>1</sup>, Ю.Н. Моргунов<sup>2</sup>, Д.С. Стробыкин<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН<sup>2</sup>

Обсуждаются результаты экспериментальных исследований акустических полей на нескольких акваториях залива Посьета Японского моря, полученные при использовании комбинированной (векторной) приемной системы и буксируемого низкочастотного электромагнитного излучателя. Целью экспериментов являлось изучение пространственной структуры векторно-фазовых звуковых полей в условиях мелкого моря. Методически эксперименты обеспечивались буксировкой на разных глубинах источника тонального сигнала с частотой 134 Гц на удаления до 10 км от приемной системы. Особое внимание уделялось исследованию интерференционной структуры акустических полей при различных вариантах размещения излучающей и приемной систем в волноводах с глубинами от 30 до 90 м. Наиболее подробно обсуждается один из экспериментов, в котором, предположительно, удалось зафиксировать наличие вихревых структур в акустическом поле источника. Анализируется возможность практического применения результатов исследований.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В отделе технических средств исследования океана ТОИ ДВО РАН были разработаны системы для проведения комплексных исследований в различных по глубине районах шельфовой зоны, в различные сезоны года в широком диапазоне условий приема сигналов. Акцент на проведение экспериментов в разных по глубине районах и при различных глубинах приема сигналов базировался на фундаментальных результатах теории распространения низкочастотных тональных сигналов в мелком море и особенностях приема (обнаружения) этих сигналов в маломодовых волноводах с развитой интерференционной структурой. Наличие глубоких минимумов акустической энергии, которые возникают при изменении расстояния между источниками и приемниками, может приводить к периодическим потерям контактов с источником, а в некоторых случаях взаимного маневрирования – и к полной потере контакта. Естественно было предположить, что при приеме сигналов векторными приемниками формирование интерференционной структуры будет иметь более сложный характер и зависеть от глубины моря и глубины приема [1]. Как известно из теоретических работ, при распространении в маломодовом канале могут образовываться особые точки, в которых энергия не распространяется в горизонтальном направлении, а возникают вихревые образования с перемещениями энергии от дна к поверхности и наоборот [2-4]. На поиск таких эффектов и исследование возможности их применения для повышения помехоустойчивости приемных систем и были направлены экспериментальные исследования. Для этого осуществлялась буксировка излучателя с частотой 134 Гц в различных волноводах

с глубинами от 30 до 90 м на удаления до 10 км.

### • Средства и методы

Стационарная автономная приемная система с использованием комбинированного приемника (КП) представляет собой устройство, предназначенное для проведения исследований структуры звуковых полей в условиях мелкого моря посредством регистрации звукового давления и трех ортогональных компонент градиента звукового давления, а также для измерения данных о положении системы в пространстве. Формирование, накопление пакетов информации от комбинированного приемника и датчиков ориентации и глубины осуществлялось

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел.: 8(423) 2215545. E-mail: ymat@marine. febras.ru

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43. Тел.: 8(423) 2311400. E-mail: morgunov@poi. dvo.ru

в автономном цифровом блоке регистрации с записью на SD карту. Внешний вид КП в защитном ограждении-клети с гермоконтейнерами приемного тракта изображен на рис. 1.

В состав приемной системы входят:

• КП, объединяющий в общей конструкции с единым фазовым центром трехкомпонентный векторный приемник (ВП) и приемники звукового давления (ПД), расположенные симметрично вокруг воспринимающего элемента ВП;

• система подвеса ВП и ПД в защитной клети, включающая эластичные лонжи и элементы крепления;

жесткая клеть для установки
в нее ВП и ПД в целях надежной ориентации в пространстве и механической защиты;

 обтекатель на клеть для снижения воздействия гидродинамической помехи;

• гермоконтейнеры с электроникой и блоками электропитания;

 устройства постановки клети с КП на якоре с элементами защиты от структурной помехи и возможностью изменения глубины постановки. Устройства для постановки приемной системы представлены на рис. 2 и включают в себя груз массой 40 кг, фал, притопленные на глубину 5–10 м от поверхности плавучести (обеспечивают защиту фала и клети с КП от вибрации под воздействием поверхностного волнения), выборочный конец, проблесковый маяк.

Электронная часть приемной системы находится в гермоконтейнерах и состоит из четырехканального тракта усиления сигналов КП с НЧ и ВЧ фильтрами, АЦП, микроконтроллера, модуля определения заглубления, крена, дифферента, азимута, накопителя данных (SD карта) и двух блоков электропитания (БП), поддерживающих автономную работу устройства в течение 3 суток. В качестве источника тональных акустических сигналов с частотой 134 Гц использовался электромагнитный буксируемый излучатель (рис. 3).

## Результаты

## Эксперимент № 1

Экспериментальные исследования интерференционной структуры поля тонального источника



Рис. 1. Внешний вид КП системы

звука проводились на гидрофизическом полигоне вблизи мыса Шульца. Комбинированный приемник был стационарно установлен в бухте Витязь на глубине 27 м при глубине моря 37 м. Буксировка источника тональных сигналов (частота 134 Гц) осуществлялась с борта яхты на глубине 20 м со скоростью 3 узла по двум трассам: на удаление от приемной системы и на приближение. На рис. 4 приведена схема маневрирования судна при буксировке излучателя.

Гидрологическая обстановка в районе эксперимента была типичной для весеннего сезона и характеризовалась близким к изотермическому вертикальным профилем температуры (рис. 5). На этом же рисунке приведен рельеф дна на трассе.

Дистанция между излучателем и приемной системой определялась с помощью системы спутниковой навигации. Длина трасс составляла немногим более 9000 м. Определение точного положения излучателя при буксировке выполнялось относительно антенны спутниковой навигации, расположенной на рубке яхты, с учетом глубины погружения и длины буксировочного фала. На рис. 6 приведена зависимость амплитуд сигналов с гидрофона и с датчиков ХҮΖ векторного приемника от расстояния между корреспондирующими точками. Анализ зависимостей показывает, что на обеих трассах на удалениях более 1500 м от приемной системы формируется стабильная, идентичная для гидрофона и датчиков XYZ интерференционная структура с периодом около 390 м. Можно отметить отличия амплитуд сигналов на каналах Х и У на расстояниях около 6500 м на первой трассе и 5000 м на второй, которые связаны с наличием направленности этих каналов и могут быть использованы



Рис. 2. Система постановки



Puc. 3. Буксируемый электромагнитный излучатель



для расчетов пеленга на источник сигнала [5, 6].

Главной особенностью приведенных зависимостей на рис. 6 является практически полное совпадение минимумов и максимумов интерференционной структуры для гидрофона и датчиков ХҮZ с перепадом амплитуд до 15–20 дБ. Следовательно, ни аддитивная, ни мультипликативная обработка сигнальной информации с каналов комбинированного приемника в данном случае не избавляет от потери контакта с источником звука при нахождении его в интерференционных минимумах.

## Эксперимент № 2

Эксперимент проводился в заливе Посьета. На рис. 7, б приведена карта района исследований и нанесена трасса буксировки излучателя. Буксировка излучателя осуществлялась на глубине 20 м, излучался тональный сигнал с частотой 134 Гц. Комбинированный приемник был установлен в двух метрах от дна, в точке с глубиной моря 58,5 м. Буксировка вначале осуществлялась от приемной системы на удаление около 10 км в сторону глубокого моря до изобаты 100 м, затем в сторону берега до изобаты 35 м и удаления от приемной системы 10 км и, наконец, возвращение к приемной системе (рис. 7, *a*, *б*). На рис. 7, а приведены данные гидрологических и батиметрических измерений. В июле уже наблюдался значительный отрицательный градиент температуры с глубиной. На этом же рисунке пронумерованы галсы, на которые была разбита трасса для удобства обработки и анализа сигнальной информации.

На рис. 8 (*a*-*г*) приведены зависимости уровней сигналов на канале давления и каналах XYZ от расстояния для каждого из четырех галсов. На рисунке отмеча-



дистанция, км





Рис. 6. Эксперимент № 1. Проходная характеристика (X, Y, Z, P канала КП)



Рис. 7. Гидрология и рельеф дна (а) и карта эксперимента № 2 (б)

ются 2-минутные паузы излучения каждые полчаса, которые были организованы для оценки помехоустойчивости системы приема. Превышение сигналов над шумом составило 40-45 дБ на всей трассе, кроме завершающей фазы первой трассы, где на 10 дБ возросла помеха. Расчет средних значений периодов интерференционной структуры выполнялся усреднением измеренных по минимальным и максимальным значениям периодов и показал значения около 375 м для галсов № 3 и 4 и 750 м для галсов № 1 и 2.

Таким образом, можно констатировать, что пространственная структура поля тонального источника звука характеризуется стабильной интерференцией, связанной с взаимодействием мод первых номеров. Периоды интерференции в мелководной части трассы (галсы № 3 и 4) сравнимы по величине с данными, полученными в первом эксперименте, и легко прогнозируются численными расчетами с привлечением программ, основанных на модовых принципах. В данной работе эти результаты приведены

131°13′55

для того, чтобы подчеркнуть техническую и методическую достоверность уникального результата, полученного на первом и втором галсах трассы (рис. 8, *a*, *б*). Анализ зависимостей, приведенных на этом рисунке, показывает, что для условий эксперимента на участках





с глубокими минимумами амплитуд сигналов в каналах давления и ХҮ фиксируется максимум амплитуды в канале Z, т.е. на этих участках движение акустической энергии происходит в основном в вертикальной плоскости. Это может свидетельствовать о вихревом характере формирования поля на этих участках. Характерно, что эта особенность наблюдается при движении источника как в сторону глубокого моря, так и обратно. Следует подчеркнуть также, что обработка сигнальной информации во всех обсуждаемых экспериментах проводилась по единой методике на идентичных приборах. Трудно переоценить практическое значение зафиксированного эффекта для организации обнаружения и сопровождения источника тонального сигнала (дискретной составляющей в шумовом поле), т.к. в этом случае потеря акустического контакта с источником не возникнет при любых вариантах взаимного маневрирования. Открывается возможность непрерывной (без пропусков) обработки сигнальной информации с каналов комбинированного приемника с реализацией эффективного накопления. Следует лишь корректно подобрать схему обработки информации: аддитивной, мультипликативной или с каждого канала отдельно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате натурного эксперимента, в контролируемых условиях получены надежные данные, характеризующие особенности формирования интерференционной структуры поля тонального источника в мелководных акваториях залива Посьета Японского моря. Отмечается существенная зависимость периодов интерференции от глубины моря, а не от взаимного положения источника и приемника в волноводах. Контролируемые гидрологические условия, повторяемость акустических трасс позволяют рассчитывать на успешное применение полученных результатов для совершенствования вычислительных методов и программ описания векторно-скалярных полей в мелком море. Факт обнаружения вихревых структур в поле тонального источника требует дополнительных исследований, направленных на прогнозирование и выявление подобных особых точек в толще мелководных волноводов и их зависимости от частоты сигналов, глубины моря и т.п.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов ДВО РАН 15-II-1-045, 15-I-1-012 о., ПФИ гос. акад. наук на 2013–2020 гг. (п/п 12, тема 1).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гордиенко В.А., Ильичев В.И., Захаров Л.Н. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Наука, 1989. 223 с.

2. 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.

 Щуров В.А. Векторная акустика океана. Владивосток: Дальнаука, 2003.
307 с.

4. Буренин А.В., Моргунов Ю.Н., Стробыкин Д.С. Экспериментальное исследование возможности применения векторных приёмников в задачах томографии океана // Акуст. журн. 2007. Т. 53, № 6. С. 786–790.

5. Hawkes M., Nehorai A. Wideband source localization using a distributed acoustic vector-sensor array // IEEE Trans. Signal Processing. 2002. Vol. 27, No. 3. P. 628–637.

6. Santos P., Felisberto P., Hursky P. Source localization with vector sensor array during the makai experiment // Proc. of 3rd Inter. Conf. and Exhib. on Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results. Heraklion, Greece, 2007.