

УДК 681.884:534.873
EDN: ZYRWXZ

DOI: 10.37102/1992-4429_2025_54_04_08

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

С.И. Каменев

В статье рассматриваются методы и средства измерения кинематических характеристик акустического волновода – таких, как фазовая и групповая скорости, а также инвариант пространственно-частотной структуры акустического поля, предложенный в работах С.Д. Чупрова. В настоящее время активизировались работы по использованию и уточнению последнего применительно к таким задачам гидроакустики, как обнаружение слабых сигналов, оценка расстояния до источника и др. Обсуждаются результаты модельных и натурных экспериментов по оценке кинематических характеристик волновода с помощью таких средств, как акустические интерферометры, вертикальные антенны и векторные приёмники. Технические средства разработаны в отделе технических средств исследования океана ТОИ ДВО РАН.

Ключевые слова: гидроакустика, сложные сигналы, кинематические характеристики, волновод, фазовая скорость, групповая скорость, векторный приёмник, звуковое давление, колебательная скорость

ВВЕДЕНИЕ

В практике подводных исследований океана, проводимых отделом технических средств исследования океана ТОИ ДВО РАН, широко применяются методы акустического зондирования гидрофизических неоднородностей океана, построенные на принципе излучения сложного сигнала с фазовой манипуляцией и приеме данного сигнала в удаленной точке точечной акустической антенной – приемником давления. При этом для повышения разрешения во времени при обработке выполняется свертка принятого сигнала с излученным, что позволяет определять времена приходов зондирующего сигнала и по ним реконструировать картину распространения акустических волн, по которой, в свою очередь, можно оценить влияние гидрофизических параметров и неоднородностей среды. Данный метод оценки времени прихода сигнала как важной кинематической характеристики (и связанной с ним групповой скорости) находит применение при решении ряда прикладных технических задач, к которым относится, например, проблема передачи команд управления на подводные объекты по гидроакустическому каналу связи [1].

Список кинематических характеристик может быть расширен с использованием представления об

инварианте пространственно-частотной интерференционной структуры звукового поля, определяемого в координатах «частота–расстояние» (ω, R) в окрестности точки (ω_0, R_0) как $\beta = (\Delta\omega / \omega_0) / (\Delta R / R_0)$ или как зависимость групповой скорости от фазовой $C_e(C_\phi)$ [2]: $\beta = -\partial(1/C_\phi) / (1/C_e)$. В [3, 4] дано определение инвариантной скорости:

$$C_\beta = (1 + \beta) / (1/C_\phi + \beta/C_e),$$

обладающей существенно меньшей изменчивостью по сравнению с фазовой и групповой скоростями, $\Delta C_\beta / C_\beta \cong (\Delta C_\phi / C_\phi)^2 \cong (\Delta C_e / C_e)^2$. Для плоского волновода с однородным заполнением типичное значение инварианта $\beta \approx 1$, для волновода с выраженным канальным профилем инвариант $\beta \approx -3$. В [4] понятие инварианта обобщается на случай трехмерного клина с однородным заполнением и показано, что инвариант зависит только от глубин места источника h_0 и приемника h , $\beta = h_0 / h$. Для однородного волновода с произвольным законом расширения $h(r)$ инвариант пространственно-частотной интерференционной структуры определяется выражением:

$$\beta = rh^2(r) / \int h^2(r) dr,$$

где интегрирование проводится по трассе, соединяющей корреспондирующие точки.

Авторы [5, 6] используют инвариант Чупрова и его обобщение в виде фазо-энергетического инварианта, поскольку для описания распределения звуковой энергии в пространстве используются ортогональные компоненты градиента фазы. Обобщение применено при исследовании векторно-скалярных полей мультипольных источников в мелком море, эквивалентных шумоизлучению морских объектов. В [7] показано, что в волноводе с известной глубиной в случае применения вертикально развитых антенн значения интерференционного инварианта и эффективных скоростей могут быть вычислены с использованием измеренного угла прихода сигнала, отраженного от дна, что позволяет рассчитывать дальность до источника и получать несмещенные оценки пеленга, не зависящие от глубин источника и приемника. Работа [8] посвящена вопросу, насколько инвариант Чупрова применим к глубокому морю, где закономерности спадания звукового поля с расстоянием более сложны. В связи с этим в статье изучены свойства инварианта в ближней и дальней зонах акустической освещенности, а также в зоне тени. Показаны устойчивость обобщения в виде фазо-энергетического инварианта, его независимость от различных влияющих факторов.

Определение инварианта, данное в [2], описывает веерную структуру акустического поля на плоскости «частота–расстояние», это открывает возможность когерентного сложения Фурье-компонент сигнала, и в случае стационарной помехи такая обработка может существенно повысить вероятность обнаружения, что, в свою очередь, обеспечит надежность звукоподводной связи, в частности передачу команд управления на подводные аппараты. Инвариант простран-

ственно-частотной структуры акустического поля, как показано выше, позволил ввести понятие инвариантной скорости [3, 4]. Представляется целесообразным использование свойств инвариантной скорости в дальномерных задачах при разработке алгоритмов определения координат подводных объектов.

В отделе технических средств исследования океана ТОИ ДВО РАН на этапах выполнения ряда НИР были разработаны такие средства измерения параметров акустического поля, как векторные приемники, вертикальные антенны, акустические интерферометры, которые, как показано ниже, могут быть использованы для исследования кинематических характеристик волноводов.

■ Векторный приемник

Техническим средством, реализующим новые подходы в акустической томографии морской среды, является векторный приемник (ВП) (рис. 1).

Для мониторинга динамических процессов на шельфе используются значения максимумов корреляционной функции в вертикальном и горизонтальных каналах ВП соответственно. Данный способ [10] позволяет связать две кинематические характеристики – время и направление прихода акустической энергии – и тем самым получить более полное представление о свойствах морской среды, а также получить дополнительные возможности при проектировании технических систем. Так, с использованием ВП (рис. 1) измерялись звуковое давление P (рис. 2) и компонента колебательной скорости V в направлении на источник, и, при известной плотности среды ρ_1 , определялась фазовая скорость C_ϕ (рис. 3):

$$1/C_\phi = \rho_1 |P|V|\cos(P, V^*) / |P^2|,$$

где $*$ – обозначает комплексное сопряжение.

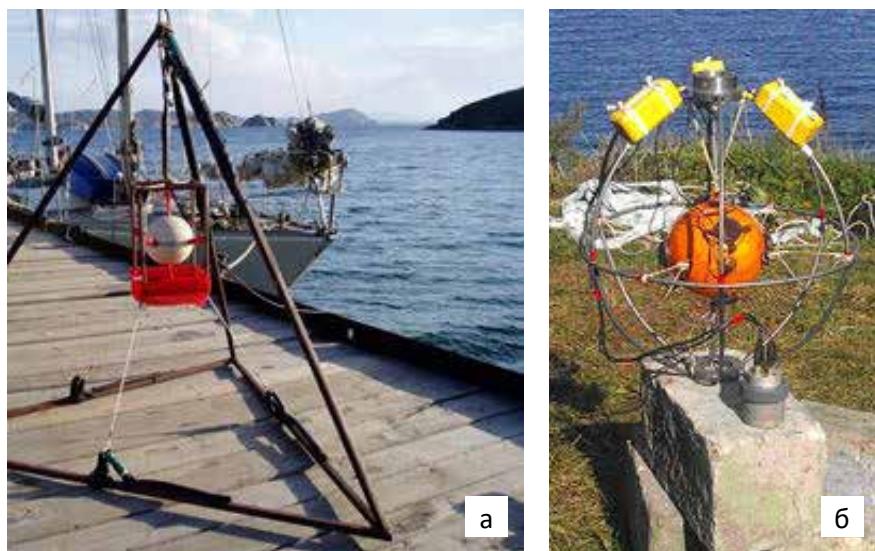


Рис. 1. Векторные приемники, разработанные в отделе технических средств исследования океана ТОИ ДВО РАН: а – трёхкомпонентный, б – четырёхкомпонентный

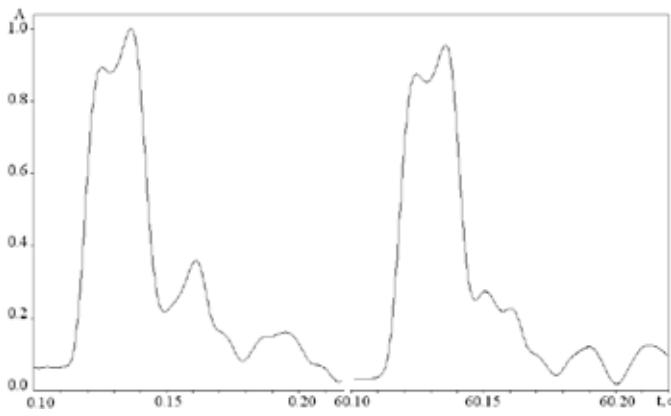
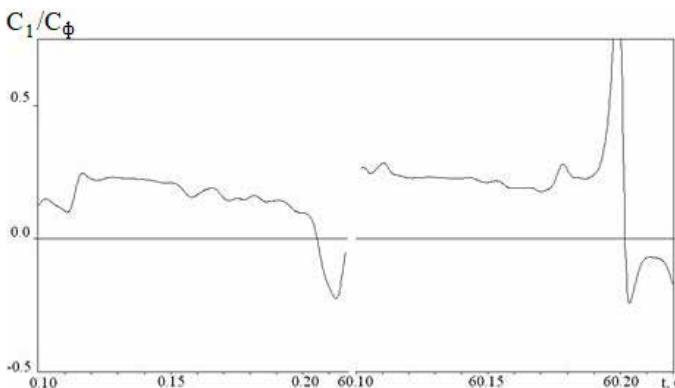
Рис. 2. Звуковое давление P , нормированное на максимум

Рис. 3. Нормированная величина, обратная фазовой скорости

■ Интерферометр

Представляется перспективной разработка технического средства, измеряющего инвариант пространственно-частотной интерференционной структуры звукового поля с использованием базовых соотношений, приведенных в [2].

Обозначив амплитуду результата интерференции двух компонент звукового поля частоты ω_0 с индексами l и m на базовом расстоянии R_0 как, $A_{lm}(R_0, \omega_0)$, можно оценить производные интерференционной амплитуды по расстоянию и частоте как

$$\frac{\partial A_{lm}}{\partial R} \approx i\omega_0 \left(\frac{1}{c_{el}} - \frac{1}{c_{em}} \right) A_{lm};$$

$$\frac{\partial A_{lm}}{\partial \omega} \approx iR_0 \left(\frac{1}{c_{el}} - \frac{1}{c_{em}} \right) A_{lm}.$$

Измеряя A_{lm} на другой дистанции и на другой частоте с малыми приращениями ΔR и $\Delta \omega$, соответственно получим:

$$A_{lm}(R_0 + \Delta R, \omega_0 + \Delta \omega) = \\ = A_{lm}(R_0, \omega_0) + \Delta R \frac{\partial A_{lm}}{\partial R} + \Delta \omega \frac{\partial A_{lm}}{\partial \omega}$$

и, далее,

$$A_{lm}(R_0 + \Delta R, \omega_0 + \Delta \omega) = \\ = A_{lm}(R_0, \omega_0) \left[1 + i\omega_0 \left(\frac{1}{c_{el}} - \frac{1}{c_{em}} \right) \Delta R + \right. \\ \left. + iR_0 \left(\frac{1}{c_{el}} - \frac{1}{c_{em}} \right) \Delta \omega \right].$$

Если следовать вдоль максимумов интерференционной картины поля на плоскости «частота–расстояние», то справедливо соотношение:

$$\sum_{l,m} A_{lm}(R_0, \omega_0) \left[\omega_0 \left(\frac{1}{c_{el}} - \frac{1}{c_{em}} \right) \Delta R + \right. \\ \left. + R_0 \left(\frac{1}{c_{el}} - \frac{1}{c_{em}} \right) \Delta \omega \right] = 0,$$

из которого следует:

$$\frac{\Delta \omega}{\Delta R} = -\frac{\omega_0}{R_0} \left(\frac{1}{c_{el}} - \frac{1}{c_{em}} \right) / \left(\frac{1}{c_{el}} - \frac{1}{c_{em}} \right)$$

и, в соответствии с определением инварианта,

$$\beta = -\frac{\sum_{l,m} A_{lm}(R_0, \omega_0) \left(\frac{1}{c_{el}} - \frac{1}{c_{em}} \right)}{\sum_{l,m} A_{lm}(R_0, \omega_0) \left(\frac{1}{c_{el}} - \frac{1}{c_{em}} \right)}.$$

Указанные выше соотношения реализуются с помощью акустических интерферометров, внешний вид одного из них, разработанного отделом технических средств исследования океана ТОИ ДВО РАН, приведен на рис. 4. Данный алгоритм связан с направлением линий максимумов интерференционной картины звукового поля на плоскости «частота–расстояние». Поэтому измерительное устройство, реализующее приращение ΔR , может быть достаточно длинной двухэлементной базой, ориентированной в



Рис. 4. Акустический интерферометр с двумя крайними приемными элементами и центральным приемоизлучающим

направлении на источник излучения. Как показывают многочисленные расчеты [3–9], линии максимумов сохраняют постоянство угла наклона (значение инварианта) на значительном расстоянии. Для несущих частот сигналов до 6 кГц длина базы, работающей при глубинах места порядка 30–100 м, может составлять 23 м. Приращения $\Delta\omega$ при этом обеспечиваются представлением принятого сложного сигнала в частотной области.

■ Вертикальная антenna

Можно показать, что кинематические характеристики могут быть также определены через градиенты фазы принятого сигнала по частоте – групповая скорость и по пространственным координатам – проекции фазовой скорости. Вертикальная антenna, построенная в два слоя, обеспечивает измерение как множество независимых градиентов (по числу элементов), так и пространственную направленность в вертикальной и горизонтальной плоскостях (в лучевом приближении). Представляет также возможность выделения, при определенных условиях, мод сигнала в виде амплитудных и фазовых компонент. Пример такой антенны, состоящей из ряда двухрядных вертикальных антенн, показан на рис. 5. Число гидрофонов в каждой из плоскостей – 1200, размеры: высота – 16,8 м, ширина – 4,1 м, длина – 102,5 м.

Особенности распространения сложного сигнала на шельфе характеризуются видом импульсных характеристик, полученных, как указано выше, в результате корреляционной обработки. Для волновода с однородным заполнением при различных глубинах z размещения приемника данные численного эксперимента, основанного на обобщении модовых соот-

ношений, приведенных в [3], на работу источника импульсных акустических сигналов в расширяющемся волноводе, демонстрируют хорошее соответствие с методом мнимых источников. При изменении глубины приемника происходит перераспределение источников, составляющих дипольные пары. При типичном для натурных экспериментов размещении источника и приемника вблизи дна на расстояниях $\delta_0 \ll h_0$ и $\delta \ll h$ соответственно дипольные пары трансформируются в четверки (квадроуполи). Если для определенности положить $\delta_0 > \delta$ и $h_0 = h$, то последовательность приходов импульсов относительно базового расстояния $R_0 = \sqrt{(r^2 + 4n^2h^2)}$ определится соотношениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{2hn(\delta_0 + \delta)}{R_0}; -\frac{2hn(\delta_0 - \delta)}{R_0}; \\ +\frac{2hn(\delta_0 - \delta)}{R_0}; +\frac{2hn(\delta_0 + \delta)}{R_0} \end{array} \right\}$$

где n – число отражений от верхней границы, r – горизонтальное расстояние между корреспондирующими точками. При этом абсолютное значение угла скольжения возрастает, а знаки чередуются.

Особенности работы вертикальной антенны на шельфе с использованием сложных сигналов поясняются рис. 6, где приведены импульсные характеристики волновода с однородным заполнением при различных глубинах размещения приемника как функции безразмерного времени $t f_0$ для трассы с линейным расширением (инвариант $\beta = 2/3$). Нормированные параметры: $f_0 h_0 / C_1 = 8$, где f_0 – центральная частота сигнала; отношение плотностей и скоростей звука водного слоя и полупространства $\rho_{12} = 0,83$ и $C_{12} = 0,67$ соответственно; глубина источника $z_0 / h_0 = 1$; горизонтальное расстояние

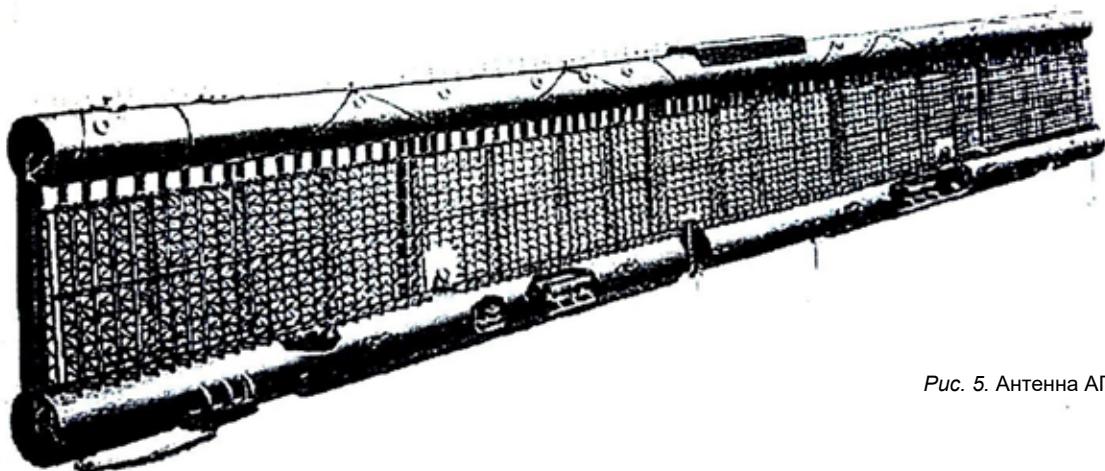


Рис. 5. Антenna АГАМ [11, 12]

$r / h_0 = 50$. Звуковое давление P в точке приема как результат взаимной корреляционной обработки принятого и излученного сигналов представлено в виде значений амплитуды P_m и фазы φ_m на частоте ω_m для момента времени t и затем определена нормированная амплитуда A (функция амплитудной когерентности):

$$P^2 = \sum_{m,n} P_m P_n \cos[(\omega_m - \omega_n)t - (\phi_m - \phi_n)], \quad A = P / \sum_m P_m$$

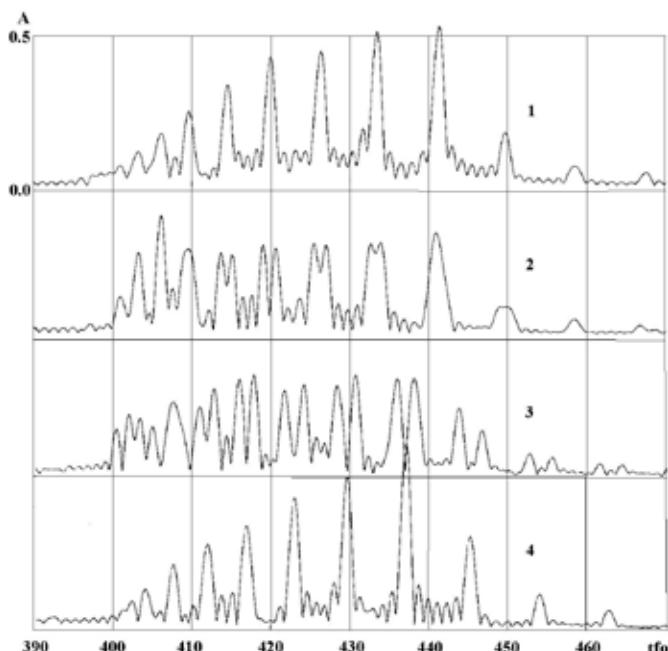


Рис. 6. Импульсная характеристика волновода для различных положений приемника по глубине z / h : 1 – 0,023; 2 – 0,17; 3 – 0,67; 4 – 1 (кривые смещены на уровень 0,5)

В реальных условиях эксперимента на шельфе (типичным является акусто-гидрофизический полигон ТОИ ДВО РАН вблизи м. Гамова в Японском море) формируется придонный звуковой канал, параметры которого связаны с сезонной и суточной изменчивостью гидрологии. Это определяет появление в импульсной характеристике канала откликов с кинематическими параметрами, соответствующими компонентам акустического поля, как захваченным волноводом, так и не взаимодействующим с поверхностью. Таким образом, в импульсной характеристике волновода будут представлены приходы с инвариантами пространственно-частотной интерференционной структуры различных знаков.

На рис. 7 показаны времена прихода и амплитуды собственных лучей неоднородного волновода с параметрами: $f_0 h_0 / C_1 = 28$; $z_0 / h_0 = 0,99$; $z / h_0 = 0,99$; $r / h_0 = 48$ – по условиям реального эксперимента, проведенного в шельфовой зоне Японско-

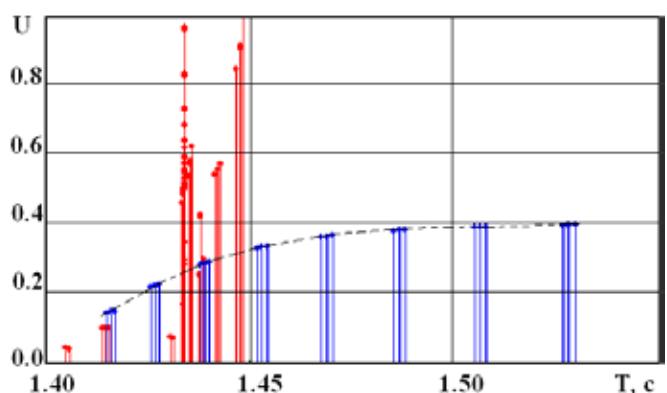


Рис. 7. Времена прихода и амплитуды собственных лучей неоднородного волновода. Пунктиром отмечены приходы лучей, взаимодействующих с поверхностью

го моря с имитацией работы элемента вертикальной антенны, расположенного вблизи дна. Парциальный вклад нормальных волн канального типа для данного волновода составляет $0,25\dots0,33$ от общего числа, в силу чего измерение фазовой скорости дает значение инварианта $\beta = 1,5\dots1,8$. Оценка импульсной характеристики волновода как результат корреляционной обработки сложного сигнала соответствует рис. 7, и компоненты сигнала с разными значениями инварианта частично разделяются. Для лучей, взаимодействующих с поверхностью, значение инварианта $\beta \approx 1$, для лучей, захваченных придонным волноводом, $\beta \approx -3\dots-4$. В случаях, когда лучи двух указанных групп приходят в точку приема почти одновременно, инвариант определяется парциальным вкладом интерферирующих лучей и может принимать различные нестабильные от реализации к реализации значения, что может проявляться в виде длиннопериодической модуляции отдельных максимумов текущей взаимной корреляции. Это видно из анализа многочасовой записи, представленной на рис. 8.

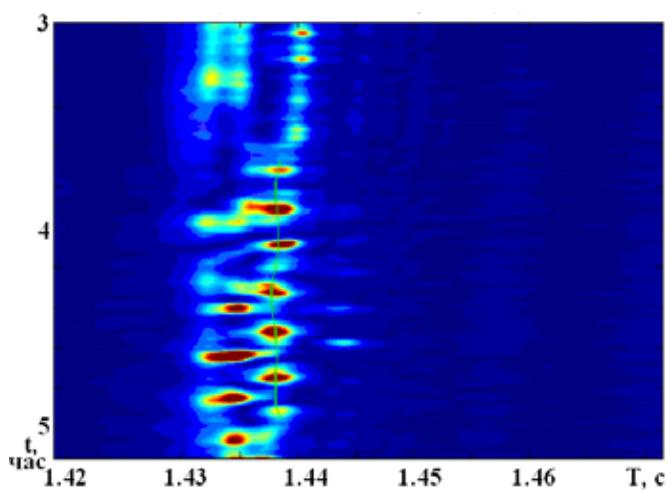


Рис. 8. Результат корреляционной обработки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в статье методы и средства измерения кинематических характеристик акустических волноводов находят применение при исследовании динамических процессов морской среды, при количественной оценке гидрофизических и акустических параметров последней.

Векторный приёмник совместно с корреляционной обработкой принятых его каналами сложных сигналов позволяет сразу получать зависимость групповой скорости от фазовой, а также направление на источник. При наличии четвёртой компоненты в составе конструкции ВП – измерителя звукового давления – появляется возможность оценки энергетических характеристик поля. Проблемами применения ВП в реальных морских условиях являются обеспечение нулевой плавучести и защита от шумов обтекания.

Классическая схема измерения пространственно-частотной интерференционной структуры звукового поля с использованием интерферометра обеспечивает надёжную работу этого средства при размещении вблизи дна волновода. Однако для реализации алгоритма когерентного сложения Фурье-компонент сигнала двух элементов недостаточно, и возникают проблемы ориентации в пространстве большого числа элементов, их технического обслуживания, передачи принятых ими сигналов в блок обработки.

Вертикальная антенна, обладая направленностью в вертикальной плоскости, позволяет разделить в лучевом представлении канальные и отражённые от дна лучи и измерить инварианты со знаком минус и плюс соответственно. Также возможно при соблюдении условия Колмогорова (теоремы отсчётов) выделение мод, что расширяет возможности вертикальной антенны по измерению кинематических характеристик, в частности, фазовой скорости через номер выделенной моды. Однако вертикальная антенна подвержена влиянию течений в месте постановки, повреждениям от плавредств.

Представляется интересным применение этих методов и средств для решения прикладных технических задач, таких как передача команд управления на подводные объекты по гидроакустическому каналу связи, навигационное обеспечение таких объектов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ТОИ ДВО РАН по теме «Разработка методологии исследования сложных акустических систем и сред», номер государственной регистрации 124022100075-6.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Акуличев В.А., Каменев С.И., Моргунов Ю.Н. Применение сложных акустических сигналов в системах связи и управления подводными объектами // Доклады АН. 2009. Т. 426, № 6. С. 821–823.
2. Чупров С.Д. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане // Акустика океана (современное состояние) / под ред. Л.М. Бреховских. М.: Наука, 1982. С. 71–91.
3. Касаткин Б.А. Инвариантные характеристики звукового поля в слоистом океане // Доклады АН СССР. 1986. Т. 291, № 6. С. 1483–1487.
4. Аксенов С.П., Каменев С.И., Касаткин Б.А. Некоторые характеристики звукового поля в клине, лежащем на жидком полупространстве // Акуст. журн. 1986. Т. 32, Вып. 5. С. 585–590.
5. Кузнецов Г.Н., Степанов А.Н. Влияние направленности источников на фазовые инварианты векторно-скалярных полей в мелком море // Доклады АН СССР. 2023. Т. 520, № 1. С. 17–23.
6. Кузнецов Г.Н., Степанов А.Н. Инвариант Чупрова для векторно-скалярных полей мультипольных источников в мелком море // Акуст. журн. 2024. Т. 70, № 3. С. 78–90.
7. Аксенов С.П., Кузнецов Г.Н. Оценка расстояния до источника в глубоком море с использованием пространственно-частотных характеристик интерференционного инварианта и эффективных фазовых и групповых скоростей моря // Акуст. журн. 2021. Т. 67, № 6. С. 603–616.
8. Аксенов С.П., Кузнецов Г.Н. Интерференционные инварианты в максимумах гидроакустического поля в глубоком море // Акуст. журн. 2024. Т. 70, № 1. С. 65–76.
9. Аксенов С.П., Кузнецов Г.Н. Применение инвариантов для обнаружения слабых сигналов в ближней зоне акустической освещенности // Доклады АН СССР. 2025. Т. 520, № 1. С. 3–9.
10. Патент РФ 2221261 Способ акустического зондирования океана / Коренбаум В.И., Тагильцев А.А., Моргунов Ю.В., Каменев С.И. и др. Заявлен 09.07.2002. Опубликован 10.01.2004.
11. Карлик Я.С. Гидроакустическая антенна – мощный инструмент для прогноза цунамигенных землетрясений // Сборник статей международной конференции «Локальные цунами: предупреждение и уменьшение риска». М.: Янус_К, 2002. С. 72–74.
12. Jane's Underwater Warfare Systems 1989-90 / ed. by B. Blake. – Coulsdon, Surrey, UK: Jane's Information Group, 1990. – 207 pp.

Справка об авторе

КАМЕНЕВ Сергей Иванович, с.н.с.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес места работы: г. Владивосток, ул.Балтийская, 43

Область научных интересов: физическая акустика, излучение и прием звука, звукоподводная связь, навигация подводных объектов, цифровая обработка сигналов

Тел.: (423) 2 31-16-31

E-mail: kamenev@poi.dvo.ru



DOI: 10.37102/1992-4429_2025_54_04_08

METHODS AND MEANS OF MEASURING THE KINEMATIC CHARACTERISTICS OF ACOUSTIC WAVEGUIDES

S.I. Kamenev

The article discusses methods and means for measuring the kinematic characteristics of an acoustic waveguide, such as phase and group velocities, as well as the invariant of the spatial-frequency structure of the acoustic field proposed in Chuprov's works. Currently, work has intensified on the use and refinement of the latter in relation to such hydroacoustics tasks as detecting weak signals, estimating the distance to the source, etc. The results of model and field experiments to evaluate the kinematic characteristics of a waveguide using such means as acoustic interferometers, vertical antennas, and vector receivers are discussed. The technical means were developed in the Department of Technical Means of Ocean Research at the TOI Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

Keywords: hydroacoustics, complex signals, kinematic characteristics, waveguide, phase velocity, group velocity, vector receiver, sound pressure, oscillatory velocity

References

1. Akulichev V.A., Morgunov Yu.N., Kamenev S.I., et al. Development of Remote Acoustic Methods and Research Tools in Oceanology // Far Eastern Seas of Russia. Moscow: Nauka, 2007. Book 4. Pp. 71-86.
2. Chuprov S.D. Interference Structure of the Sound Field in a Layered Ocean // Ocean Acoustics (Current State), edited by L.M. Brekhovskikh - Moscow: Nauka, 1982. Pp. 71-91.
3. Kasatkin B.A. Invariant characteristics of the sound field in a layered ocean // Reports of the USSR Academy of Sciences. 1986. Vol. 291. No. 6. Pp. 1483-1487.
4. Aksenen S.P., Kamenev S.I. and Kasatkin B.A. Some Characteristics of the Sound Field in a Wedge Resting on a Liquid Half-Space // Acoust. J. 1986. Vol. 32. No. 5. Pp. 585-590.
5. Kuznetsov G.N., Stepanov A.N. The influence of the orientation of sources on the phase invariants of vector-scalar fields in shallow seas // Reports of the RF Academy of Sciences. 2023. Vol. 520. No. 1. pp. 17-23.
6. Kuznetsov G.N., Stepanov A.N. Chuprov's invariant for vector-scalar fields of multipole sources in a shallow sea // Acoust. J. 2024. Vol. 70. No. 3.. pp. 78-90.
7. Aksenen S.P., Kuznetsov G.N. Estimation of the distance to the source in the deep sea using the spatial-frequency characteristics of the interference invariant and effective phase and group sea velocities // Acoust. J. 2021. T. 67. No. 6. pp. 603-616.
8. Aksenen S.P., Kuznetsov G.N. Interference invariants in the maxima of the sonar field in the deep sea // Acoust. J. 2024. T. 70. No. 1. pp. 65-76.
9. Aksenen S.P., Kuznetsov G.N. The use of invariants for detecting weak signals in the near-field of acoustic illumination // Reports of the RF Academy of Sciences. 2025. Vol. 520. No. 1. pp. 3-9.
10. Patent of the Russian Federation 2221261 Method of Acoustic Ocean Sounding / Korenbaum V.I., Tagil'tsev A.A., Morgunov Yu.V., Kamenev S.I., et al. Applied on 09.07.2002. Published on 10.01.2004.
11. Karlik Ya.S. Hydroacoustic antenna – a powerful tool for forecasting tsunami-generating earthquakes // Collection of articles of the international conference "Local tsunamis: warning and risk reduction". M.: Yanus_K. 2002. P. 72–74.
12. Jane's Underwater Warfare Systems, 1989-1990, p. 147

About the authors

KAMENEV Sergey Ivanovich, Senior Researcher Laboratory of Acoustic Tomography
POI FEB RAS
Address: Russia, 690041 Vladivostok, Baltiyskaya str., 43
Area of research interests: Physical acoustics, Digital signal processing, Underwater navigation, Underwater sound communication
Phone: (423-2)311-613. **E-mail:** kamenev@poi.dvo.ru

