

Наблюдение устойчивых компонент звуковых полей в натуральных измерениях в Ладожском озере

П. В. Артельный,* А. Л. Вировлянский,† А. Ю. Казарова,‡ Л. Я. Любавин, П. И. Коротин, А. В. Стуленков
Институт прикладной физики РАН. Россия, 603950, Н. Новгород, ул. Ульянова, д. 46
(Статья поступила 11.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

Представлены результаты обработки данных измерений пространственно–временных структур звуковых полей в Ладожском озере с помощью протяженной приемной вертикальной решетки. Целью обработки было выделение компонент поля, которые устойчивы по отношению к неизбежной неточности математической модели среды. В терминах лучевого подхода устойчивая компонента формируется узким пучком лучей. С точки зрения модового представления поля она образована небольшой группой мод. В обсуждаемом эксперименте анализировались звуковые поля, возбужденные точечным источником, излучавшим широкополосные импульсы, а также поля волновых пучков, возбужденных на фиксированных частотах с помощью излучающей вертикальной решетки. Сравнение результатов обработки данных с численным расчетом полей показывает, что, как и ожидалось, устойчивые компоненты могут быть предсказаны точнее, чем полное звуковое поле.

PACS: 43.30.Cq, 43.30.Bp, 43.30.Re УДК: 534.231

Ключевые слова: гидроакустический волновод, антенные решетки, звуковые пучки, лучи, моды, когерентные состояния.

ВВЕДЕНИЕ

В недавней статье [1] показано, что в гидроакустическом волноводе существуют устойчивые компоненты поля, которые слабо чувствительны к небольшим вариациям параметров среды. Эти компоненты могут быть относительно точно предсказаны даже в условиях неизбежной неточности математической модели волновода, используемой при расчете. В настоящей работе приведены результаты обработки данных натурального эксперимента, выполненного летом 2015 г. в Ладожском озере, которые подтверждают существование таких характеристик поля.

Натурные измерения тональных и импульсных звуковых полей были проведены с использованием точечного источника и разработанных и изготовленных в ИПФ РАН протяженных излучающих и приемных антенных решеток. Для выделения устойчивых компонент применены две предложенные в [1] процедуры, базирующиеся на разложении звуковых полей по когерентным состояниям и нормальным модам.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И МОДЕЛЬ СРЕДЫ

Глубина озера в месте проведения измерений составляла около 19 м. В ходе эксперимента возбуждались и регистрировались звуковые поля двух типов. Во-первых, это были поля, возбужденные точечным источником, излучавшим звуковые импульсы длительно-

стью 1 с с модуляцией частоты по линейному закону от 1500 до 3000 Гц (ЛЧМ сигналы). С помощью груза и поплавков источник был стационарно установлен на глубине 9.3 м. Кроме того, с помощью установленной рядом с ним излучающей вертикальной антенной решетки в волноводе формировались звуковые пучки на фиксированных частотах из интервала 2–4 кГц. Решетка состояла из 64 элементов, расположенных с шагом 0.2 м. Как и точечный источник, она была стационарно установлена и растянута в вертикальном направлении с помощью груза и поплавков. Решетка перекрывала интервал глубин от 4 м до 16.6 м. Импульсные сигналы и пучки регистрировались с помощью приемной вертикальной решетки, состоящей из 91 элемента, которые с шагом 0.2 м перекрывали интервал глубин от 1 до 19 м. В процессе измерений приемная решетка перемещалась вдоль акустической трассы. Регистрация ЛЧМ импульсов и монохроматических звуковых пучков осуществлялась в ряде точек дистанции, удаленных от места излучения на расстояния от 10 до 155 м.

В левой части рис. 1 изображены несколько профилей скорости звука, измеренных в точках акустической трассы во время проведения измерений. Один из них — он изображен жирной линией — был выбран в качестве опорного. При численных расчетах ПЗК моделировался плоскостойким волноводом с данным профилем скорости звука. Дно моделировалось однородным жидким полупространством с плотностью 1200 кг/м³ и скоростью звука 1440 м/с. В правой части рис. 1 изображен веер лучевых траекторий, вышедших из точечного источника по углам скольжения $\pm 15^\circ$. Расчеты звуковых полей выполнены методом широкоугольного параболического уравнения [2].

*E-mail: artelnyy@yandex.ru

†E-mail: viro@hydro.appl.sci-nnov.ru

‡E-mail: kazarova@hydro.appl.sci-nnov.ru

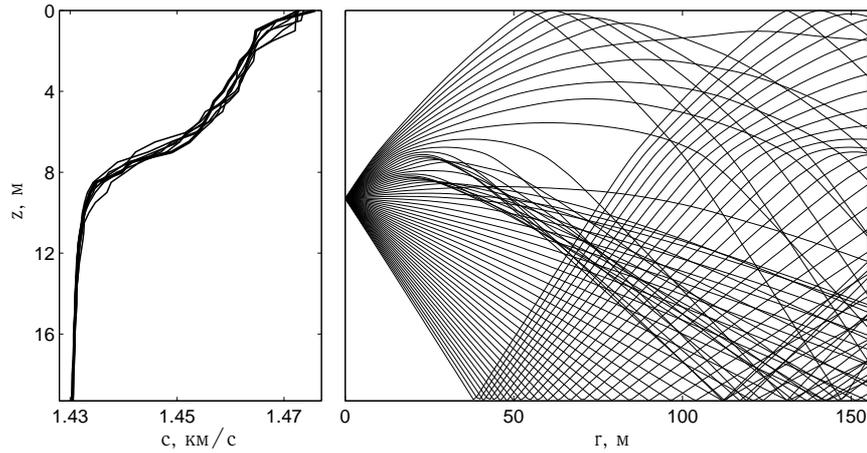


Рис. 1: Профили скорости звука в месте проведения эксперимента (слева) и траектории лучей, вышедшие из точечного источника (справа)

2. УСТОЙЧИВЫЕ КОМПОНЕНТЫ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

Неточность математической модели среды в ладожском волноводе в первую очередь вызвана отсутствием надежной информации о параметрах дна. Мы пользуемся простейшей моделью дна, указанные выше параметры которой подобраны путем минимизации различий между измеренными и рассчитанными полями в обсуждаемом здесь эксперименте и в других экспериментах, проводившихся на той же акватории [3].

Все лучи, пришедшие на заданную дистанцию наблюдения, мы разделяем на *водные*, которые ни разу не отразились от дна, и *донные*, которые испытали хотя бы одно отражение. Анализ отклонений измеренных профилей скорости звука от опорного показал, что при описании импульсных сигналов компоненту поля, формируемую водными лучами, можно рассматривать

в качестве устойчивой компоненты поля. С использованием нашей модели среды она может быть предсказана точнее, чем полное поле.

Комплексные амплитуды реального и рассчитанного звуковых полей в точке (r, z) в момент времени t обозначим $v(z, t, r)$ и $V(z, t, r)$, соответственно. Для выделения устойчивой компоненты воспользуемся описанной в [1] процедурой, основанной на разложении поля по когерентным состояниям. Устойчивые компоненты реального и измеренного полей обозначим $v_s(z, t, r)$ и $V_s(z, t, r)$, соответственно. Если антенна находится на расстоянии r_0 от источника, то гидрофон на горизонте z зарегистрирует сигнал $v(z, t, r_0)$. Для количественной оценки близости поля, измеренного антенной, и поля в том же интервале глубин, рассчитанного для произвольной дистанции r , введем коэффициент похожести

$$K(r) = \max_{\tau} \frac{| \int dz dt v(z, t, r_s) V^*(z, t + \tau, r) |}{\left(\int dz dt |v(z, t, r_s)|^2 \right)^{1/2} \left(\int dz dt |V^*(z, t + \tau, r)|^2 \right)^{1/2}}, \tag{1}$$

где интегрирование идет по апертуре приемной решетки, а τ компенсирует сдвиг сигналов во времени, появившийся из-за отсутствия синхронизации между излучением и приемом. $K(r)$ является примером так называемых функций неопределенности.

На рис. 2,а жирной кривой показана функция неопределенности $K(r)$, построенная для $r_0 = 30$ м. Тонкой кривой изображена аналогичная функция, рассчитанная по формуле (1) с заменой измеренного поля $v(z, t, r_0)$ на рассчитанное для той же дистанции поле

$V(z, t, r_0)$. Несмотря на то, что обе кривые имеют максимумы на одном и том же расстоянии, величины этих максимумов заметно отличаются друг от друга. Это говорит о заметном различии между теорией и экспериментом, вызванным неточностью модели среды. На рис. 2,б изображены аналогичные зависимости, полученные с заменой измеренных и рассчитанных полей их устойчивыми компонентами. На рис. 2,в и г приведены аналогичные функции неопределенности для дистанции 155 м. Как видим, максимумы жирных кривых

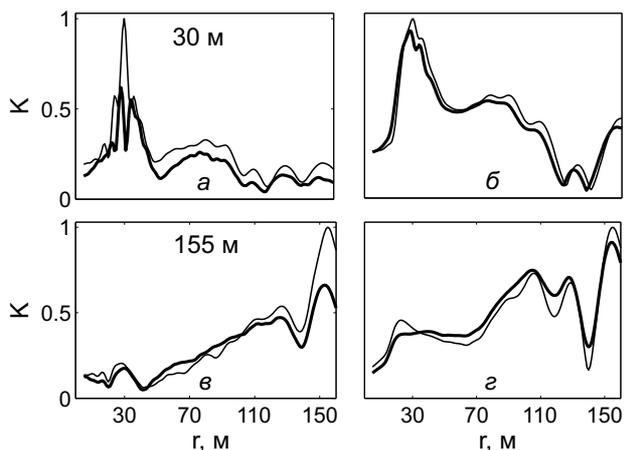


Рис. 2: Функции неопределенности для измеренных и рассчитанных звуковых импульсов (*a* и *в*) и устойчивых компонент этих импульсов (*б* и *г*) на дистанциях 30 м (*a* и *б*) и 155 м (*в* и *г*). Жирные линии: коэффициенты похожести измеренных и рассчитанных полей. Тонкие линии: то же самое, но с заменой измеренных полей теоретически рассчитанными полями

на правых графиках заметно ближе к единице, чем на левых. Это факт показывает, что, как и ожидалось, переход к устойчивым компонентам поля уменьшает различие между теорией и экспериментом.

3. УСТОЙЧИВЫЕ КОМПОНЕНТЫ ЗВУКОВЫХ ПУЧКОВ

Обратимся к анализу данных, полученных в опытах по излучению волновых пучков с помощью вертикальной антенной решетки. Амплитуды и фазы сигналов на элементах решетки подбирались таким образом, чтобы начальное поле на апертуре антенны имело комплексную амплитуду (временной множитель $e^{-2\pi if t}$ опускаем)

$$u_0(z) = A \exp \left[ik(z - z_c) \sin \alpha - \frac{\pi(z - z_c)^2}{a^2} \right],$$

где $z_c = 10.3$ м — глубина центра антенны, $a = 5$ м —

начальная ширина пучка, α — начальный угол скольжения пучка.

На рис. 3 показаны распределения амплитуды поля в вертикальных сечениях пучка на несущей частоте $f = 4015$ Гц, вышедшего под начальным углом скольжения $\alpha = 8^\circ$ в направлении к дну. Как видим, на некоторых дистанциях наблюдаются заметные отклонения теории (тонкие линии) от эксперимента (жирные линии).

Для выделения устойчивых компонент поля пучка применена процедура, основанная на использовании метода нормальных мод [1]. Устойчивая компонента поля пучка формируется вкладом группы мод, волны Бриллюэна которых на горизонте z_c имеют углы скольжения близкие к 8° . В нашем примере это моды с номерами $m = 10 \pm 2$. Стандартное разложение по нормальным модам и дополнительная пространственная фильтрация [1], позволили выделить устойчивую компоненту поля пучка, формируемую соответствующими волнами Бриллюэна. В нижней части рис. 3 показаны амплитуды таких компонент, выделенных из измеренных и рассчитанных полей в вертикальных сечениях волновода. Как видим, и в этом примере переход к устойчивым компонентам в значительной мере «стирает» различие между теорией и экспериментом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в [1] подход для выделения устойчивых компонент звуковых полей в данной работе применен для анализа пространственно-временных структур звуковых полей в Ладожском озере. Основные результаты работы представлены на рис. 2 и 3. Они показывают, что, как и ожидалось, устойчивые компоненты полей, возбужденных широкополосным импульсным источником, и монохроматических звуковых пучков, возбужденных вертикальной решеткой, действительно могут быть теоретически рассчитаны с большей точностью, чем суммарное поле. Таким образом, полученные результаты дают экспериментальное подтверждение существования устойчивых компонент звуковых полей в гидроакустическом волноводе.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 15-02-04042 и № 15-42-02390.

[1] *Virovlyansky A. L.* J. Acoust. Soc. Am. 2017. **141**, N 2. P. 1180.

[2] *Jensen F. B., Kuperman W. A., Porter M. B., Schmidt H.* Computational Ocean Acoustics. Springer. New York. 2011.

[3] *Артельный В. В., Артельный П. В., Вировлянский А. Л., Казарова А. Ю., Коротин П. И.* Акуст. журн. 2015. **61**, № 4. С. 477.

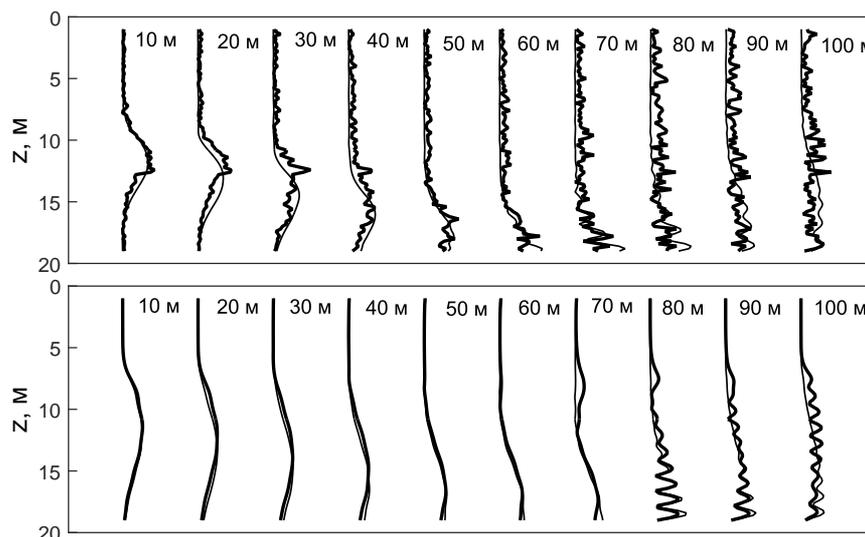


Рис. 3: Экспериментально измеренные (жирные линии) и теоретически рассчитанные (тонкие линии) распределения амплитуд поля в вертикальных сечениях пучка на дистанциях наблюдения, указанных на рисунке. Вверху: амплитуды полного поля. Внизу: амплитуды устойчивой компоненты поля

Observation of stable components of sound fields in field measurements in Lake Ladoga

P. V. Artel'nyi^a, A. L. Virovlyansky^b, A. Yu. Kazarovac^c, P. I. Korotin, L. Ya. Lyubavin, A. V. Stulenkov

Institute of Applied Physics of the RAS. N. Novgorod 603950, Russia

E-mail: ^aartelnyy@yandex.ru, ^bviro@hydro.appl.sci-nnov.ru, ^ckazarova@hydro.appl.sci-nnov.ru

Spatio-temporal structures of sound fields in Lake Ladoga were measured using an extended vertical receiving array. Results of processing of these data are presented. The processing was aimed at extracting such field components which are stable with respect to unavoidable inaccuracy of the environmental model. In terms of a ray-based approach the stable component is formed by a narrow beam of rays. In terms of the normal mode approach it is formed by a small group of modes. In the experiment under consideration, wave fields excited by a point source emitting wideband sound pulses and fields of wave beams excited at fixed frequencies using a vertical emitting array were analyzed. Comparison of results of the data processing and computed wave fields shows that, as expected, the stable components can be predicted more accurately than the total sound field.

PACS: 43.30.Cq, 43.30.Bp, 43.30.Re

Keywords: hydroacoustic waveguide, arrays, sound beams, rays, modes, coherent states.

Received 11 July 2017.

Сведения об авторах

1. Артельный Павел Викторович — мл. науч. сотрудник; тел.: (831) 416-49-72, e-mail: artelnyy@yandex.ru.
2. Вировлянский Анатолий Львович — доктор физ.-мат. наук, доцент, зав. лабораторией; тел.: (831) 416-47-84, e-mail: viro@hydro.appl.sci-nnov.ru.
3. Казарова Анна Юрьевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (831) 416-48-32, e-mail: kazarova@hydro.appl.sci-nnov.ru.
4. Коротин Павел Иванович — канд. физ.-мат. наук, зам. директора по научной работе; тел.: (831) 416-06-30, e-mail: monitor@appl.sci-nnov.ru.
5. Любавин Лев Яковлевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, ст. науч. сотрудник; тел.: (831) 416-48-32, e-mail: lyub@hydro.appl.sci-nnov.ru.
6. Стуленков Андрей Вадимович — мл. науч. сотрудник; тел.: (831) 416-49-72, e-mail: Andrey_stulenkov8@mail.ru.