

## Акустическая калибровка района установки антенн с использованием векторно-скалярных модулей

А. И. Белов,\* Г. Н. Кузнецов†

Научный центр волновых исследований Института общей физики имени А. М. Прохорова РАН  
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38

(Статья поступила 26.07.2017; Подписана в печать 19.09.2017)

Оцениваются параметры модели поверхностных слоев грунта в мелком море. Для анализа модовой структуры используются импульсы буксируемого пневмоисточника и преобразование Вигнера. Вертикальные векторные приемники выделяют семь мод. Скалярные приемники или горизонтальные векторные приемники выделяют только три моды. Показано, что использование вертикальных векторных приемников повышает точность оценки параметров модели слоистого дна.

PACS: 43.30.+m УДК: 542.34

Ключевые слова: нормальные волны, поверхностные слои грунта, векторно-скалярные приемники, преобразование Вигнера.

### ВВЕДЕНИЕ

В многослойном волноводе звуковые сигналы распространяются как в водной среде, так и в слоях грунта. Характеристики грунта в мелком море оказывают существенное влияние на звуковое поле в водном слое. По этой причине для анализа свойств нормальных волн в водной среде необходимо разрабатывать модели грунта и экспериментально оценивать их параметры в рамках принятой модели [1].

Исследуем векторно-скалярную структуру поля нормальных волн в мелком море. Характеристики выделенных нормальных волн используются далее для оценки параметров моделей грунта и оценки вероятных глубин проникновения мод в многослойный грунт. Для измерения параметров нормальных волн применяются скалярные приемники (СП), выделяющие моды всех номеров, горизонтальные векторные приемники (ГВП), которые из-за направленности чувствительности подавляют моды высоких номеров, но эффективно выделяют первые моды, и вертикальные векторные приемники (ВВП), обладающие повышенной чувствительностью к модам высоких номеров и подавляющие моды первых номеров.

### 1. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальные исследования проводились в мелководной акватории с глубиной около 53 м и с достаточно ровным — плоскопараллельным — дном в зоне приема сигналов. Буксируемая на глубине 15 м пневмопушка периодически излучала импульсы с амплитудой около двух атмосфер. Акустические сигналы регистрировались в дальней зоне — двумя

разнесенными по вертикали четырехкомпонентными векторно-скалярными приемными модулями, один из которых располагался на расстоянии около 1 м от дна, а другой был приподнят над дном на 20 м. Сигналы передавались в цифровом виде по кабелю на борт приемного судна. Приемное и излучающее суда оборудованы эхолотами и приемниками GPS, что позволило исследовать изменение профиля грунта вдоль трассы, синхронизировать излучаемые и принятые сигналы, измерить абсолютные времена распространения излучаемых импульсов и регистрировать координаты излучателя относительно приемной антенны. Расстояния до излучателя изменялись от 1.5 до 12.5 км. Более подробно методика изложена в [2].

Для анализа модовой структуры и оценки параметров нормальных волн принятых сигналов применялось преобразование Вигнера [2], которое для аналитического сигнала  $x(t)$  задано как двумерная функция времени и мгновенной частоты

$$B(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t + \tau/2) x(t - \tau/2) \exp(-2i\pi f\tau) d\tau.$$

Основное преимущество использования преобразования Вигнера для селекции мод по сравнению с классической сонограммой обусловлено компенсацией внутримодовой дисперсии, что позволяет разрешать моды на меньших расстояниях и на более высоких частотах, а также точнее оценивать времена прихода выделенных мод [2].

Результаты преобразования Вигнера импульсных сигналов от пневмоисточника, зарегистрированные двумя разнесенными по вертикали векторно-скалярными приемниками, включающими СП, ГВП и ВВП, представлены на рис. 1 и 2. Видно, что на приподнятом приемнике звукового давления на низких частотах регистрируются первая и третья моды (а). Отсутствие второй моды на этом приемнике (рис. 1, а и 2, а) объясняется расположением приподнятого модуля на глубине, близкой к нулю вертикального распределения амплитуды второй моды, формирующейся в эквивалентном (идеальном) волноводе. Донный приемник звукового давления регистрирует

\*E-mail: [belov-ai@mail.ru](mailto:belov-ai@mail.ru)

†E-mail: [skbmortex@mail.ru](mailto:skbmortex@mail.ru)

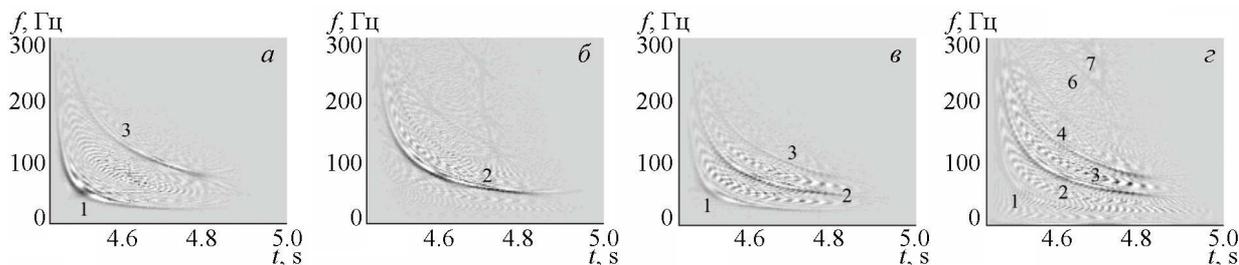


Рис. 1: Моды, выделенные преобразованием Вигнера. Расстояние 6515 м: *a, б* — приподнятый модуль, *в, з* — донный модуль, *a, в* — звуковое давление, *б, з* — вертикальная компонента вектора колебательной скорости. Цифры 1–7 обозначают номера мод

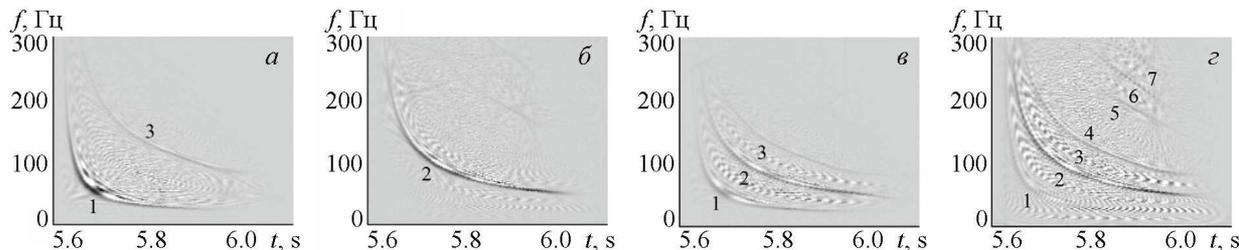


Рис. 2: То же, что и на рис. 1. Расстояние до пневмоисточника 8508 м

три моды (*в*). Иная картина наблюдается при анализе вертикальных проекций вектора колебательной скорости (ВП ВКС). В структуре этих сигналов отчетливо видны моды высоких номеров — до седьмой моды (рис. 1, *б, з* и 2, *б, з*). Можно также отметить совершенно различную структуру импульсов звукового давления и ВП ВКС для приподнятого приемного модуля. В частности, на низких частотах импульс ВП ВКС в отличие от импульса звукового давления формируется практически одной второй модой. Это хорошо видно на рис. 1, *б* и 2, *б*, соответствующих глубинам, для которых величина амплитуды моды давления близка к нулю (узел второй моды звукового давления). Амплитуда моды ВП ВКС достигает на этой глубине максимальных значений. На глубинах, где амплитуда моды звукового давления велика, амплитуда моды ВП ВКС принимает минимальные значения. Причина — приподнятый на 20 м от дна приемник расположен практически в середине эквивалентного волновода с акустически мягкой нижней границей.

## 2. ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН И ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ГРУНТА

На рис. 3 объединяются экспериментальные данные, полученные в различных частотных диапазонах скалярными и векторными приемниками разных приемных модулей, и результаты расчета групповых скоростей мод. Экспериментальные точки, в основном, соответствуют данным, полученным с использованием

ВВП, так как они позволяют оценить групповые скорости семи мод, в то время как скалярные приемники и ГВП выделяют только три первые моды (см. рис. 1 и 2).

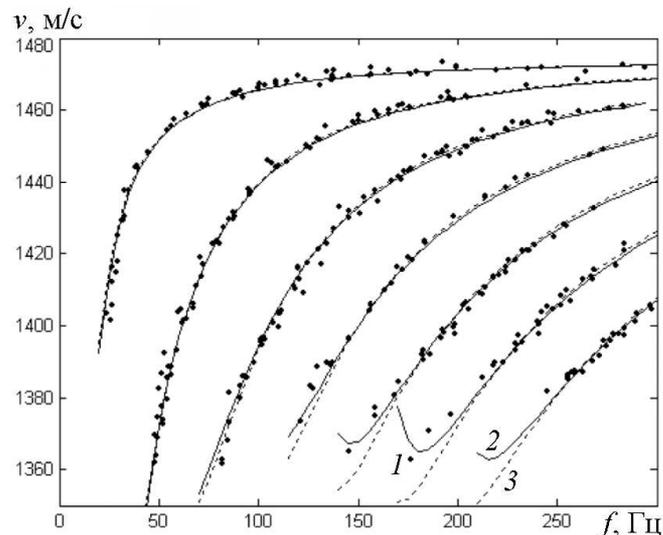


Рис. 3: 1 — Экспериментальные точки и 2,3 — расчетные зависимости групповых скоростей мод от частоты: 2 — модель 1, 3 — модель 2

Измеренные значения групповых скоростей мод  $v$  для многочисленных импульсов, принятых на расстояниях от 6.5 до 9.8 км от излучателя, использованы в качестве исходных данных — начального приближения для оценок геоакустических параметров морского

Таблица I: Вычисленные параметры модели морского дна

	$h_L$ , м	$\rho_L$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_L$ , м/с	$\rho_B$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_B$ , м/с
Модель 1	18.9	1467	1644.4	1554	2269.5
Модель 2	20.4	1469	1661.3	1623	2353.6

Таблица II: Средние квадратичные погрешности оценки параметров модели морского дна

	$\sigma(h_L)$ , м	$\sigma(\rho_L)$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma(c_L)$ , м/с	$\sigma(\rho_B)$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma(c_B)$ , м/с
Модель 1	3.2	183	11.8	690	888.2
Модель 2	5.6	290	33.6	930	1328.2

дна. Оптимизационная процедура оценки параметров модели дна заключалась в минимизации функционала  $L = \sum_n \left[ \sum_f (v^e - v^c)^2 \right] m_n^{-1}$ , где  $f, n$  — значения частот и количество мод на этих частотах, для которых были получены оценки групповых скоростей,  $m_n$  — количество оценок групповой скорости  $n$ -й моды на всех частотах. Индексами  $e$  и  $c$  обозначены экспериментальные оценки и рассчитанные значения групповых скоростей мод. Минимизация этого функционала осуществлялась путем многомерной оптимизации методом Нелдера–Мида [3]. Поиск параметров дна выполнялся в рамках модели плоскостростого волновода. При минимизации функционала  $L$  рассматривались два варианта использования исходных данных, что позволило рассчитать две группы параметров модели дна. В варианте 1 при минимизации использовались семь выделенных ВВП мод. В варианте 2 минимизация основывалась на результатах измерения СП групповых скоростей только первых трех мод. В результате минимизации функционала установлено, что модель Пекериса [1] нельзя использовать в качестве адекватной модели волновода. Поэтому в модель дна был введен дополнительный верхний «жидкий» слой. Характеристики этого слоя, такие как толщина  $h_L$ , плотность  $\rho_L$  и скорость продольных колебаний звука  $c_L$ , — совместно с глубиной района работ — были включены в число варьируемых параметров. Поиск параметров модели дна с одним жидким слоем грунта показал, что средние величины параметров модели дна для двух вариантов обработки оказались близки друг другу (табл. 1).

Из рис. 3 также следует, что теоретические зависимости групповых скоростей для двух моделей (кривые 2 и 3) хорошо согласуются с экспериментальными данными (точки). То есть, обе модели достаточно точно на качественном уровне описывают экспериментальные данные и модовые спектры и, соответственно — усредненные характеристики поверхностных слоев грунта.

Количественная оценка погрешности расчета модовых спектров и характеристик грунта по двум моде-

лям выполнена по формулам, приведенным в [4]: были рассчитаны средние квадратичные погрешности  $\sigma_x$  значений искомых параметров (табл. 2). Установлено, что учет характеристик мод высоких номеров заметно уменьшает средние квадратичные погрешности, то есть модель 1 дает более достоверные значения параметров модели грунта.

*Оценка глубины проникновения мод в грунт.* На высоких частотах моды затухают в поверхностных слоях грунта и не доходят до полупространства. Поэтому на параметры водных высокочастотных мод глубоко залегающие донные отложения практически не влияют. Как следствие, в этом диапазоне частот слоистая модель дна ведет себя подобно полупространству [1, 2, 5]. Отсюда также следует, что при использовании сигналов на высоких частотах реальная глубина волновода, измеренная эхолотом, и эквивалентная глубина акустического волновода, полученная в рамках решения обратной задачи, должны быть практически равными, что и подтверждается экспериментально.

Для предварительной оценки толщины осадочного слоя, оказывающего влияние на характеристики распространяющихся мод, уместно дополнительно воспользоваться концепцией глубины «эффективного» волновода [5]. В соответствии с этой концепцией волновод в виде однородного жидкого слоя толщиной  $H$ , лежащего на жидком полупространстве, можно заменить моделью идеального волновода с абсолютными мягкими границами толщиной  $H + \Delta H$ . Величина  $\Delta H$  в этом случае может быть использована для приближенной оценки глубины проникновения различных мод в грунт. Для вычисления  $\Delta H$  могут быть использованы соотношения [5]  $\Delta H = (\rho/\rho_w)(k_w \sin \theta)^{-1}$ ,  $\theta = \arccos(c_w/c)$ ,  $k_w = 2\pi f/c_w$ , где  $\rho_w, \rho$  — плотности и  $c_w, c$  — скорости звука в воде и полупространстве. Минимальная частота, на которой были получены экспериментальные данные для первой моды, равнялась 25 Гц. Оценка заглупления для этой частоты с учетом рис. 3 дает значения  $\Delta H$  равные 26.7 м для модели 1 и 24.7 м для модели 2. Эти величины больше соответствующих толщин верхнего слоя из табл. 1. Это озна-

чает, что на самых низких частотах моды первых номеров проникают достаточно глубоко в полупространство и влияние его параметров на характеристики первой моды существенно. Для второй моды минимальная частота составила 46 Гц. Для нее величины  $\Delta H$  равны 16 и 17.4 м, соответственно. Эти значения уже меньше, чем толщины верхнего слоя из табл. 1, но еще близки к ним. Естественно, влияние свойств полупространства на вторую моду на низких частотах, на которых были измерены ее характеристики, меньше, чем на первую моду. Тем не менее, влияние полупространства должно быть заметным. Можно предположить, что это влияние проявляется и на более высоких частотах, поскольку моды своими экспоненциальными «хвостами» «цепляют» нижнее полупространство. Однако их амплитуды на границе слоя и полупространства из-за затухания малы и на высоких частотах влияние полупространства на характеристики мод в водном слое невелико.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование вертикальных векторных приемников (ВВП) позволяет выделить и оценить параметры се-

ми распространяющихся в волноводе мод, в том числе наиболее чувствительных к поверхностным слоям грунта мод высоких номеров. СП и ГВП выделяют в этих условиях только три первых моды. Как следствие, использование ВВП обеспечивает более детальный анализ характеристик мод в водном слое и характеристик поверхностных слоев грунта — уменьшается дисперсия их оценок, повышается достоверность (адекватность) разработанной акустической модели передаточной функции волновода.

Для низкочастотных сигналов глубина «эквивалентного» волновода может нести предварительную информацию о глубине проникновения мод первых номеров в поверхностные слои грунта.

Использование преобразования Вигнера повышает разрешающую способность выделения мод, что позволяет более точно измерить их групповые скорости уже при относительно малых расстояниях между приемниками и излучателями, в том числе на сравнительно высоких частотах.

- [1] Кацнельсон Б. Г., Петников В. Г. Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997.  
[2] Белов А. И., Кузнецов Г. Н. Акуст. журн. 2013. **60**, № 2. С. 190.  
[3] Nelder J. A., Mead R. Comp. J. 1965. **7**. P. 308.

- [4] Худсон Д. Статистика для физиков / пер. с англ. М.: Мир, 1967.  
[5] Weston D. E. J. Acoust. Soc. Am. 1960. **65**, N 2. P. 647.

## Acoustic calibration of installation area of antennas using a vector-scalar modules

A. I. Belov<sup>a</sup>, G. N. Kuznetsov<sup>b</sup>

Wave Research Center at General Physics Institute. Moscow 119991, Russia

E-mail: <sup>a</sup>belov-ai@mail.ru, <sup>b</sup>skbmortex@mail.ru

Evaluated parameters of the model of the surface layers of soil in a shallow sea. To analyze the mode structure was applied pulses towed pneumatic source and Wigner transform. The seven modes were isolated by vertical vector receivers. Scalar receivers or vector horizontal receivers emit only three modes. It is shown that the use of vertical vector receivers improves the accuracy of estimating the parameters of a layered bottom model.

PACS: 43.30.+m

Keywords: normal waves, surface layers of the soil, vector-scalar receivers, Wigner transform.

Received 26 July 2017.

### Сведения об авторах

1. Белов Александр Иванович — ст. науч. сотрудник; тел.: (499) 256-17-90, e-mail: belov-ai@mail.ru.
2. Кузнецов Геннадий Николаевич — канд. физ.-мат. наук, начальник СКБ «Морские технологии», профессор; тел.: (499) 256-17-90, e-mail: skbmortex@mail.ru.