

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

УДК 551.463.621.391

ВОЗМОЖНОСТЬ ДИАГНОСТИКИ СЛОИСТЫХ СРЕД ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИМ ГИДРОЛОКАТОРОМ БОКОВОГО ОБЗОРА

© 2024 г. В. И. Каевицер, А. П. Кривцов, И. В. Смольянинов*, А. В. Элбакидзе

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация*

**E-mail: ilia159@mail.ru*

Поступила в редакцию 15.12.2022 г.

После доработки 27.11.2023 г.

Принята к публикации 27.11.2023 г.

Рассмотрен метод и разработан алгоритм, позволяющий выявить слоистую структуру среды распространения зондирующего сигнала по данным полосовой съемки интерферометрического гидролокатора бокового обзора (ИГБО) с расположением антенн в вертикальной плоскости. На примере математического моделирования фазоразностных измерений ИГБО для многослойных рассеивающих плоскостей продемонстрированы возможности предлагаемого алгоритма определять их пространственное положение в среде распространения волны. Выполнен анализ точности вычисления положения рассеивающих слоев по высотам (глубинам) и с различным уклоном. Подтверждена эффективность метода и алгоритма для диагностики структуры слоистых сред. Проверена эффективность метода на экспериментальных данных, полученных с помощью ИГБО.

Ключевые слова: зондирующий сигнал, интерферометрический гидролокатор бокового обзора, фазоразностные измерения, диагностика структуры слоистых сред

DOI: 10.31857/S0033849424020065, EDN: KMOBJC

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Радиофизические методы зондирования находят широкое применение при определении структуры и параметров различных сред [1–5]. Одним из важных направлений таких исследований является изучение слоистых сред [6]. Это относится к исследованиям ионосферы, тропосферы, а также водной среды и дна морей и океанов. Для исследований слоистости сред разработаны многочисленные методы и измерительные системы, в том числе интерферометрический гидролокатор бокового обзора (ИГБО), предназначенные для изучения рельефа подстилающей поверхности на основе измерения наклонной дальности до рассеивающих элементов поверхности и углов прихода эхо-сигналов [7–9]. На рис. 1 приведена геометрия съемки подстилающей поверхности интерферометром бокового обзора. Для излучения зондирующей посылки используется антенна A_0 , а для приема сигналов, рассеянных подстилающими поверхностями, антенны A_1 и A_2 .

Цель данного исследования — разработать методику обнаружения слоев в среде распро-

странения волн и вычисления их расположения по высотам (глубинам).

На основе методики, приведенной в работе [9], проанализируем возможность обнаружения в морской среде горизонтальных звукорассеивающих слоев (ЗРС) и вычисления их пространственного положения с помощью ИГБО (см. рис. 1). Вычисления интерферометрической разности фаз проведем для вертикального расположения излучающей и приемных антенн A_0 , A_1 , A_2 и двух слоев рассеивающих плоскостей (для примера на глубине 20 и 100 м). Для обоснования эффективности предлагаемой методики для диагностики слоистых сред проведем моделирование алгоритма для водной среды с обоими слоями. В процессе модельных расчетов рассмотрим параметры, влияющие на точность диагностики, и проверим их на экспериментальных результатах, полученных ИГБО при исследованиях участка дна с выровненным рельефом, и слабых ЗРС в водной среде на глубине около 100 м (рис. 2).

Обоснуем возможность диагностики слоистых сред ИГБО.

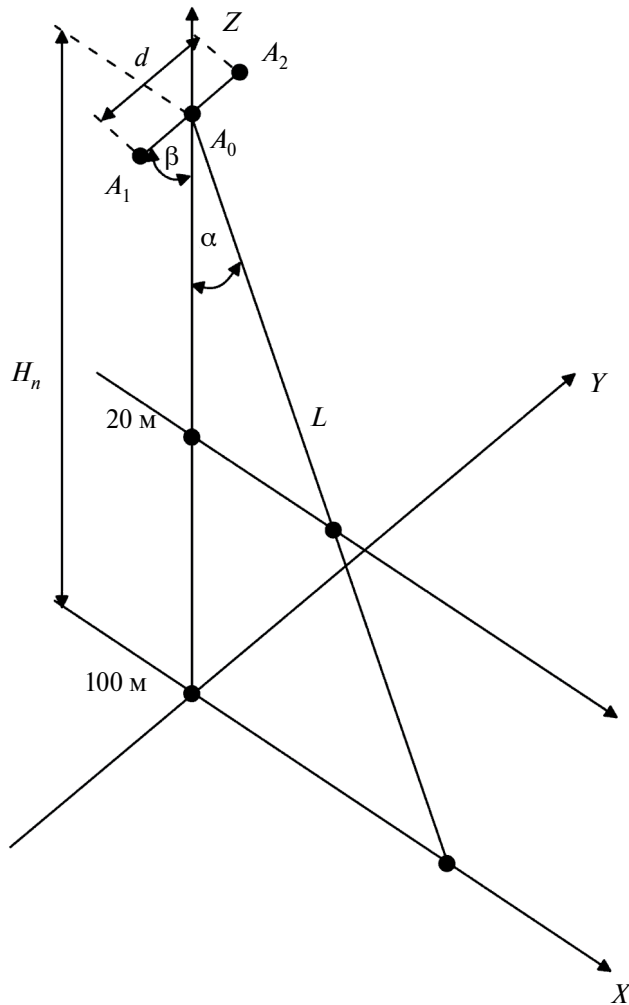


Рис. 1. Геометрия съемки подстилающей поверхности интерферометром бокового обзора.

2. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОБНАРУЖЕНИЯ РАССЕИВАЮЩИХ СЛОЕВ

Полученные при съемке данные для интерферометрической разности фаз при плоской отражающей поверхности, соответствующие одному циклу излучения и приема сигнала, можно записать в следующем виде:

$$\varphi_n(t) = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos(\alpha_n(t) + \beta), \quad (1)$$

где

$$\alpha_n(t) = \arccos\left(\frac{2H_n}{ct}\right).$$

Здесь H_n — расстояние до слоя n , c — скорость распространения зондирующего сигнала, t — время прихода эхо-сигнала, d — расстояние между приемными антеннами интерферометра, λ — длина волны, β — угол наклона базы интер-

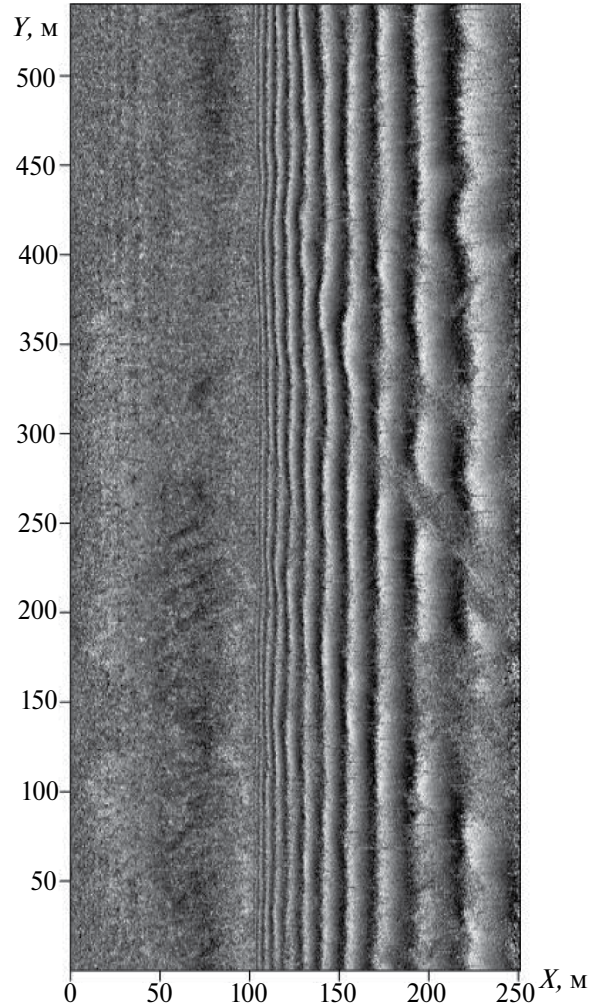


Рис. 2. Пример разности фаз, полученной ИГБО.

ферометра. На рис. 3 приведены зависимости вычисленной интерферометрической разности фаз от наклонной дальности L до рассеивающего элемента поверхности дна при вертикальной ориентации базы интерферометра ($\beta = 0$, $d/\lambda = 20$) для ЗРС на глубинах 20 и 100 м.

Как видно из рисунка, интерферометрическая разность фаз имеет вид сигнала с частотной модуляцией. Если рассматривать интерферометрическую разность фаз $\varphi(t)$ в качестве сигнала, зависящего от глубины H , как от параметра, то корреляционная функция (КФ) сигнала $\varphi_n(t)$ при определенном H_n и КФ моделей $\varphi(t)$ по всем глубинам может быть записана в следующем виде:

$$\rho_n(H_n, H) = \frac{1}{T} \int_0^T \varphi(H_n, t) \varphi(H, t) dt, \quad (2)$$

где T — время приема отраженного сигнала ИГБО.

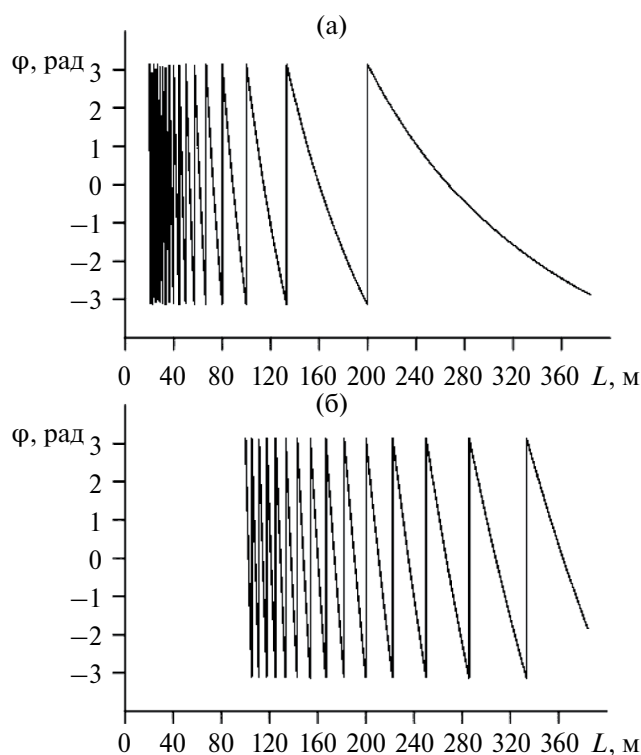


Рис. 3. Зависимость интерферометрической разности фаз от наклонной дальности для ЗРС на глубинах 20 (а) и 100 м (б).

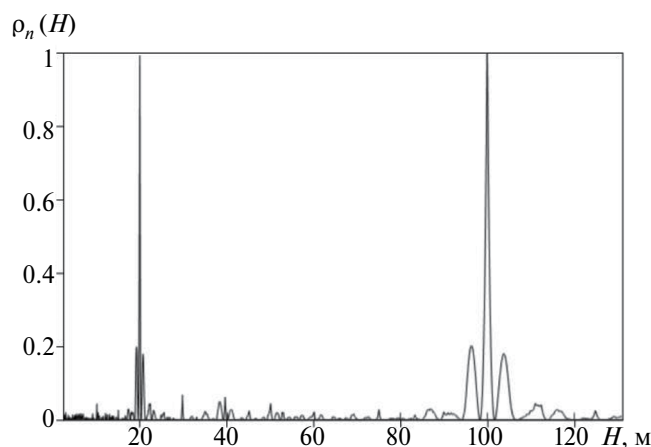


Рис. 4. Результат моделирования корреляционной обработки для плоских, горизонтальных ЗРС на глубинах 20 и 100 м.

Для заданного значения H_n нормированная КФ является функцией, зависящей только от глубины H :

$$\rho_n(H) = \frac{\int_0^T \Phi(H_n, t) \Phi(H, t) dt}{\int_0^T \Phi^2(H_n, t) dt}.$$

На рис. 4 представлен модуль этой функции, рассчитанный для двух ЗРС на глубинах 20 и

100 м соответственно. Для вычислений шаг по глубине взят равным 5 см. Как видно по результатам модельных расчетов, КФ имеет основной максимум и существенный уровень боковых лепестков, что приводит к проявлению собственных шумов сигнала при картировании протяженных ЗРС. При этом если калибровочное значение базы интерферометра известно с высокой точностью, то максимумы функций расположены на глубинах, заложенных в модель, а пики имеют высокое соотношение сигнал/шум и достаточно узкие, что подтверждает возможность разрешения слоев по глубинам их расположения.

Отметим, что разрешающая способность алгоритма и соотношение сигнал/шум увеличивается при увеличении базы интерферометра.

Для оценки разрешения рассмотренного алгоритма вернемся к рис. 3. Видно, что период разности фаз меняется от некоторого начального значения до бесконечности в предельном случае. То есть полосу частот такого сигнала можно оценочно считать равной максимальной частоте, соответствующей первому периоду. Для $d/\lambda \gg 1$ оценка длительности первого периода вычисляется по формуле

$$\tau \approx (2H_n \lambda) / cd,$$

соответственно, разрешение по высоте (глубине) составит

$$\Delta H \approx 2H_n \frac{\lambda}{d}.$$

Для базы интерферометра $d/\lambda = 20$ разрешение по глубине составит $\Delta H \approx 0.1H_n$.

При реальной работе ИГБО угол β может отличаться от нуля либо слои, рассеивающие зондирующий сигнал, расположены не горизонтально, поэтому в модель следует внести зависимость $\Phi(t)$ в формуле (1) от угла β и рассматривать как функцию, зависящую от двух параметров — H и β . Двумерная корреляционная функция такого сигнала определяется соотношением

$$\rho(\Delta H, \Delta \beta) = \int_0^{t_{\max}} \Phi(H_0, \beta_0, t) \Phi(H_0 + \Delta H, \beta_0 + \Delta \beta, t) dt. \quad (3)$$

где $t_{\max}$ — время приема сигнала.

На рис. 5 представлен результат моделирования нормированной двумерной корреляционной функции в зависимости от глубины H и угла β для плоского слоя на глубине 100 м. База интерферометра $d/\lambda = 20$. Профиль разреза КФ

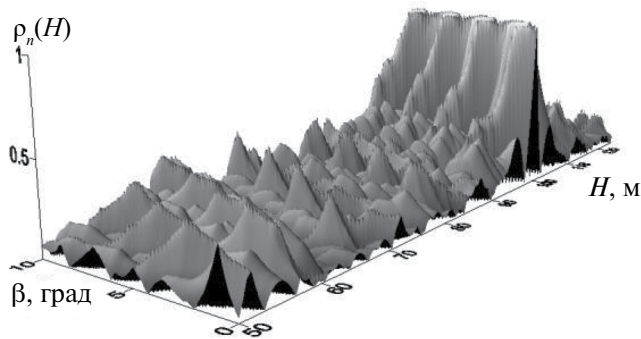


Рис. 5. Результат моделирования нормированной двумерной корреляционной функции в зависимости от глубины H и угла β ; глубина слоя модели 100 м, база интерферометра $d/\lambda = 20$.

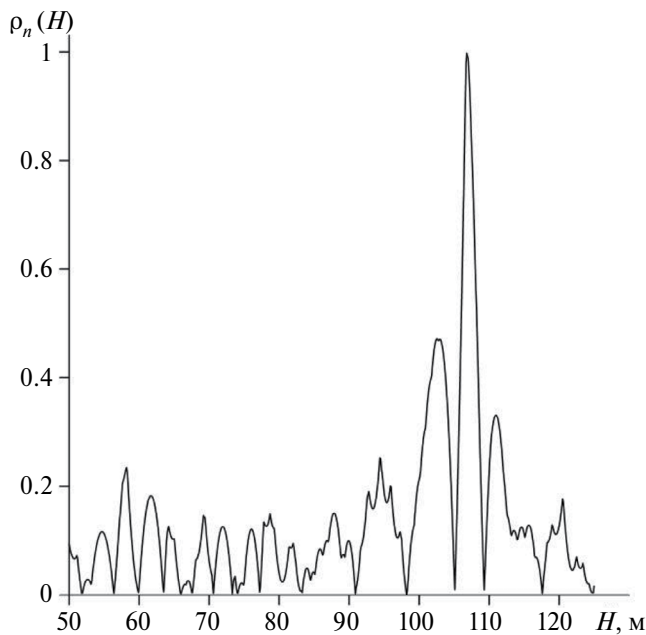


Рис. 6. Результат моделирования корреляционной обработки для плоского ЗРС на глубине 100 м (разрез по углу $\beta = 5^\circ$).

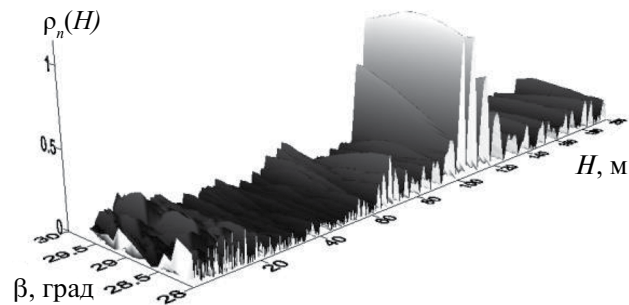


Рис. 7. Результат двумерной корреляционной обработки экспериментальных измерений ИГБО в зависимости от глубины H и угла наклона β .

по $\beta = 0^\circ$, соответствующий горизонтальному положению слоя, совпадает с результатом моделирования, приведенным на рис. 4, что же касается разреза при $\beta = 5^\circ$ (рис. 6), то наклон слоя существенно влияет на результаты оценки его глубины. Если по разрезу $\beta = 0^\circ$ слой определяется на глубине 100 м, как это и закладывалось при моделировании, то при $\beta = 5^\circ$ вычисления дают смещенную оценку примерно на 7 м.

Полученные результаты моделирования показывают возможность применения предложенного алгоритма для обнаружения в морской среде ЗРС и измерения расстояния до них с точностью, зависящей от калибровки интерферометра и отклонения ЗРС от горизонтальной плоскости.

3. ПРОВЕРКА РАБОТЫ АЛГОРИТМА НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Рассмотрим возможности разработанного алгоритма по обнаружению и оценке положения ЗРС в морской среде. С этой целью используем результаты работы интерферометра бокового обзора, приведенные на рис. 2. Как следует из рисунка, хорошо просматривается интерферометрическая разность фаз сигналов, рассеянных поверхностью дна. Кроме того, в толще воды слабо просматривается интерферометрическая разность фаз, обусловленная наличием ЗРС. Съемка проводилась при $d/\lambda = 13$ и наклоне антенн интерферометра 30° .

Применим разработанный алгоритм к имеющимся экспериментальным данным. На рис. 7 представлены результаты расчета двумерной корреляционной функции с применением разработанного алгоритма к экспериментальным измерениям ИГБО в зависимости от глубины H и угла β .

На рисунке хорошо выделяется слой, обусловленный донным рассеянием на глубине около 100 м. Как видно, максимум, соответствующий глубине этого слоя, смещен по углу β примерно на $\Delta\beta = -1^\circ$. Если проанализировать более слабые максимумы в водной толще, то можно отметить слабые ЗРС в районе глубины 70 м в разрезе $\beta = 28^\circ$ и глубины 50 м в разрезе $\beta = 30^\circ$.

Отметим, что в соответствии с условиями экспериментальной съемки эффективная вертикальная база ИГБО составляла около 11λ , что почти в два раза меньше, чем при проведенном моделировании. Однако принципиальная возможность разработанной методики для диагностики слоистых сред подтверждена экспериментально.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обоснован способ и разработан алгоритм диагностики слоистых сред, основанный на обнаружении и вычислении положения рассеивающих слоев с помощью интерферометра бокового обзора. Проведено опробование алгоритма на математических моделях, подтвердившее его эффективность для решения поставленной задачи. Алгоритм проверен на примере обработки экспериментальных данных, полученных ИГБО при съемке рельефа на участке со сравнительно плоским дном. Обоснована возможность применения разработанного алгоритма для обнаружения звукорассеивающих слоев при исследовании морей и океанов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (тема № 075-01133-22-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захаров А.И., Яковлев О.И., Смирнов В.М. Спутниковый мониторинг земли: Радиолокационное зондирование поверхности. М.: Либрокон, 2013.
2. Арманд Н.А. // РЭ. 1995. Т. 40. № 3. С. 357.
3. Armand N.A., Polyakov V.M. Radio propagation and remote sensing of the environment. N.Y.: CRC Press, 2005.
4. Андреева И.Б. // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 4. С. 437.
5. Морозов А.Н., Лемешко Е.М., Федоров С.В. // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 5. С. 513.
6. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: АН СССР, 1957.
7. Kaevitser V.I., Razmanov V.M. // Physics-Uspekhi (Advances in Phys. Sci.). 2009. V. 179. № 2. P. 218.
8. Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В., Степанов А.В. // Журн. радиоэлектроники. 2017. № 4. <http://jre.cplire.ru/jre/apr17/2/text.pdf>
9. Каевитсер В.И., Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В. // Журн. радиоэлектроники. 2022. № 10. <http://jre.cplire.ru/jre/oct22/7/text.pdf>

POSSIBILITY OF DIAGNOSTICS OF LAYERED MEDIA WITH INTERFEROMETRIC SIDE-VIEW SONAR

V. I. Kaevitser, A. P. Krivtsov, I. V. Smolyaninov*, A. V. Elbakidze

Fryazino branch Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics Russian Academy of Sciences, Fryazino Moscow oblast, 141190 Russia

**E-mail: ilia159@mail.ru*

Received December 15, 2022; revised November 27, 2023; accepted November 27, 2023

A method is considered and an algorithm is developed that makes it possible to identify the layered structure of the propagation medium of a probing signal based on strip survey data from an interferometric side-scan sonar (ISSS) with antennas located in a vertical plane. Using the example of mathematical modeling of phase-difference measurements of ISSS for multilayer scattering planes, the capabilities of the proposed algorithm to determine their spatial position are demonstrated in the wave propagation medium. An analysis of the accuracy of calculating the position of scattering layers at heights (depths) and with different slopes was performed. The effectiveness of the method and algorithm for diagnosing the structure of layered media has been confirmed. The effectiveness of the method was tested on experimental data obtained using ISSS.

Keywords: probe signal, interferometric side-scan sonar, phase difference measurements, diagnostics of the layered media structure