

## Оптимизация алгоритмов решения обратной задачи при реконструкции геоакустических параметров слоев дна морского шельфа с помощью зондирования когерентными сейсмоакустическими импульсами

В. И. Калинина,<sup>\*</sup> И. П. Смирнов,<sup>†</sup> А. И. Хилько<sup>‡</sup>

Федеральный исследовательский центр ИПФ РАН, Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46  
(Статья поступила 05.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

Изучаются алгоритмы послылой реконструкции геоакустических параметров донных слоев с использованием параметрических моделей формирования сигналов, отраженных от слоистого пространства при когерентном зондировании морского шельфа. Исследуется устойчивость алгоритмов поиска и принятия решений при ограниченных априорных данных.

PACS: 43.30.+m

УДК: 534.23

Ключевые слова: морское дно, сейсмоакустическое зондирование, реконструкция геоакустических параметров, решающие правила, регуляризация, робастность.

### ВВЕДЕНИЕ

В докладе исследуется устойчивость к шумам метода когерентной сейсмоакустической (СА) реконструкции геоакустических параметров донных слоев в морских шельфовых зонах [1]. Метод основан на корреляционной обработке отраженных от донных слоев когерентных СА сигналов и оценивании с их помощью значений параметров донных слоев: толщин, плотностей, скоростей продольных и поперечных волн, декрементов затухания. Для решения обратной задачи используются априорные данные в виде моделей формирования сигналов и помех при отражении СА сигналов от слоистого морского дна [1–3]. Оценки параметров донных слоев находятся максимизацией выходной мощности обобщенного процессора MUSIC.

### 1. МОДЕЛИ СИГНАЛОВ

Рассматривается задача восстановления вектора параметров жидкого слоистого дна  $\phi$ . Компоненты вектора: толщины слоев  $\{h_k\}$ , плотности их грунтов  $\{\rho_k\}$ , скорости звука  $\{c_k\}$ , декременты затухания  $\{\delta_k\}$ . Размерность пространства параметров равна  $4N-1$ , где  $N$  — число слоев (толщина нижнего слоя  $h_N$  считается бесконечной).

В приближении геометрической акустики комплексные амплитуды прямого и отраженных от поверхности и границ донных слоев сигналов частоты  $\omega$  в точке приема  $\mathbf{r}_R$  равны соответственно

$$g(\omega, \mathbf{r}_R) = \frac{\exp[-ik_0(\omega) r_{SR}]}{r_{SR}}, \quad g^{(V)}(\omega, \mathbf{r}_R) = \hat{V}_V \frac{\exp[-ik_0(\omega) (r_{SV} + r_{VR})]}{r_{SV} + r_{VR}},$$

$$g^{(0)}(\omega, \mathbf{r}_R) = \hat{V}_{01} \frac{\exp[-ik_0(\omega) (r_{S0} + r_{R0})]}{r_{S0} + r_{R0}},$$

$$g^{(1)}(\omega, \mathbf{r}_R) = \hat{V}_{12} \hat{W}_{01}(\theta_{01}) \hat{W}_{10}(\theta_{11}) \frac{\exp[-i\varphi_1(\omega)]}{r_{S1} + r_{R1} + 2r_{11}},$$

.....

Здесь  $V_{mn}$ ,  $W_{mn}$  — коэффициенты Френеля, определяющие амплитуды отраженных и преломленных донными слоями волн. Сигнальный вектор  $\mathbf{e}$  на гидрофонах  $\mathbf{r}_R(k)$ ,  $k = 1 \dots N_a$  приемной антенны моделируем в форме

$$\mathbf{e} = (e(\omega, 1), \dots, e(\omega, N_a)),$$

$$e(\omega, k) = g(\omega, \mathbf{r}_R(k)) + g^{(V)}(\omega, \mathbf{r}_R(k)) + g^{(0)}(\omega, \mathbf{r}_R(k)) + g^{(1)}(\omega, \mathbf{r}_R(k)) + \dots,$$

а корреляционную матрицу  $\hat{\Gamma}_x(\omega)$  на выходе приемной антенны — по правилу:

$$\hat{\Gamma}_x(\omega) = \sum_{l=1}^L \mathbf{x}_l(\omega) \mathbf{x}_l'(\omega) / L, \quad (1)$$

$$\mathbf{x}_l(\omega) = \sqrt{s N_a} n_l^{(s)} \bar{\mathbf{e}} / \|\bar{\mathbf{e}}\| + (n_1^{(1)} + i n_1^{(2)}) / \sqrt{2}.$$

Здесь  $\mathbf{x}_l(\omega) = (x_1(\omega), \dots, x_{N_a}(\omega))$  — принимаемый вектор,  $L$  — число наблюдений,  $n_l^{(s)}$ ,  $n_1^{(1)}(k)$ ,  $n_1^{(2)}(k)$ ,  $k = 1, \dots, N_a$ ,  $l = 1, \dots, L$  — независимые реализации гауссовых величин с нулевыми средними и единичными дисперсиями,  $s = s(\omega)$  —

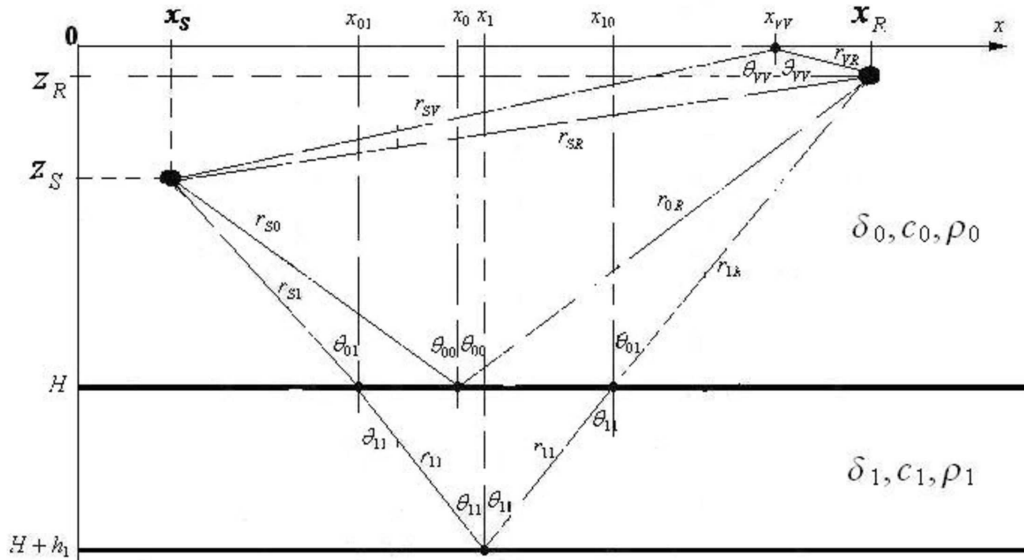


Рис. 1: Схема формирования сигнального вектора для двухслойного дна

отношение суммарных мощностей «сигнал/шум» на всей антенне,  $\mathbf{e} = \mathbf{e}(\bar{\phi})$  — сигнальный вектор, вычисляемый для истинных значений параметров дна  $\bar{\phi}$ .

## 2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБОБЩЕННЫХ ПРОЕКЦИОННЫХ ПРОЦЕССОРОВ ДЛЯ ОЦЕНОК ПАРАМЕТРОВ ДНА

Оценки параметров дна  $\phi$  строятся с помощью проекционных процессоров (CAPON, MUSIC [3] и др. [4]) по правилу  $\hat{\phi} = \arg \max_{\phi} P(\phi)$ , где  $P(\phi)$  — мощность процессора, отвечающая пробному набору параметров  $\phi$ . Мощность процессора MUSIC вычисляется по формуле  $P_{\text{MUSIC}}(\phi) = [\mathbf{e}_0^+(\phi) \hat{\Pi}_n \mathbf{e}_0(\phi)]^{-1}$ , где  $\mathbf{e}_0(\phi)$  — нормированный сигнальный вектор,  $\hat{\Pi}_n \equiv \hat{\Psi}_n \hat{\Psi}_n^+$ ,  $\hat{\Psi}_n = [\hat{\psi}_{J+1}, \dots, \hat{\psi}_N]$  — матрица, сформированная из собственных векторов корреляционной матрицы  $\hat{\Gamma}_x(\omega)$ ,  $J$  — число старших собственных значений (параметр процессора). Адаптивный процессор AMUSIC допускает контролируемое отклонение сигнального вектора от  $\mathbf{e}_0$ : отвечающий пробному вектору  $\mathbf{e}_0(\phi)$  робастный вектор

$$\mathbf{e}(\phi, \varepsilon) = \arg \min_{\mathbf{e}} \left\{ \mathbf{e}^+ \hat{\Pi}_n \mathbf{e} : \|\mathbf{e} - \mathbf{e}_0(\phi)\|^2 \leq \varepsilon, \|\mathbf{e}\|^2 = 1 \right\}.$$

Мощность адаптивного процессора определяется формулой  $P(\varepsilon, \phi) = [\mathbf{e}^+(\phi, \varepsilon) \hat{\Pi}_n \mathbf{e}(\phi, \varepsilon)]^{-1}$ . В тех случаях, когда мощность процессора зависит от некоторого контролируемого параметра  $p_k$ ,  $P = P(\varepsilon, \phi; p_k)$ , используются также обобщенные процессоры  $P_{\{p\}}$  с выходной мощностью  $P_{\{p\}}(\varepsilon, \phi, K) = \prod_{p_k \in \{p\}} P(\varepsilon, \phi; p_k)$ , где

$\{p\}$  — конечный набор из  $K$  значений контролируемого параметра.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве примера рассматривается процедура восстановления параметров дна с двумя жидкими слоями в отсутствие затухания звука в жидкости и дне (рис. 1).

В случае зондирования узкополосными сигналами (УЗ) не предполагается разделения прямого и отраженных от границ волновода сигналов, поэтому сигнальный вектор на гидрофонах приемной антенны моделируется в форме

$$e(\omega, k) = g(\omega, \mathbf{r}_R(k)) + g^{(V)}(\omega, \mathbf{r}_R(k)) + g^{(0)}(\omega, \mathbf{r}_R(k)) + g^{(1)}(\omega, \mathbf{r}_R(k)).$$

При широкополосном зондировании (ШЗ) предполагается разделение по временам прихода прямого и поверхностного импульсов с импульсами, отраженными донными слоями. Поэтому сигнальный вектор на гидрофонах приемной антенны моделируется лишь суммой сигналов, отраженных донными границами:

$$e(\omega, k) = (g^{(0)}(\omega, \mathbf{r}_R(k)) + g^{(1)}(\omega, \mathbf{r}_R(k))) g(\omega),$$

где  $g(\omega)$  — спектральная плотность излучаемого импульса.

Для апробации предложенной схемы оценивания донных параметров проведена серия численных экспериментов. В каждой из них проведено  $K_{\text{sim}}$  моделирований (по формулам (1)) случайных корреляционных матриц  $\hat{\Gamma}_x(\omega)$ , определяемых с помощью сигналов,

принятых  $K$  горизонтальными антеннами, расположенными на одной глубине и удаленными от источника на расстояния, выбираемые с постоянным шагом из диапазона  $[100, 300]$  (м); при этом каждый раз использовалось  $L = 1500$  независимых временных отсчетов сигнала. Поиск максимума выходной мощности пространственного обобщенного процессора  $P_{\{r\}}(\varepsilon, \phi, K)$  производился методом простого пошагового перебора параметров в области, содержащей их истинные значения, с последующим дроблением шагов в окрестности найденного максимума. В каждом из экспериментов первоначально (исходя из априорных данных) задавались приближенные значения параметров второго слоя  $(\rho_2^{(0)}, c_2^{(0)})$ . Затем процессор запускался для отыскания параметров первого слоя. Найденные приближенные значения  $(\rho_1^{(1)}, c_1^{(1)})$  использовались далее для определения параметров второго слоя  $(\rho_2^{(1)}, c_2^{(1)})$

при помощи того же процессора. Полученные значения параметров второго слоя использовались затем вместо изначальных  $(\rho_2^{(0)}, c_2^{(0)})$  при повторном определении параметров первого слоя  $(\rho_1^{(2)}, c_1^{(2)})$  и т. д. При каждом из  $K_{sim}$  моделирований корреляционной матрицы производилось  $K_{it}$  вышеописанных итераций для определения параметров донных слоев. Полученные в отдельных итерациях значения параметров усреднялись по совокупности всех моделирований.

Статистические моменты восстановленных параметров дна  $\delta c, \sigma_c$  м/с,  $\delta \rho, \sigma_\rho$  кг/м<sup>3</sup> в зависимости от числа итераций для различных отношений сигнал/шум при узкополосном и широкополосном зондировании представлены соответственно на рис. 2, 3. В обоих случаях использовался обобщенный пространственный процессор  $P_{\{r\}}(10^{-6}, \phi, 3)$  с антеннами, удаленными на 100, 150 и 200 м.

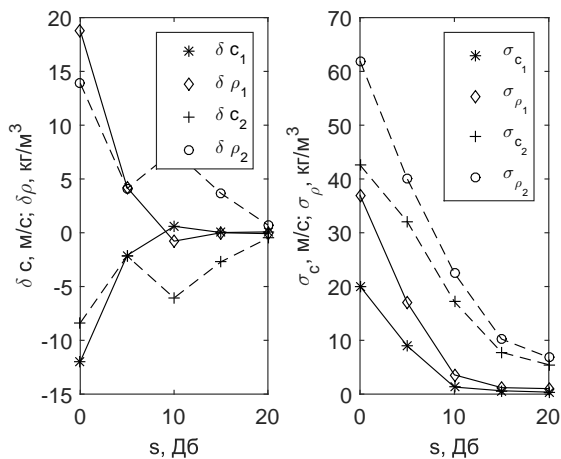


Рис. 2: Узкополосное зондирование: частота 500 Гц,  $s = 10$  дБ,  $K_{sim} = 20$

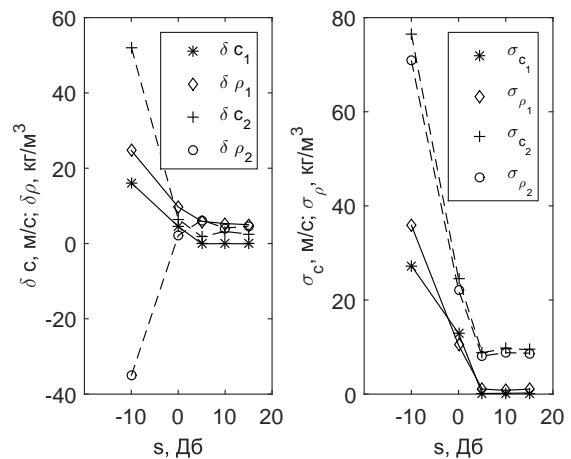


Рис. 3: Широкополосное зондирование: частота 1000 Гц,  $s = 1$  дБ,  $K_{sim} = 25$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тестирование итерационного алгоритма оценивания параметров слоистого дна показывает, что он сходится с высокой вероятностью. Скорость сходимости зависит, однако, от оцениваемого параметра и начальных приближений для параметров второго слоя. Финальные оценки, к которым сходятся итерационные процессы, случайны и зависят от реализаций экспериментальных матриц. Дисперсии восстановленных параметров слабо зависят от номера итераций при заданном отношении сигнал/шум. Средние значения параметров по со-

вокупности реализаций случайных матриц сходятся по мере роста итераций. Отклонения их от истинных значений параметров зависят от отношения сигнал/шум, начальных приближений и числа итераций. Точность определения параметров последующего слоя зависит от точности определения параметров предыдущего слоя и в общем случае понижается с ростом номера слоя. Поэтому при заданном уровне шумов и заданной мощности источника начиная с некоторых глубин оценивание донных параметров становится практически невозможным.

- 
- [1] Лазарев В. А., Малеханов А. И., Мерклин Л. Р., Романова В. И., Стромков А. А., Таланов В. И., Хилько А. И. Акуст. журн. 2012. **58**, № 2. С. 227.
- [2] Лазарев В. А., Малеханов А. И., Мерклин Л. Р., Романова В. И., Таланов В. И., Хилько А. И. Океанология. 2013. **53**, № 6. С. 843.
- [3] Schmidt R. O. IEEE Trans. on Antennas and Prop. 1986. **34**, N 3. P. 276.
- [4] Сазонтов А. Г., Смирнов И. П., Матвеев А. С. Акуст. журн. 2015. **61**, № 1. С. 114.

---

## Optimization of the inverse problem algorithms of reconstructing geo acoustic parameters of bottom layers by coherent sounding

V. I. Kalinina<sup>a</sup>, I. P. Smirnov<sup>b</sup>, A. I. Khilko<sup>c</sup>

Federal research center Institute of Applied Physics. Nizhny Novgorod, 603950 Russia.

E-mail: <sup>a</sup>kalinina@ipfran.ru, <sup>b</sup>smip@ipfran.ru, <sup>c</sup>a.khil@ipfran.ru

Methods and algorithms of lay-by-lay reconstruction of geo acoustic parameters of bottom layers with use of parametrical models of formation of the signals reflected from layered semi space at coherent sounding of a bottom of a sea shelf are analyzed. The method of reconstruction, allowing to carryout effective search of the decision in multiple parameter space is offered at restriction of the aprioristic data. By methods of stochastic modeling it is investigated robust algorithms of reconstruction.

PACS: 43.30.+m.

*Keywords:* sea-bottom, seism acoustic sounding, the reconstruction of geo acoustic parameters, regularization, robustness.

*Received 05 July 2017.*

### Сведения об авторах

1. Калинина Вера Игоревна — науч. сотрудник; тел.: (831) 416-06-29, e-mail: kalinina@ipfran.ru.
  2. Смирнов Иван Паисьевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, доцент; тел.: (831) 416-06-29, e-mail: smip@ipfran.ru.
  3. Хилько Александр Иванович — доктор физ.-мат. наук, зав. лабораторией; e-mail: a.khil@ipfran.ru.
-