

УДК 534.2

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОРСКОГО ДНА МЕТОДОМ СОГЛАСОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ УГЛОВЫХ СПЕКТРОВ

*Б. В. Кержаков, В. В. Кулинич**

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Метод согласования полей используется для решения обратной задачи оценки геоакустических параметров слоистого океанического дна с применением целевой функции, основанной на норме разности экспериментального и модельного вертикальных угловых спектров акустического поля и комбинации метода быстрого отжига с прямыми методами поиска для локализации глобального минимума целевой функции. Для уменьшения влияния эффектов овражности целевой функции используется регуляризация на основе взаимной корреляции экспериментального и модельного вертикальных угловых спектров акустического поля. Выполнен численный эксперимент по восстановлению параметров модельного волновода, таких как толщина водного слоя и слоя осадков, скорость и коэффициенты затухания продольных волн, плотности осадочного слоя и подстилающего полупространства при наличии шумовых помех различного уровня.

ВВЕДЕНИЕ

Распространяющиеся в океане акустические сигналы содержат информацию о свойствах и характеристиках среды на проходимой ими трассе. Эта информация имеет существенное значение для решения не только прямых, но и обратных задач акустики океана, а именно оценки различных характеристик канала распространения. При решении широкого круга обратных задач акустики океана можно выделить имеющее большой практический интерес направление, связанное с исследованием и реконструкцией геоакустических характеристик морского дна. Дело в том, что влияние дна и донных осадков на формирование акустического поля во многих случаях является доминирующим фактором.

Основой решения обратных задач реконструкции параметров дна являются экспериментальные результаты измерений акустического поля в исследуемом районе, которые непосредственно либо после некоторой обработки используются как входные данные в обратной задаче. Необходимы также эффективные методы, решения волнового уравнения для акустических полей с граничными условиями, соответствующими принятой исходной модели дна, с последующим нахождением параметров модели, которые обеспечивают лучшее соответствие с экспериментальными данными. Сравнение характеристик экспериментально регистрируемого поля или результатов его обработки с результатами соответствующих расчётов реализуется с использованием целевых функций, определяющих алгоритм сравнения. Целевые функции строятся различными способами, например на основе взаимной корреляции между наблюдаемым и модельными полями либо нормы, определяющей отклонение этих полей. Сложность задачи реконструкции связана со сложной структурой дна и большим числом геоакустических параметров, определяющих его свойства, таких как слоистость, мощность и плотность слоёв, скорости и коэффициенты затухания продольных и поперечных волн. При реконструкции параметров широко используется метод согласования полей, который основан на минимизации соответствующего функционала (целевой функции) [1–6].

* kul@hydro.appl.sci-nnov.ru

В общем случае целевая функция, с помощью которой решается задача реконструкции параметров, является, как правило, функцией овражного типа: она обладает множеством локальных минимумов и точкой глобального минимума, соответствующей действительным значениям восстанавливаемых параметров. Для нахождения глобального минимума целевой функции применяются поисковые алгоритмы, позволяющие находить глобальные экстремумы функций многих переменных и широко используемые при решении различных оптимизационных задач. В этих алгоритмах, как правило, используется случайный выбор всех восстанавливаемых параметров при построении минимизирующей последовательности значений целевой функции.

В настоящей работе методами численного моделирования решается задача восстановления геоакустических параметров волновода, состоящего из водного слоя, слоя осадков и подстилающего полупространства. При этом используется целевая функция, построенная с использованием угловых спектров акустического поля в вертикальной плоскости (вертикальных угловых спектров) и регуляризованная (для уменьшения её овражности) в условиях воздействия помех различного уровня.

1. ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ

В работе для решения обратной задачи нахождения акустических параметров звукового канала, в том числе геоакустических характеристик морского дна, используется целевая функция, строящаяся на основе вертикальных угловых спектров акустического поля. Угловые спектры определяются пространственным преобразованием Фурье экспериментального $P^E(z_j, r, \bar{\mathbf{m}})$ и модельного $P^T(z_j, r, \mathbf{m})$ акустических полей давления источника излучения на апертуре вертикальной линейной приёмной антенны:

$$S^T(\theta, r, \mathbf{m}) = \sum_j \exp(ikz_j \sin \theta) P^T(z_j, r, \mathbf{m}), \quad S^E(\theta, r, \bar{\mathbf{m}}) = \sum_j \exp(ikz_j \sin \theta) P^E(z_j, r, \bar{\mathbf{m}}),$$

где z_j — глубины приёмников, $j = 1, 2, \dots, N$, N — число приёмных элементов антенны, \mathbf{m} — вектор определяемых параметров, $\bar{\mathbf{m}}$ — вектор истинных значений параметров, r — горизонтальное расстояние между источником и приёмной антенной, k — волновое число, θ — угол скольжения (т. е. угол между волновым вектором и горизонталью), изменяющийся в пределах $-90^\circ \div 90^\circ$.

Когда координаты источника точно неизвестны, его положение, в частности глубину и расстояние до приёмной антенны, можно включить в вектор реконструируемых параметров \mathbf{m} , которые затем определяются при решении обратной задачи.

Вертикальный угловой спектр акустического поля характеризует распределение энергии сигналов, приходящих с различных направлений. Малые углы скольжения θ соответствуют пологим лучам, т. е. старшим волноводным модам, которые либо слабо, либо совсем не взаимодействуют с дном и поэтому являются малоинформативными с точки зрения решения задач акустической томографии дна и донных осадков. Однако можно выделить такие участки вертикальных угловых спектров, которые отвечают «крутым» лучам, т. е. группе волноводных мод с высокими номерами, взаимодействующих с дном и несущих информацию о его акустических параметрах, а также подавить (отфильтровать) сигналы, обусловленные старшими волноводными модами, не взаимодействующими или слабо взаимодействующими с дном и являющимися помехой при решении указанных задач. Исключение волноводных мод, не взаимодействующих с дном, позволяет увеличить чувствительность целевой функции к вариациям параметров донных осадков. Необходимые значения углов могут быть определены на основе анализа экспериментальных вертикальных угловых спектров импульсного сигнала [7].

Целевая функция при решении обратной задачи строится на основе нормы разности экспериментальной и модельной функций углового спектра. Для уменьшения эффекта овражности обычно используют различные приёмы регуляризации. В нашем случае для этого эффекта вычисляется коэффициент корреляции экспериментальных и модельных вертикальных угловых спектров сигналов. Регуляризация осуществляется за счёт уменьшения коэффициента корреляции при рас-согласовании параметров модельного океанического волновода с параметрами диагностируемого волновода. При этом целевая функция имеет вид

$$J(\mathbf{m}) = \frac{\sum_i |S^E(\theta_i, r, \bar{\mathbf{m}}) - S^T(\theta_i, r, \mathbf{m})|^2}{\sum_i |S^E(\theta_i, r, \bar{\mathbf{m}})|^2 |R_c(\mathbf{m})|}, \quad (1)$$

где

$$R_c(\mathbf{m}) = \frac{\sum_i \{S^E(\theta_i, r, \bar{\mathbf{m}}) [S^T(\theta_i, r, \mathbf{m})]^*\}}{\sqrt{\sum_i |S^E(\theta_i, r, \bar{\mathbf{m}})|^2} \sqrt{\sum_i |S^T(\theta_i, r, \mathbf{m})|^2}},$$

индекс * означает комплексное сопряжение, $\{\theta_i\}$ — дискретные значения угла скольжения.

2. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для решения задачи минимизации функционала (1) применялся метод быстрого отжига [8] в сочетании с методом прямого поиска (generalized pattern search, GPS) [9], в котором использовалось адаптивное построение сетки около текущей точки совокупности восстанавливаемых параметров, найденной на предыдущем шаге алгоритма. Это приводило к уходу от точки локального минимума в методе быстрого отжига при стремлении температуры к нулю. При достижении функционалом (1) некоторого заданного значения (в нашем случае 30 %) дальнейшее уточнение восстанавливаемых параметров, при которых достигается глобальный минимум, проводилось методом Нелдера—Мида [10].

Для расчёта акустического поля в волноводах со слоистым поглощающим дном была разработана модовая программа, тестирование которой проводилось при помощи широко известной программы KRAKEN [11].

В качестве экспериментального сигнала использовалось акустическое поле на частоте 100 Гц, смоделированное для волновода, который состоит из слоя воды с толщиной $H = 150$ м с постоянной скоростью звука 1 500 м/с, слоя осадков с толщиной $h = 20$ м со скоростью продольных волн $C_p = 1 700$ м/с, плотностью $\rho = 1,4$ г/см³, коэффициентом затухания $\beta = 0,05$ дБ/(км · Гц) и подстилающего полупространства со скоростью продольных волн $C_{p1} = 2 500$ м/с, плотностью $\rho_1 = 2,3$ г/см³ и коэффициентом затухания $\beta_1 = 0,1$ дБ/(км · Гц). Схема эксперимента показана на рис. 1.

Для исследования влияния шумов на эффективность восстановления параметров дна к экспериментальному акустическому полю сигнала на элементах приёмной антенны добавлялись пространственно-некоррелированные шумы, которые генерировались с использованием датчика случайных чисел с нормальным распределением и среднеквадратичным отклонением, определяемым заданным усреднённым по апертуре отношением сигнал/шум.

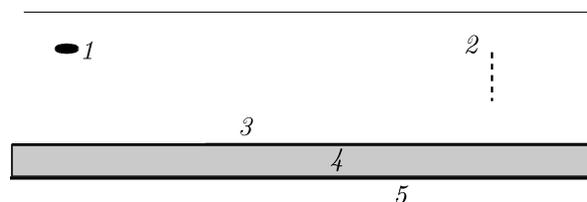


Рис. 1. Схема проведения эксперимента: 1 — источник, 2 — приёмная антенна, 3 — водный слой, 4 — слой осадков, 5 — подстилающее полупространство

В качестве источника использовался одиночный ненаправленный излучатель с фиксированной глубиной расположения 15 м. Приём осуществлялся вертикальной антенной, состоящей из 18 элементов, которые располагались на глубине $10 \div 137$ м с межэлементным расстоянием 7,5 м. При решении обратной задачи все указанные выше параметры волновода — толщины водного слоя и слоя осадков, скорости распространения продольных волн в слое и подстилающем полупространстве, плотности, коэффициенты затухания — являются параметрами, подлежащими восстановлению. При этом число осадочных слоёв, а также пространственное положение источника излучения и приёмной антенны предполагались известными. Априори известными считались и диапазоны изменения восстанавливаемых параметров волновода.

В условиях модельного эксперимента при построении целевой функции использовались данные об акустическом поле для нескольких расстояний между источником излучения и приёмной антенной, составлявших 1; 2; 3; 4 и 5 км. При этом в выражении (1) для целевой функции суммировать необходимо и по расстоянию.

На рис. 2 и 3 приведены графики зависимости восстанавливаемых параметров волновода, получаемых на основе построения минимизирующей последовательности, от номера итерации n на дистанции 5 км при соотношении сигнал/шум 30 и 40 дБ соответственно. Здесь каждая из итераций, как отмечалось выше, соответствует совокупности восстанавливаемых параметров, приводящих к уменьшению целевой функции. Окончание процедуры восстановления соответствует достижению целевой функцией наперёд заданного порогового значения. В рассматриваемом случае величина порога соответствует 0,5 %.

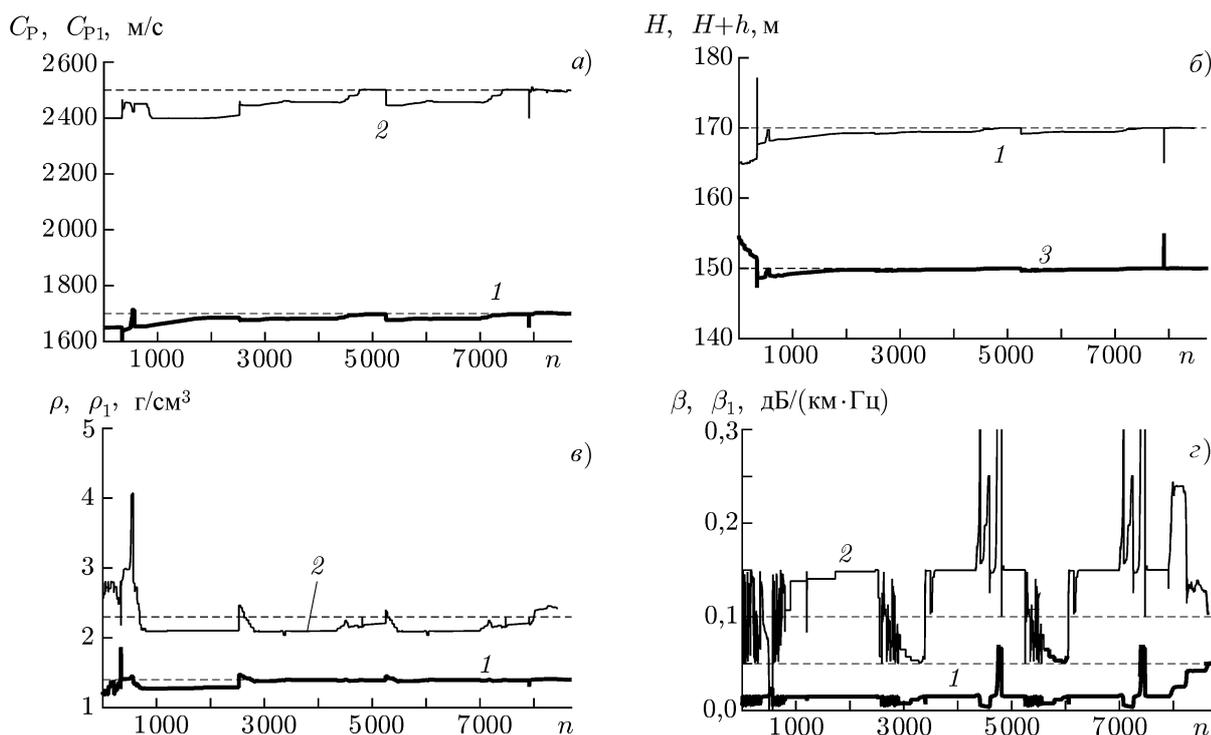


Рис. 2. Зависимости значений восстанавливаемых параметров: скоростей продольных волн C_p , C_{p1} (а), толщины водного слоя H и глубины нижней границы слоя осадков $H + h$ (б), плотности ρ слоя осадков и плотности ρ_1 подстилающего пространства (в), коэффициентов затухания β , β_1 (г) от числа итераций n в слое осадков (линии 1) и подстилающем полупространстве (2). Соотношение сигнал/шум равно 30 дБ, учитываются все возбуждаемые волноводные моды. Штриховые линии соответствуют истинным значениям параметров, линия 3 на панели б — глубине нижней границы слоя осадков $H + h$

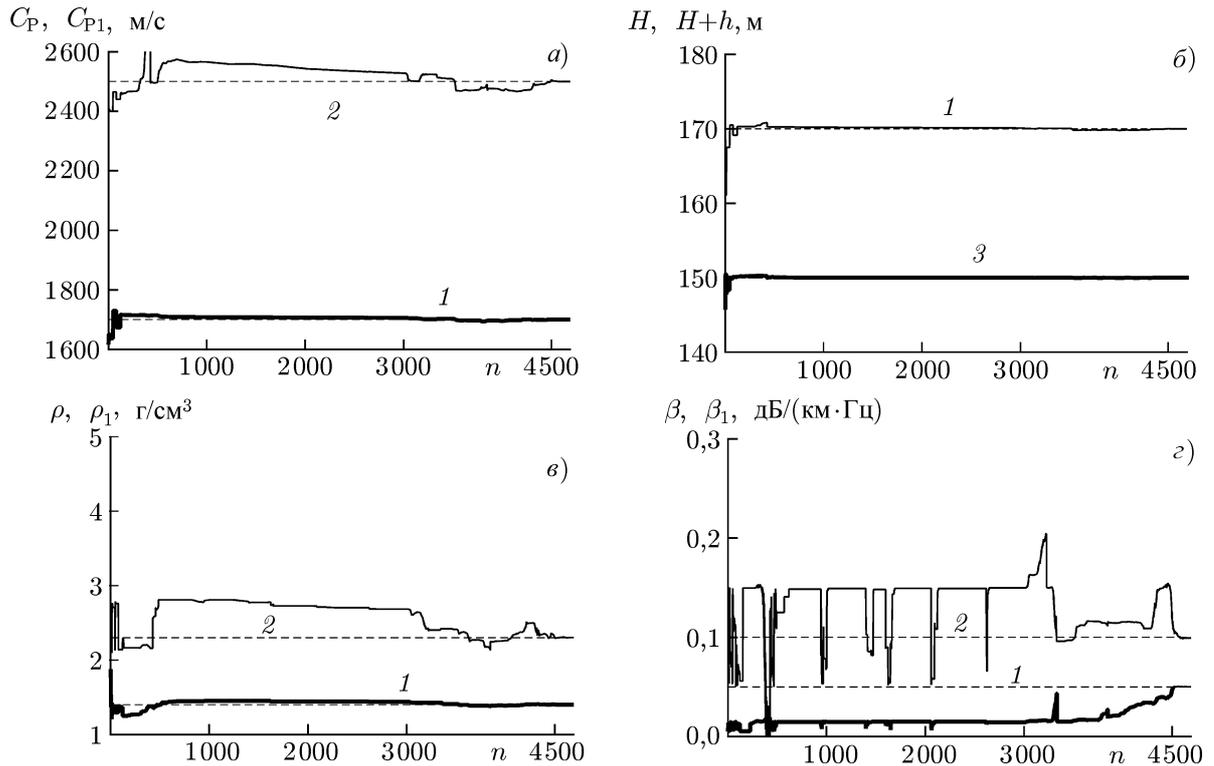


Рис. 3. Зависимости значений восстанавливаемых параметров от числа итераций n при соотношении сигнал/шум 40 дБ с учётом всех возбуждаемых волноводных мод. Обозначения соответствуют рис. 2

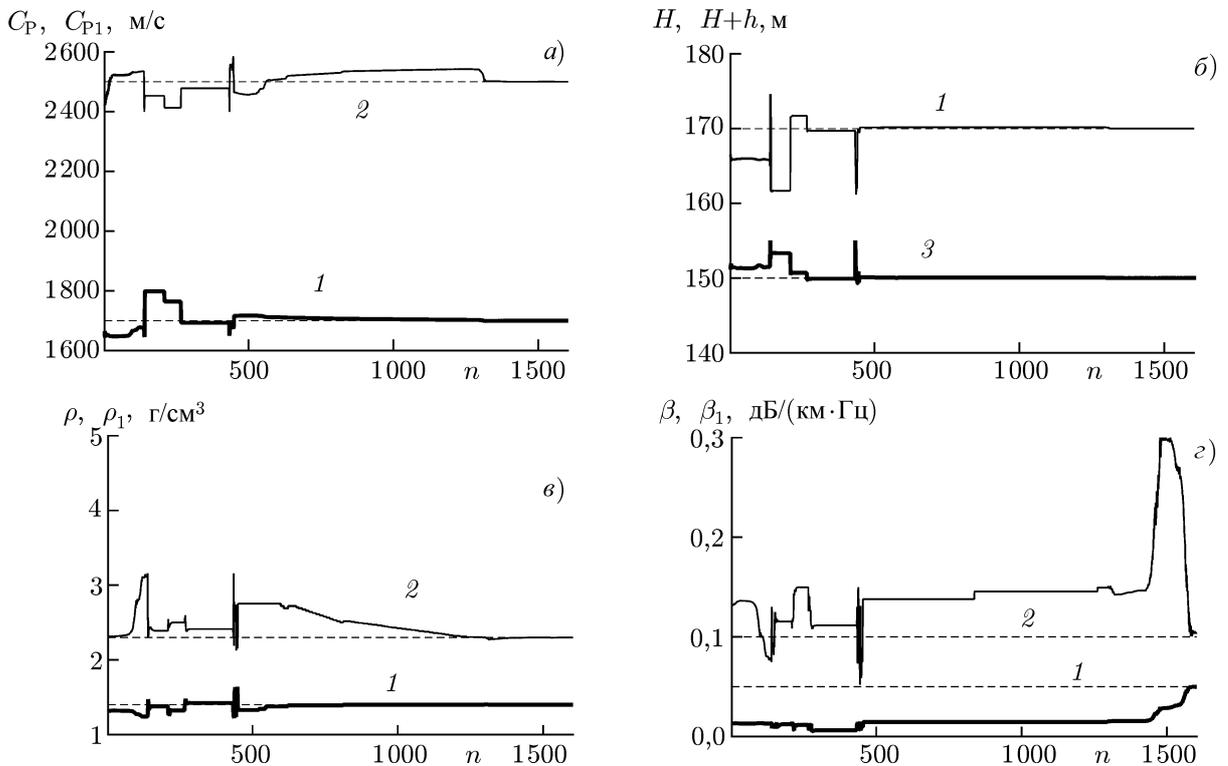


Рис. 4. Зависимости значений восстанавливаемых параметров от числа итерации n в отсутствие шума с учётом всех возбуждаемых волноводных мод. Обозначения соответствуют рис. 2

Таблица 1

Отношение сигнал / шум, дБ	C_p , м/с	C_{p1} , м/с	H , м	$H + h$, м	ρ , г/см ³	ρ_1 , г/см ³	β , дБ/(км·Гц)	β_1 , дБ/(км·Гц)
40	1 699,9	2 500,0	149,99	169,99	1,399	2,300	0,0501	0,1000
30	1 699,9	2 499,6	149,90	169,90	1,401	2,302	0,0502	0,0993

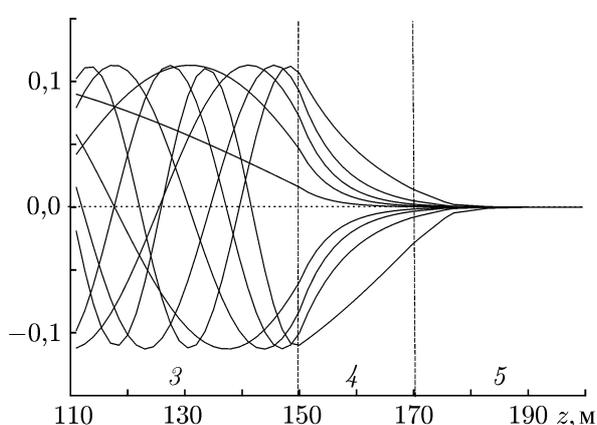


Рис. 5. Структура полей мод с номерами 1÷9. Обозначения слоёв соответствуют рис. 1

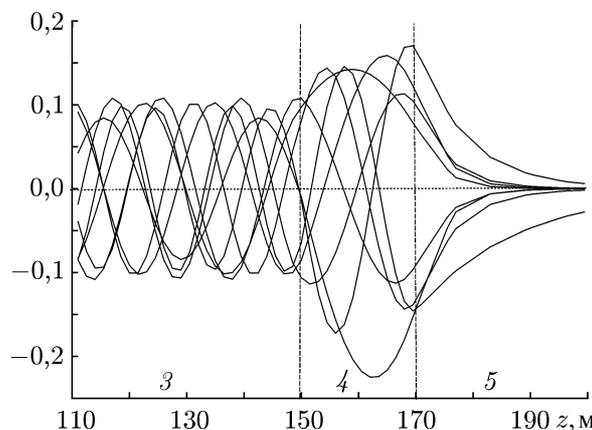


Рис. 6. Структура полей мод с номерами 10÷17. Обозначения слоёв соответствуют рис. 1

Из рис. 2 и 3 видно, что в первую очередь (при увеличении числа итераций) устанавливаются значения толщины водного слоя, затем параметры слоя осадков. Целевая функция наименее чувствительна к параметрам подстилающего полупространства. Для соотношения сигнал/шум 30 дБ при достижении целевой функцией значения 0,5 % число итераций в минимизирующей последовательности достигает 9 000 (рис. 2). При увеличении уровня сигнал/шум до 40 дБ для достижения целевой функцией 0,5 % число требуемых итераций в минимизирующей последовательности падает до 4 000. При отсутствии шумов требуемое число итераций падает до 1 500 (рис. 4).

Результаты восстановления параметров волновода для различных отношений сигнал/шум при достижении целевой функцией 0,5% представлены в табл. 1.

Следует отметить стабильность оценок и точность определения восстанавливаемых параметров дна при изменении отношения сигнал/шум при фиксированном пороге для целевой функции. При этом, однако, с уменьшением отношения сигнал/шум увеличивается число итераций.

Приведённые выше данные соответствуют целевой функции, в которой учитывается весь угловой спектр поля, охватывающий углы в пределах $-90^\circ \div 90^\circ$, т. е. все возбуждаемые в волноводе моды. Как отмечалось выше, для повышения чувствительности целевой функции к изменению параметров дна целесообразно отфильтровать моды, слабо взаимодействующие с дном, или ограничиться диапазоном углов скольжения $|\theta| > \theta_0 = \arccos(k_m/k) = 30^\circ$, где k_m — собственное значение моды с номером $m = 9$, которые соответствуют модам, хорошо взаимодействующим с дном. В исследуемом волноводе при используемой в моделировании частоте излучения 100 Гц возбуждаются 17 волноводных мод.

На рис. 5 и 6 представлены графики зависимости полей этих мод от глубины, характеризующие степень их взаимодействия с дном. На рис. 5 представлены старшие моды с номерами 1–9, а на рис. 6 — остальные моды с номерами 10–17. Граничный угол θ_0 разделения указанных групп мод соответствует углу скольжения бриллюэновских волн θ_0 . Из рисунков следует, что вклад первых девяти мод при оценке параметров дна существенно меньше вклада остальной

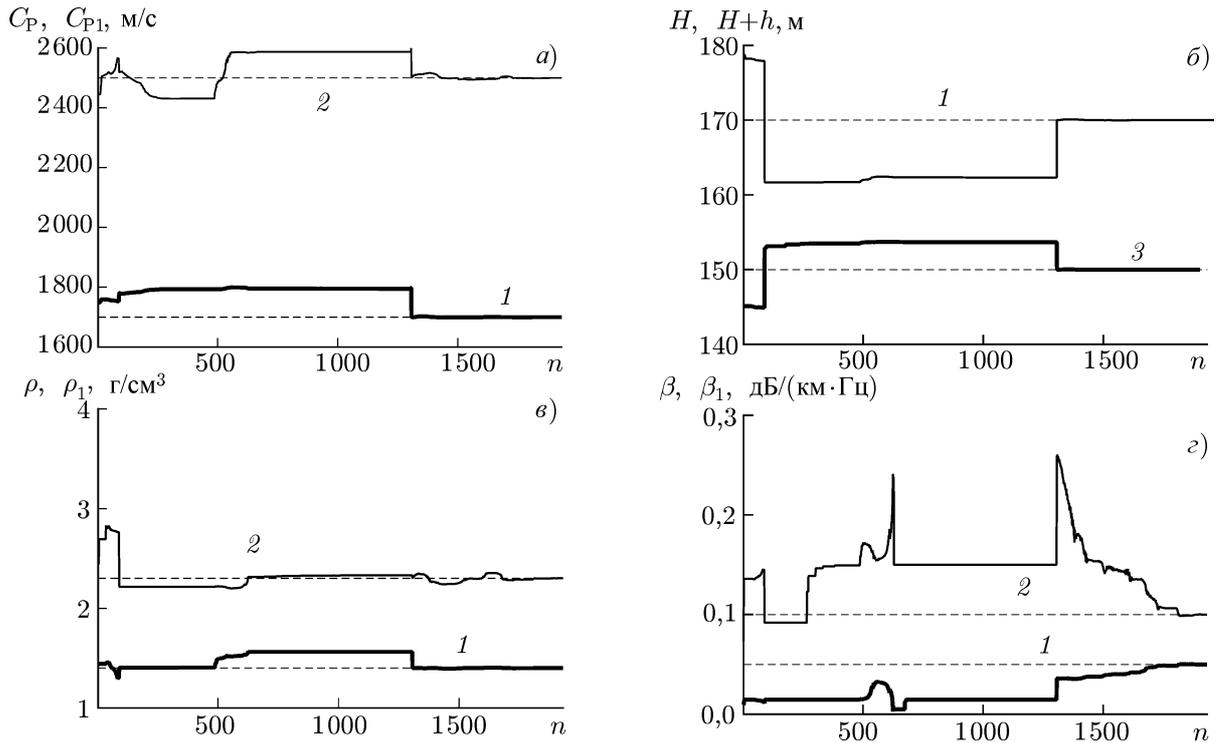


Рис. 7. Зависимости значений восстанавливаемых параметров волновода от числа итерации n в отсутствие шума с исключением первых девяти мод волновода. Обозначения соответствуют рис. 2

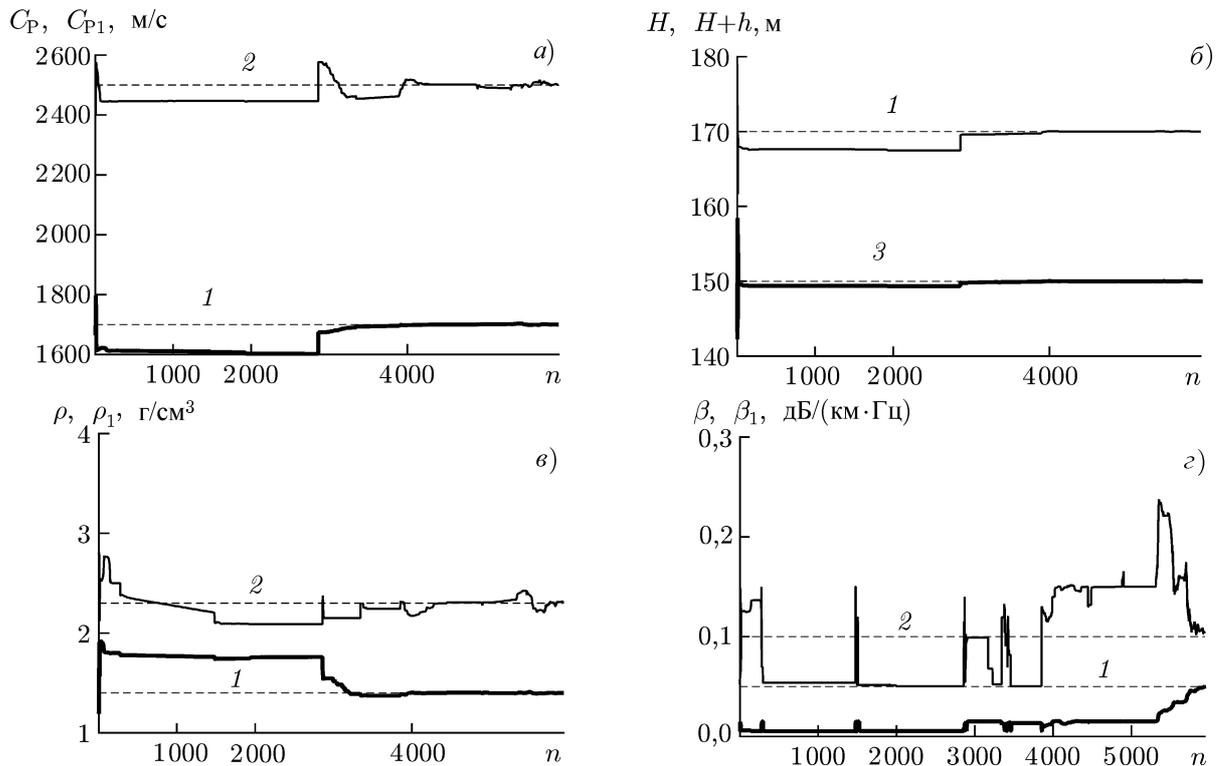


Рис. 8. Зависимости значений восстанавливаемых параметров волновода от числа итерации n при соотношении сигнал/шум 30 дБ с исключением первых девяти мод волновода. Обозначения соответствуют рис. 2

группы мод с более высокими номерами. В большей степени это относится к подстилающему полупространству, куда первая группа мод практически не проникает и где, следовательно, результаты восстановления целиком определяются выделенными модами с высокими номерами. В этом случае при больших отношениях сигнал/шум исключение первой группы мод слабо влияет на результаты поиска восстанавливаемых параметров.

На рис. 7 приведены графики зависимости восстанавливаемых параметров волновода от номера итерации минимизирующей последовательности в отсутствие воздействия шумов. Как видно из сравнения графиков на рис. 7 с аналогичными графиками на рис. 4, где учитываются все возбуждаемые моды волновода, числа итераций, необходимых для достижения целевой функцией значения 0,5 %, практически совпадают. В то же время при наличии шумов исключение группы мод, слабо взаимодействующих с дном, приводит к уменьшению необходимого для достижения заданного уровня целевой функции числа итераций по сравнению с ситуацией, когда учитываются все возбуждаемые в волноводе моды.

На рис. 8 представлены графики зависимости восстанавливаемых параметров волновода от числа итераций для отношения сигнал/шум 30 дБ при исключении первой группы мод. Как следует из этих графиков, число итераций, необходимых для достижения уровня целевой функции в 0,5 %, составляет около 6 000, в то время как сохранение всех мод при восстановлении параметров волновода приводит к увеличению требуемого числа итераций до 9 000 (рис. 2).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для восстановления параметров волновода, в том числе геоакустических характеристик дна, в работе используется метод согласования полей. Соответствующая целевая функция построена с использованием нормы разностей экспериментального и модельного вертикальных угловых спектров акустического поля волновода. Для уменьшения влияния эффектов овражности целевой функции предлагается применять регуляризацию, основанную на использовании коэффициента корреляции экспериментального и модельного вертикальных угловых спектров. Для поиска глобального минимума целевой функции, соответствующего истинным значениям восстанавливаемых параметров, применяется гибридный алгоритм, представляющий собой комбинацию метода быстрого отжига с методами прямого поиска GPS и Нелдера—Мида. Выполнен численный эксперимент по восстановлению параметров модели волновода, состоящего из водного слоя, слоя осадков и подстилающего полупространства. Восстанавливаемыми параметрами считались толщины водного слоя и слоя осадков, скорости продольных волн, коэффициенты их затухания и плотности в слое осадков и подстилающем полупространстве. Все остальные параметры, необходимые для расчёта акустического поля, в том числе распределение скорости звука по глубине водного слоя, глубины и расстояние между источником и приёмной антенной, считались известными. Эксперимент проводился на частоте излучения 100 Гц для различных отношений сигнал/шум. Окончание процедуры поиска определялось достижением целевой функцией заданного порогового значения. Показано, что при восстановлении параметров дна в условиях воздействия шумов эффективно использование ограничения диапазона углов вертикального углового спектра углами скольжения, соответствующих крутым лучам, или модам с высокими номерами, которые интенсивно взаимодействуют с дном. Это приводит к увеличению чувствительности целевой функции к изменению параметров дна и существенному снижению числа итераций, необходимых для достижения его установленного значения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Collins M. D., Kuperman W. A. // *Inverse Problems*. 1994. V. 10, No. 5. P. 1023.
2. Taroudakis M. I., Markaki M. G. // *J. Computational Acoustics*. 1998. V. 6, No. 1–2. P. 167.
3. Fillat M. R., Dosso S. E. // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1999. V. 105, No. 6. P. 3219.
4. Белов А. И., Кузнецов Г. Н. // *Акуст. журн.* 2014. Т. 60, № 2. С. 190.
5. Crocker S. E., Nielsen P. L., Miller J. H., Siderius M. // *J. Acoust. Soc. Amer.* 2014. V. 136. P. 362.
6. Zeng J., Chapman N. R., Bonnel J. // *J. Acoust. Soc. Amer.* 2013. V. 134. P. 394.
7. Заславский Ю. М., Кержаков Б. В., Кулинич В. В. // *Акуст. журн.* 2007. Т. 53, № 2. С. 264.
8. Szu H. H., Hartley R. L. // *Phys. Lett. A*. 1997. V. 122. P. 157.
9. Lewis R. M., Torczon V. // *SIAM J. Optimization*. 1999. V. 9. P. 1082.
10. Nelder J. A., Mead R. // *Computer J.* 1965. V. 7. P. 308.
11. Porter M. B. The KRAKEN normal mode program. SACLANT Memorandum SM-245. USA, La Spezia, 1991. 194 p.

Поступила в редакцию 11 марта 2015 г.; принята в печать 14 января 2016 г.

RESTORATION OF SEA-BED PARAMETERS BY THE METHOD OF MATCHING ACOUSTIC FIELDS ON THE BASIS OF VERTICAL ANGULAR SPECTRA

B. V. Kerzhakov and V. V. Kulnich

We use the field matching method to solve the inverse problem of estimating the geoacoustic parameters of a stratified sea-bed using the objective function based on the norm of difference between the experimental and simulated vertical angular spectra of the acoustic field and combination of the rapid-annealing method with direct search methods for localization of the global minimum of the objective function. To reduce the influence of the ravine effects of the objective function, we use regularization on the basis of mutual correlations of the experimental and simulated vertical angular spectra of the acoustic field. The numerical experiment has been performed to restore the parameters of the model waveguide, e.g., the thickness of the water layer and the layer of sediments, the velocity and attenuation coefficients of longitudinal waves, and the density of the sediment layer and the subjacent half-space in the presence of noise interference of different intensity levels.