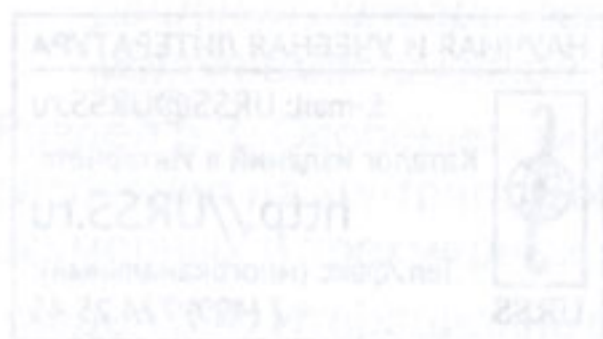


В. А. Буров, О. Д. Румянцева

# ОБРАТНЫЕ ВОЛНОВЫЕ ЗАДАЧИ АКУСТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

Часть 2

## Обратные задачи акустического рассеяния



URSS  
МОСКВА



ББК 22.32

УДК 534.2 534.7 519.6 519.24

**Буров Валентин Андреевич,  
Румянцева Ольга Дмитриевна**

**Обратные волновые задачи акустической томографии. Ч. 2: Обратные задачи акустического рассеяния.** — М.: ЛЕНАНД, 2020. — 768 с.

В книге рассматриваются обратные волновые задачи и их прикладные аспекты, связанные с линейной и нелинейной акустической томографией, а также с акустической термотомографией. Подытоживаются основные результаты исследований, выполненных в лаборатории обратных задач на кафедре акустики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова в течение нескольких последних десятилетий. Книга разделена на четыре части, в определенной мере взаимосвязанные между собой. В каждой из частей излагаются теоретические аспекты проблемы, а также обсуждаются перспективы прикладного применения.

Часть 2 посвящена обратным задачам акустического рассеяния, как в приближении однократного рассеяния, так и с учетом перерассеяний. Помимо общей теории, затрагиваются вопросы единственности и устойчивости решения обратной задачи рассеяния. Большое внимание уделяется обсуждению прикладных возможностей акустических томографических систем, разработанных в последние годы.

*Исследования поддержаны Российским научным фондом (проект № 14-22-00042)*

Российская академия наук  
БИБЛИОТЕКА  
НАУЧНОГО ЦЕНТРА  
в Черноголовке

Формат 60x90/16. Печ. л. 48. Зак. № АП-5826.

Отпечатано в ООО «ЛЕНАНД».

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 11А, стр. 11.

ISBN 978-5-9710-6419-0

© В. А. Буров, О. Д. Румянцева, 2019

© ЛЕНАНД, 2019

23543 ID 248653



9 785971 064190

НАУЧНАЯ И УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА	
	E-mail: URSS@URSS.ru
	Каталог изданий в Интернете: <a href="http://URSS.ru">http://URSS.ru</a>
	Тел./факс (многоканальный): + 7 (499) 724 25 45
	URSS

Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельцев.



# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	10
Список основных обозначений и символов .....	18
<b>ЧАСТЬ II. ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ АКУСТИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ .....</b>	<b>25</b>
Глава 5. Акустическая томография как обратная задача когерентного рассеяния.....	28
Раздел 5.1. Обратная задача рассеяния в общей постановке .....	28
Раздел 5.2. Акустическая томография на основе линеаризованного волнового описания процесса рассеяния .....	96
§ 5.2.1. Монохроматический режим зондирования плоскими волнами. Пространственная дискретизация и фильтрация в процессе реконструкции.....	100
§ 5.2.2. Зондирование плоскими импульсными волновыми пакетами .....	112
§ 5.2.3. Импульсный режим зондирования в ближнем поле.....	128
§ 5.2.4. Поправки в случае неборновского рассеивателя.....	142
§ 5.2.5. Численное моделирование решения линеаризованной монохроматической обратной задачи .....	149
Раздел 5.3. Особенности расчета прямой задачи рассеяния на контрастных и сильно поглощающих двумерных и трехмерных неоднородностях.....	156
Раздел 5.4. Итерационные методы решения обратных задач рассеяния.....	204
§ 5.4.1. Двухшаговый алгоритм .....	207
5.4.1.1. Описание алгоритма.....	213



5.4.1.2. Модельная иллюстрация работоспособности двухшагового алгоритма.....	232
§ 5.4.2. Многошаговые итерационные процедуры.....	262
5.4.2.1. Одноэтапный "наивный" алгоритм.....	264
5.4.2.2. Двухэтапные итерационные схемы.....	268
5.4.2.3. Одноэтапные и двухэтапные итерационные схемы в <b>K</b> -пространстве.....	275
5.4.2.4. Связь двухэтапных и одноэтапных схем с градиентно-итерационными методами.....	283
А) Двухэтапные схемы.....	283
Б) Одноэтапные схемы.....	292
5.4.2.5. Метод постепенного "включения" рассеянного поля.....	309
§ 5.4.3. Статистические оценки в обратных задачах рассеяния.....	315
5.4.3.1. Оценка характеристик рассеивателя в координатном представлении методом максимальной апостериорной вероятности.....	318
5.4.3.2. Оценка пространственно-спектральных характеристик рассеивателя ( <b>K</b> -представление).....	330
5.4.3.3. Численная модель реконструкции рассеивателей.....	370
<b>Глава 6. Единственность и устойчивость решения обратной задачи акустического рассеяния.....</b>	<b>388</b>
Раздел 6.1. Функциональное описание рассеивателя и описание в виде совокупности точечных рассеивателей. Расширение пространственного спектра вторичных источников.....	393
Раздел 6.2. Возможность неединственного восстановления сильных рассеивателей. Условия единственности и устойчивости восстановления.....	401
Раздел 6.3. Восстановление сильного рассеивателя как совокупности точечных рассеивателей.....	420
§ 6.3.1. Безызбыточный набор данных рассеяния.....	420
§ 6.3.2. Роль избыточности. Аномальные ошибки.....	423

Раздел 6.4. Обратная задача рассеяния для пространственно-распределенных рассеивателей.....	429
§ 6.4.1. Двумерная обратная задача рассеяния.....	434
§ 6.4.2. Трехмерная обратная задача рассеяния.....	439
Раздел 6.5. Статистическая оценка пространственного спектра вторичных источников.....	442
§ 6.5.1. Статистический подход к оценке.....	444
§ 6.5.2. Оценка взвешенным суммированием детерминированных решений.....	469
§ 6.5.3. Определяющее влияние контраста скорости на ширину пространственного спектра вторичных источников.....	477
<b>Глава 7. Перспективы развития методов томографирования линейных акустических параметров среды.....</b>	<b>482</b>
Раздел 7.1. Состояние акустических томографических систем (разработки последних лет).....	482
Раздел 7.2. Повышение разрешения в направлении, перпендикулярном плоскости двумерного томографирования.....	495
§ 7.2.1. Квазитрехмерные ( $2\frac{1}{2}$ -мерные) схемы томографирования с наклонными преобразователями.....	498
7.2.1.1. Схемы с совмещенными приемопередатчиками.....	507
7.2.1.2. Схемы с разделенными группами приемных и излучающих преобразователей.....	510
§ 7.2.2. Восстановление трехмерного борновского рассеивателя при неполных данных.....	512
Раздел 7.3. Раздельное восстановление упругих и вязких характеристик рассеивателя при неполных данных.....	519
§ 7.3.1. Разделение рассеивающих компонент в многочастотном или импульсном режимах в условиях неточно известной частотной зависимости коэффициента поглощения.....	523



7.3.1.1. Моделирование алгоритма разделения рассеивающих компонент в трехчастотном режиме при известной частотной зависимости коэффициента поглощения .....	530
7.3.1.2. Выделение плотностной компоненты рассеивателя .....	538
7.3.1.3. Влияние отклонения частотной зависимости коэффициента поглощения от предполагаемой .....	542
§ 7.3.2. Выделение истинных оценок скорости звука и коэффициента поглощения. Определение неизвестной частотной зависимости коэффициента поглощения .....	550
7.3.2.1. Итерационные схемы для $c$ - и $\alpha$ -компонент .....	551
7.3.2.2. Итерационный МНК-алгоритм совместного оценивания рассеивающих компонент и степени частотной зависимости .....	555
Раздел 7.4. Восстановление пространственного распределения вектора скорости кровотока в процессе акустического томографирования .....	559
§ 7.4.1. Аддитивно-корреляционный и мультипликативно-корреляционный алгоритмы восстановления общей картины кровотока и вектора его скорости .....	561
§ 7.4.2. Численное моделирование корреляционно-томографических методов восстановления вектора скорости кровотока .....	582
7.4.2.1. Прямая задача рассеяния от малоподвижной фоновой среды и движущихся объектов .....	582
7.4.2.2. Сравнительный анализ результатов восстановления аддитивно-корреляционным и мультипликативно-корреляционным методами .....	585
7.4.2.3. Помехоустойчивость решения при влиянии медленных движений фоновой среды и аппаратных шумов .....	597

Глава 8. Практическая реализация двухшагового томографирования мягких биотканей .....	601
Раздел 8.1. Особенности сбора и упорядочения экспериментальных данных при разреженной антенной решетке с вращением .....	602
Раздел 8.2. Нулевой шаг .....	610
§ 8.2.1. Определение времени распространения сигнала в иммерсионной жидкости .....	610
§ 8.2.2. Определение параметров иммерсионной жидкости, геометрических и фазовых поправок для преобразователей .....	616
§ 8.2.3. Определение смещения положения геометрического центра антенной решетки от центра вращения .....	626
Раздел 8.3. Первый шаг .....	642
§ 8.3.1. Определение временного сдвига корреляционным методом при мешающем воздействии сигналов от боковых лучевых трубок .....	643
§ 8.3.2. Восстановление крупномасштабных неоднородностей скорости звука и коэффициента поглощения .....	658
Раздел 8.4. Второй шаг. Восстановление тонкой структуры рассеивателя на неоднородном крупномасштабном фоне .....	683
Раздел 8.5. Режим одновременного восстановления карты кровотока .....	707
Список литературы к Части II .....	719
Предметный указатель к Части II .....	753
Цветные иллюстрации к Части II .....	756



## ОГЛАВЛЕНИЕ К ЧАСТИ I

(часть I опубликована отдельной книгой:

Буров В.А., Румянцева О.Д. Обратные волновые задачи акустической томографии: Обратные задачи излучения в акустике. М.: Ленанд/URSS, 2017. 384 с.)

Предисловие

Список основных обозначений и символов

Введение

Соотношения для описания волновых процессов

Список литературы к Введению

Глава 1. Обратные задачи когерентного монохроматического излучения

Раздел 1.1. Неизлучающие источники. Неединственность решения обратной задачи излучения

Раздел 1.2. Устранение неединственности решения за счет априорной информации

Раздел 1.3. Обращение волнового фронта как метод решения обратной задачи излучения

Глава 2. Обратные волновые задачи некогерентного излучения. Акустическая термотомография

Раздел 2.1. Узкополосные некогерентные источники

§ 2.1.1. Оценка источников в координатном представлении

§ 2.1.2. Оценка источников в пространственно-спектральном представлении

Раздел 2.2. Активно-пассивный режим корреляционной акустической термотомографии

§ 2.2.1. Прикладные возможности акустической термотомографии

§ 2.2.2. Корреляционные свойства термоакустического излучения тонкого поглощающего слоя. Механизм компенсации теплового излучения поглощающего слоя

§ 2.2.3. Влияние неоднородности фазовой скорости в среде

§ 2.2.4. Корреляционные свойства термоакустического излучения неоднородной среды

§ 2.2.5. Схема активно-пассивного акустического термотомографирования неравномерно нагретой неоднородной среды. Влияние ошибок измерений и точности осуществления операций алгоритма

Раздел 2.3. Процессы активно-пассивной акустической термотомографии при изотропном и анизотропном фоновом излучении

§ 2.3.1. Корреляционные свойства термоакустического излучения тонкого рефракционно-поглощающего слоя при анизотропном фоновом излучении

§ 2.3.2. Экспериментальное моделирование процессов термотомографирования

Глава 3. Оценки максимального правдоподобия в многоканальных системах корреляционной акустической термотомографии

Раздел 3.1. Многоканальное корреляционное томографирование

Раздел 3.2. Общие соотношения для оценок максимального правдоподобия

Раздел 3.3. Достижимая точность и разрешающая способность

Раздел 3.4. Итерационный метод решения ММП-системы. Количество вычислительных операций

Раздел 3.5. Численное моделирование

§ 3.5.1. Результаты восстановления пространственного распределения термоакустических источников в узкополосном и широкополосном режимах

§ 3.5.2. Иллюстрация взаимосвязи температурной чувствительности и разрешающей способности

Глава 4. Корреляционная акустическая термотомография при фокусировке теплового излучения и анизотропной подсветки

Раздел 4.1. Предварительная фокусировка в приемных корреляционных системах

§ 4.1.1. Схема фокусировки

§ 4.1.2. Управляемая анизотропная подсветка в режиме разностных задержек

Раздел 4.2. Фокусирующая термоакустическая система на зеркалах. Экспериментальное моделирование

Раздел 4.3. Параллельное восстановление акустических и температурных характеристик объекта

§ 4.3.1. Неоднородность с малыми волновыми размерами

§ 4.3.2. Особенности процесса восстановления в фокусирующих и кольцевых схемах

§ 4.3.3. Итерационное уточнение температуры, скорости звука и поглощения

Список литературы к части I

Предметный указатель к введению и части I