

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА ВО ФЛУКТУИРУЮЩЕМ ОКЕАНЕ *

С. М. Флатте, Р. Дашен, У. Г. Манк, К. М. Уотсон, Ф. Захариасен

Книга написана коллективом авторов, известных своими работами по различным направлениям исследований рассматриваемого круга вопросов. Книга состоит из введения, пяти глав, трех приложений, снабжена предисловием, словарями терминов, определений и обозначений, а также списком цитируемой литературы.

В предисловии авторы подчеркивают тот факт, что, несмотря на весьма благоприятные для распространения звука условия в океане, малые флуктуации скорости звука оказывают решающее влияние на качество сигналов, распространяющихся на большие расстояния, и на условия разрешения подводных объектов, подобно тому как флуктуации атмосферы ограничивают возможности астрономических телескопов. Кратко обрисовав историю развития физической океанографии, которая шла от построения детерминированных моделей проходящих в океане гидродинамических процессов к появившимся в последние годы и сильно продвинувшим понимание этих процессов моделям пространственно-временной изменчивости океана, авторы замечают, что традиционные океанографические методы становятся порой непригодными для исследований в силу огромных масштабов явлений и с ними вполне успешно конкурируют акустические методы. Успех акустических методов подкрепляется достижениями теории распространения волн в случайных средах, хотя далеко не все результаты этой теории применимы к океанической среде в силу специфики флуктуаций скорости звука. В книге можно проследить систематический поиск возможных применений теории распространения волн в случайных средах к специфической океанической среде, причем особый упор делается на исследование влияния внутренних волн на процессы распространения звука. В предисловии сформулирована цель книги: связать результаты современных океанографических исследований с теми флуктуациями звукового поля, которые наблюдаются в акустических экспериментах, а также использовать последние для слежения за постоянной изменчивостью структуры океана.

Глава первая посвящена описанию океанической среды, в которой происходит распространение звуковых сигналов. Это описание охватывает широкий круг вопросов — от микроструктуры океана до волн планетарных масштабов. Несмотря на то что особое внимание при этом уделено внутренним волнам, поскольку последние лежат в основе последующих детальных выкладок и вычислений, авторы подчеркивают, что внутренними волнами не исчерпывается многообразие механизмов изменчивости океана. В качестве примеров таких механизмов приводятся океанские фронты, перемешанный поверхностный слой, волны Россби, вихри, тонкая структура и микроструктура океанской толщи. Однако целью авторов является получение простейшей модели океана, которая позволила бы объяснить характерные особенности экспериментальных данных по изменчивости акустических сигналов. Такой моделью, согласующейся с температурным режимом верхних слоев на средних широтах и определенными принципами формирования водных масс, является океан, градиент плотности которого (исключая небольшие глубины) экспоненциально уменьшается с глубиной. Эта модель лежит в основе как формы подводного звукового канала (вертикальный профиль скорости звука), так и флуктуаций скорости звука, вызванных внутренними волнами. Для последних выводятся уравнения движения и их асимптотические решения. На основании многочисленных экспериментальных наблюдений строится модель спектра внутренних волн (спектр Гаррета — Манка) и вычисляется пространственно-временная корреляция флуктуаций скорости звука.

Глава вторая содержит краткое введение в теорию распространения звука в океане. Авторы описывают теорию лучевого распространения звука в слоистом океане и приводят пример параметризации фазового пространства лучевых траекторий ($\alpha - z$ -диаграмм). Затем выводится волновое уравнение, и на основании сравнительной оценки величины входящих в него членов авторы сводят его к параболическому уравнению. Дано описание процедуры численного решения полученного параболического уравнения (алгоритм Гапперта — Хардина), связь его с лучевыми решениями и подчеркнута аналогия между методом отыскания решения параболического уравнения и техникой Фейнмановских интегралов по траекториям.

Глава третья содержит введение в теорию распространения волн в среде со случайным коэффициентом преломления. Вводятся понятия корреляционных и спектральных функций среды и интервалов корреляции. Далее вводится пространство параметров задачи: один из параметров характеризует силу изотропных случайных неоднородностей, другой — их размер. В зависимости от значений этих параметров обрисовываются пределы применимости геометрической оптики и методы плавных возмущений Рытова в среде с постоянным средним коэффициентом преломления. Подробно исследуется применимость такого подхода к океанической среде с ее зависимостью среднего коэффициента преломления от глубины, анизотропией и статистической неоднородностью рассеивателей. Описываются зоны Френеля и лучевые трубки, вновь определяются параметры силы и размера неоднородностей, вводится

* Sound transmission through a fluctuating ocean. S. M. Flatte (ed.) R. Dashen, W. H. Munk, K. M. Watson, F. Zachariasen. Cambridge University Press.

структурная функция фазы и на основании спектра внутренних волн, введенного в первой главе, делаются оценки этой функции. Рассмотрены статистические свойства прошедших через среду сигналов при их приеме, разнесенном в пространстве и времени в зависимости от режимов в введенном выше пространстве параметров, а также характерные искажения при распространении короткого импульса по одному лучу. В конце главы рассмотрены некоторые эффекты, вызванные многолучевым распространением, с позиций n -точечной гауссовой статистики.

Глава четвертая посвящена подробному исследованию статистических свойств прошедших через среду звуковых сигналов для всех областей пространства параметров силы и размера неоднородностей. В отсутствие режима насыщения используется метод плавных возмущений, в противном случае авторы пользуются уравнениями переноса, методом моментов и модифицированной техникой интегралов по траекториям. В заключение тщательно анализируется математическая связь между последними тремя подходами к задаче. Приведены результаты численных экспериментов, хорошо согласующиеся с теоретическими предсказаниями.

В заключительной, пятой главе проводится сравнение теоретических построений авторов с результатами трех физических экспериментов по измерению временных флуктуаций распространяющихся в океане акустических сигналов. Предположение авторов, что основные флуктуации фазы и амплитуды сигнала вызваны внутренними волнами, за исключением отдельных случаев, подтверждается хорошим совпадением между измеренными и вычисленными характеристиками сигналов.

В книге не рассмотрены флуктуации звуковых сигналов, вызванные взволнованной поверхностью и неровным дном океана, а также изменчивость сигналов при распространении в мелком море. По существу авторы рассматривают только такие условия распространения, когда применимо параболическое или лучевое приближение, т. е. ограничивают свое рассмотрение достаточно высокими частотами при хорошо выраженном подводном звуковом канале. Однако основное достоинство книги — результаты первых успешных и обнадеживающих попыток связать воедино изменчивость океанической среды и изменчивость распространяющихся в этой среде акустических сигналов — затмевает указанные недостатки. В книге изложены основы теории распространения сигналов в случайных средах в современной форме и в терминах подводной акустики, приводится масса полезных численных оценок параметров, важных для задач подводного распространения звука. Книга будет полезна всем, кто занимается теорией распространения звука в океане и приложениями этой теории к практическим задачам.

Н. Е. Мальцев