

2015 中国好声音

中国好声音
2015 中国好声音

中国好声音
2015 中国好声音



Аббасов И.Б.о.

**Рассеяние нелинейно
взаимодействующих
акустических волн:
сфера, цилиндр,
сфероид**



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ ®

УДК 534.222
ББК 22.32; 22.311
А 13

Аббасов И. Б. **Рассеяние нелинейно взаимодействующих акустических волн: сфера, цилиндр, сфероид.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 160 с. — ISBN 978-5-9221-0863-8.

В работе рассмотрены вопросы диагностики неоднородностей водной среды с использованием гидроакустической параметрической антенны. Неоднородности водной среды при этом имеют геометрически правильную форму: сферы, цилиндра и сфероида.

Теоретически и экспериментально исследуются волновые процессы, происходящие при рассеянии на сфере, цилиндре и сфероиде нелинейно взаимодействующих плоских акустических волн. Сформулированы постановки задач рассеяния, с помощью метода последовательных приближений получены решения неоднородного волнового уравнения в первом и втором приближении.

Получены выражения для высокочастотных спектральных составляющих вторичного поля акустического давления, построены расчетные диаграммы рассеяния акустического давления, проведен анализ и сравнение высокочастотных асимптотических выражений и диаграмм рассеяния. Рассмотрены также вопросы трехмерного моделирования волновых процессов.

Книга предназначена научным работникам и специалистам в области нелинейной акустики и акустики океана, а также может быть полезна аспирантам и студентам, специализирующимся в данных областях.

ISBN 978-5-9221-0863-8

© ФИЗМАТЛИТ, 2007
© И. Б. о. Аббасов, 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Введение	6
Глава 1. Рассеяние нелинейно взаимодействующих плоских акустических волн на сфере	14
1.1. Обзор исследований по рассеянию плоских акустических волн на сфере	14
1.2. Постановка задачи	17
1.3. Решение неоднородного волнового уравнения методом последовательных приближений	19
1.4. Исследование акустического поля волны разностной частоты	22
1.5. Исследование акустического поля волны суммарной частоты	39
1.6. Исследование акустического поля вторых гармоник волн накачки	43
1.7. Экспериментальные исследования рассеяния нелинейно взаимодействующих плоских акустических волн на сфере	53
1.8. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных диаграмм рассеяния волн вторичного поля	72
1.9. Выводы	75
Глава 2. Рассеяние нелинейно взаимодействующих плоских акустических волн на цилиндре	78
2.1. Обзор исследований по рассеянию плоских акустических волн на цилиндре	78
2.2. Постановка задачи	81
2.3. Исследование акустического поля волны разностной частоты	85
2.4. Исследование акустического поля волны суммарной частоты	95
2.5. Исследование акустического поля вторых гармоник	99
2.6. Выводы	108
Глава 3. Рассеяние нелинейно взаимодействующих плоских акустических волн на вытянутом сфероиде	110
3.1. Обзор исследований по рассеянию плоских акустических волн на вытянутом сфероиде	110
3.2. Волновые задачи в вытянутых сфероидальных координатах	112

3.3. Постановка задачи	114
3.4. Исследование акустического поля волны разностной частоты . .	117
3.5. Исследование акустического поля волны суммарной частоты . .	133
3.6. Исследование акустического поля вторых гармоник	137
3.7. Выводы	150
Заключение	152
Список литературы	153

*Памяти матери,
безвременно ушедшей в мир иной.*



ПРЕДИСЛОВИЕ

В этой книге представлены работы, выполненные автором как самостоятельно, так и в соавторстве, по исследованию волновых процессов при рассеянии нелинейно взаимодействующих акустических волн на неоднородностях водной среды правильной геометрической формы. При выполнении исследований мне оказывали помощь многие сотрудники кафедры электрогидроакустической и медицинской техники Таганрогского государственного радиотехнического университета.

В первую очередь хочу поблагодарить своего научного руководителя и консультанта д. т. н., профессора Николая Петровича Загряя, за то, что он со студенческих времен завлек меня в эту работу и в дальнейшем постоянно помогал при решении многих задач, связанных с проведением исследований. С его помощью были сформулированы задачи по рассеянию нелинейно взаимодействующих акустических волн на сфере и цилиндре, которые вошли в первые две главы данной книги. Также неоценимую помощь он оказал при описании нелинейных процессов, происходящих вокруг рассеивателей. В связи с этим выражаю глубокую признательность Николаю Петровичу за постоянное внимание к моим научным изысканиям.

Отдельная благодарность д. т. н., профессору, действительному члену РАЕН Владимиру Ивановичу Тимошенко и сотрудникам кафедры электрогидроакустической и медицинской техники за помощь в проведении экспериментальных исследований.

Признателен Ученому Совету ТРТУ и представительству фонда Сороса (поддержавших меня стипендиями во время учебы в аспирантуре), за предоставленную возможность продолжения исследований в непростое время.

Выражаю благодарность за поддержку при издании этой монографии декану ЕГФ В. В. Василевскому и заведующему кафедрой ИГ и КД В. Г. Ли. Также признателен редактору В. Е. Рокотяну за помощь в улучшении текста рукописи.

Аббасов И.Б.

ВВЕДЕНИЕ

Для освоения Мирового океана широко применяются гидроакустические системы с использованием параметрических излучающих антенн. Учитывая, что среда играет важную роль в формировании полей акустических параметрических антенн, необходимо учитывать различия между идеальными и реальными условиями работы. В реальных условиях работы морская среда всегда имеет неоднородности различного происхождения. К ним относятся как локальные неоднородности самой среды, так и неоднородности биологического и искусственного характера.

Распространение звука в воде является нелинейным процессом. Вестервелт [1] показал, что если два интенсивных звуковых пучка при распространении в среде совмещены, то нелинейность среды приводит к генерации новых распространяющихся звуковых волн, частоты которых равны сумме и разности исходных частот взаимодействующих полей. Разностная частота является особенно привлекательной для технических приложений, поскольку при ее использовании образуется весьма узкий звуковой пучок на относительно низкой частоте.

Звуковые волны новых частот генерируются во всей области интенсивного взаимодействия исходных пучков, поэтому можно говорить об объемном распределении источников вторичных волн, которое и называется акустической параметрической антенной.

В отличие от других вторичных звуковых волн, которые являются более высокочастотными, звук разностной частоты имеет относительно малый коэффициент затухания и поэтому распространяется дальше всех. С другой стороны, для звука разностной частоты характерны не только узость пучка, который много уже, чем можно было бы ожидать для размеров имеющихся поршневых излучателей первичных пучков, но и отсутствие боковых лепестков диаграммы направленности.

Другое преимущество параметрической антенны состоит в расширении частотного диапазона вторичных волн. Еще одним достоинством параметрической антенны является то, что ширина излучаемого пучка практически неизменна при изменениях разностной частоты.

Однако достоинства параметрической антенны достигаются за счет очень низкого КПД. Существует три очевидных способа повышения эффективности: повышение разностной частоты, увеличение энергии первичных пучков и уменьшение ширины пучка.

Повысить эффективность, не потеряв преимуществ нелинейного источника, можно только путем увеличения мощности первичного излучения. Этот путь ограничивается эффектом насыщения, прочностью излучателя, расширением пучка и кавитацией при высоких интенсивностях звука. Когда на пути интенсивного пучка имеются газовые пузырьки, звук вызывает их нелинейные осцилляции с большой амплитудой на резонансной частоте или вблизи нее. Этот эффект может существенно увеличить уровень сигнала разностной частоты, хотя и с некоторыми потерями в направленности излучения. Наличие газовых пузырьков в воде делает среду неоднородной и приводит к рассеянию распространяющихся акустических волн.

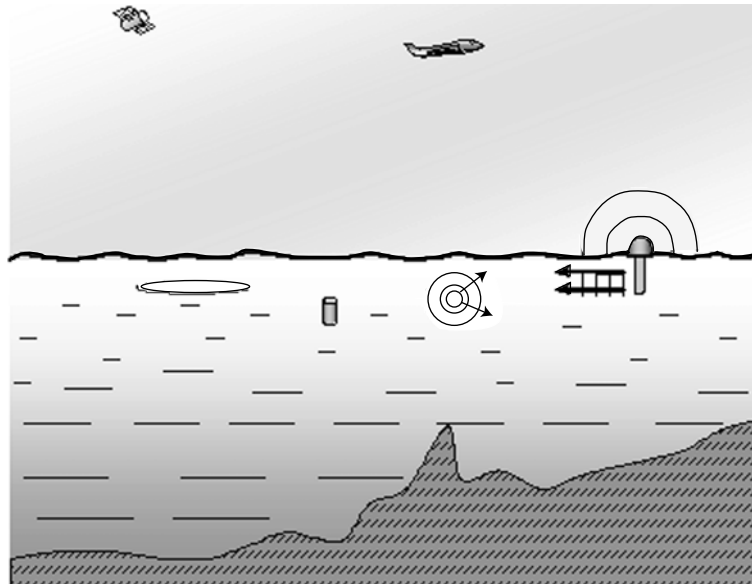


Рис. 1. Использование нелинейной гидроакустической системы для оценки подводной обстановки

Возможны рассеяния волн как от газовых пузырьков, так и от биологических объектов. Рассеянный сигнал от плавательного пузыря рыбы часто бывает настолько большим, что позволяет наблюдать отдельную рыбу, т.е. в основном благодаря газовому пузырьку мы и обнаруживаем рыбу.

Аналитические решения задач рассеяния возможны только для тел простой формы — сфер, цилиндров, сфероидов, дисков, частей плоскостей, а для произвольного тела обычно задача рассеяния решается с помощью численных методов математического моделирования.

В предлагаемой работе рассматриваются вопросы диагностики водной толщи с использованием гидроакустической локационной

системы на основе акустической параметрической антенны. При этом предполагается, что неоднородности водной среды имеют геометрически правильную форму, т.е. имеют форму сферы, цилиндра или сфероида. В качестве таких объектов могут выступать объекты, как естественного, так и искусственного происхождения. Исследование данной задачи может повысить эффективность применения параметрических антенн для ближней локации, а также создания таких антенн с новыми свойствами. Геометрия задачи представлена на рис. 1. Используя широкий частотный диапазон вторичных волн (волны разностной, суммарной частот и вторые гармоники), можно получать важную информацию о свойствах рассеивателя. Для оперативной оценки подводной обстановки информация, полученная от нелинейной гидроакустической системы, в дальнейшем может быть передана соответствующим звеньям обработки информации.

Необходимо отметить, что в предлагаемой работе рассматриваются физические процессы, связанные с рассеянием поля акустической параметрической антенны непосредственно на подводных неоднородностях. Вопросы дальнейшей обработки подводной информации в работе не описываются.

Рассмотрим сначала сферу, так как этот случай имеет большое практическое значение. Рассеяние от многих тел, имеющих более сложную форму, можно описать, используя результаты рассеяния для сфер (т.е. акустическое малое несферическое тело, размеры которого меньше длины звуковой волны, рассеивает звук так же, как и сфера, имеющая тот же объем и те же средние значения физических параметров).

В зависимости от волнового размера рассеивателей, в акустике принято выделять три области рассеяния:

- 1) малые сферы ($ka \ll 1$) — рэлеевское рассеяние;
- 2) характерный размер рассеивателя соизмерим с длиной звуковой волны ($ka \approx 1$) — резонансное рассеяние;
- 3) большие сферы ($ka \gg 1$) — рассеяние по законам геометрической акустики [2].

Для области малых сфер выражение индикатрисы рассеяния для малой нерезонансной сферы ($ka \ll 1$) впервые было получено Рэлеем [3] в 1896 году в следующем виде:

$$Sr^2 = \frac{(ka)^4 a^2}{\pi} \left(\frac{e-1}{3e} - \frac{g-1}{2g+1} \cos \theta \right)^2,$$

где S — отношение интенсивности рассеянной волны к интенсивности падающей, r — расстояние до рассеивателя, a — радиус сферы, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число для среды, $e = E_1/E_0$ — отношение упругостей сферы и среды, $g = \rho_1/\rho_0$ — отношение плотностей сферы и среды.

Эффективный поперечник рассеяния при этом определяется так:

$$Q_s = 4\pi a^2 (ka)^4 \left(\left(\frac{e-1}{3e} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{g-1}{2g+1} \right)^2 \right).$$

На рисунке 2 приведены значения индикатрисы рассеяния для сфер с различными значениями относительной плотности g , относительной скорости звука c_h и относительной упругости e [2].

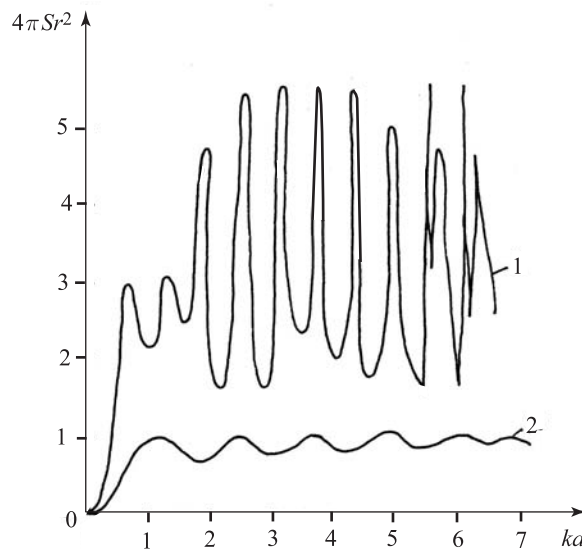


Рис. 2. Индикатриса рассеяния для сфер с различными значениями относительной плотности g , относительной скорости звука c_h , и относительной упругости e . Кривая 1 — $g = 0,5, c_h = 0,5, e = 0,125$; кривая 2 — жесткая сфера

Кривая 1 соответствует сфере, у которой волновое сопротивление в четыре раза меньше волнового сопротивления среды (т.е. относительно мягкая сфера), а кривая 2 соответствует жесткой сфере. Область релеевского рассеяния находится в диапазоне волновых чисел от 0 до 1, и сечение рассеяния пропорционально $(ka)^4$. Физически это означает, что акустическое сечение релеевского рассеяния гораздо меньше геометрического поперечного сечения тела, поскольку звуковые волны огибают акустически малые тела, почти не взаимодействуя с ними. Следовательно, если широкополосный звуковой сигнал падает на “малые” нерезонансные рассеиватели, то обратное рассеяние будет гораздо более сильным для высокочастотных компонент сигнала.

Эффект рэлеевского рассеяния широкополосных сигналов существует также в оптике (т. е. для электромагнитных волн), обуславливая голубой цвет неба.

Во второй — резонансной ($ka \approx 1$) области рассеяния, жесткая сфера ведет себя более сложным образом, и характеристики рассеянного поля сильно зависят от частоты. Для любой жидкой сферы, когда длина звуковой волны внутри сферы сравнима с ее радиусом или меньше его, становятся существенными условия распространения волн внутри сферы, параметры возникающих внутри тела стоячих волн зависят от собственных резонансных частот тела. Когда внутри тела возбуждаются волны, функции и сечения рассеяния имеют пики и впадины на частотах, совпадающих с собственными частотами сферы (кривая 1 на рис. 2).

Некоторые морские организмы состоят из жидкости, окруженной упругой оболочкой (ракообразные). В этом случае могут возникать продольные волны в жидкости внутри оболочки, продольные и поперечные волны в самой оболочке. Обратное рассеяние весьма чувствительно к относительной толщине оболочки.

Третья область рассеяния ($ka \gg 1$) описывается геометрической акустикой, для анализа процесса используется высокочастотное лучевое приближение. Индикатриса рассеяния в случае жесткой сферы при таком рассеянии определяется следующим выражением [2]:

$$Sr^2 = \frac{a^2}{4} \left(1 + \operatorname{ctg}^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) J_1^2 (ka \sin \theta) \right), \quad (1)$$

где $J(ka \sin \theta)$ — цилиндрическая функция Бесселя первого рода.

Это означает, что функция обратного рассеяния для жесткой сферы при $ka \gg 1$ (в области $\theta \neq \pi$) является приблизительно постоянной величиной (рис. 2). Следовательно, интенсивность обратного рассеяния прямо пропорциональна площади поперечного сечения рассеивателя. Сочетание рэлеевского рассеяния с рассеянием в приближении геометрической акустики приводит к тому, что жесткая сфера для обратного рассеяния играет роль фильтра высоких частот с граничной частотой, соответствующей приблизительно равенству $ka \approx 1$.

Для газовых пузырьков при резонансном рассеянии сечения рассеяния и поглощения пузырька примерно в 10^3 раз больше его геометрического поперечного сечения (т. е. пузырек рассеивает намного больше, чем жесткая сфера аналогичных размеров).

Далее мы перейдем к рассмотрению рассеяния в более полном объеме (в пространственном отношении), т. е. не только в обратном направлении (моностатическом), но и по всему диапазону угла θ от 0° до 2π .

На рисунке 3 представлены индикатрисы рассеяния на жесткой сфере, рассчитанные Штенцелем [4] по формуле (1) (для мягкой сферы рассеяние носит более сложный характер).

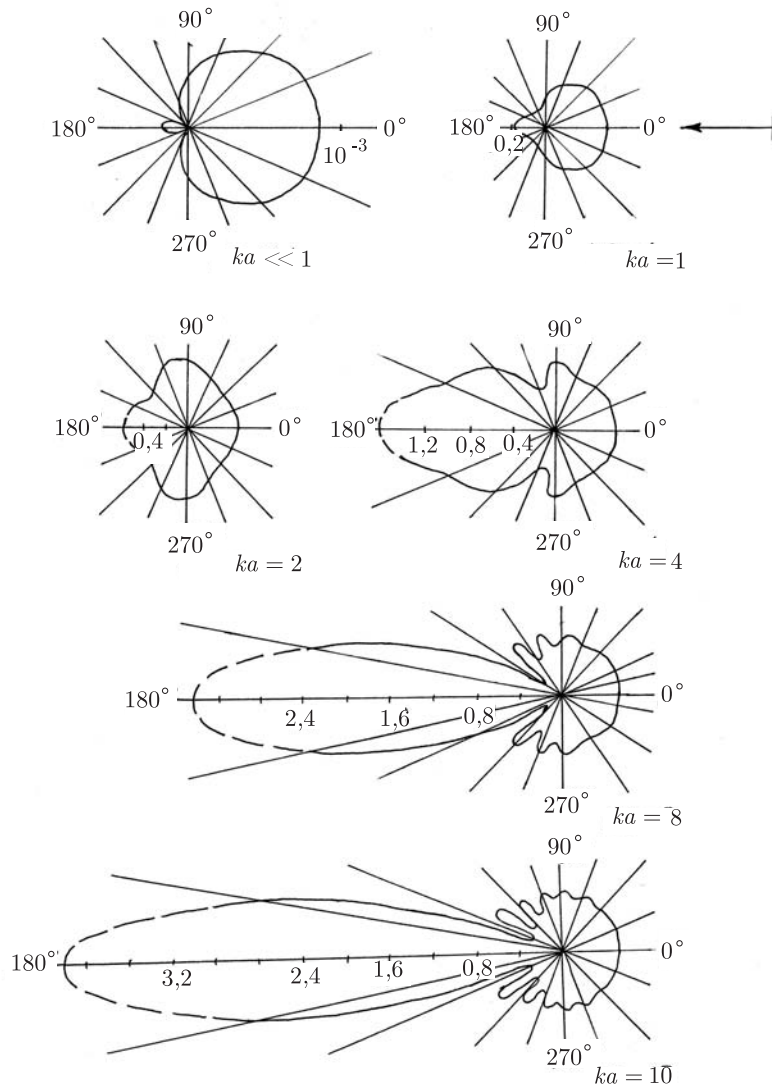


Рис. 3. Индикатрисы рассеяния волны на жесткой сфере. Источник излучения — справа

По мере роста волнового размера ka на круговой индикатрисе рассеяния развивается лепесток, соответствующий рассеянию вперед, который создается тенеобразующей волной (второе слагаемое

выражения (1)). Практически сигнал, рассеянный при углах, близких к 180° , трудно отделить от падающей волны, которая распространяется по тому же пути и примерно в то же время (пунктирная линия).

Следует отметить также, что упругие рассеиватели в геометрической области рассеяния ведут себя гораздо сложнее, и их акустическая тень при больших ka определяется с учетом большого числа мод.

Одно из возможных описаний основывается на объяснении Зоммерфельдом [5] искривления радиоволн при их распространении вблизи земной поверхности. Этот метод был использован Францем [6] для объяснения дифракции электромагнитных волн на непроводящих цилиндрах и сферах. Этот метод используется и в акустике [2]: при описании распространения звука вблизи поверхности тела надо учитывать новый тип неоднородных волн (ползущих), скорость которых меньше скорости волн в неограниченном объеме жидкости и зависит от упругих свойств рассеивателя, затухание этих волн велико и увеличивается с увеличением угла рассеяния.

Следует отметить, что в задачах рассеяния граница раздела двух сред играет огромную роль, и поэтому в акустике принята следующая классификация (для определения граничных условий): акустически мягкая, акустически жесткая и импедансная границы.

Акустически мягкая граница удовлетворяет условию Дирихле, что соответствует возникновению на границе пучности стоячей волны колебательной скорости и узел акустического давления, а скачок фазы на границе испытывает волна давления.

Акустически жесткая граница удовлетворяет условию Неймана. При этом на границе возникает узел стоячей волны колебательной скорости и пучность акустического давления, а скачок фазы на границе испытывает волна колебательной скорости.

Эти случаи являются идеализированными, поэтому в реальных условиях они не соблюдаются, и границы всегда являются импедансными.

В первой главе рассматриваются волновые процессы, происходящие при рассеянии поля акустической параметрической антенны на сфере. Необходимо отметить, что здесь определяющую роль играет местонахождение сферического рассеивателя относительно параметрической антенны. Для данного рассмотрения возможны два случая:

- первый, когда сферический рассеиватель находится в области нелинейного взаимодействия исходных волн накачки, т. е. в ближней зоне параметрической антенны, где падающее поле акустических волн считается плоским;
- второй случай, когда сферический рассеиватель находится за областью нелинейного взаимодействия волн накачки, где уже существуют вторичные волны, а волны накачки почти полностью затухают.

Необходимо отметить, что во втором случае рассеяние вторичных волн будет носить линейный характер, и эта классическая задача

хорошо изучена. Несмотря на свою естественность, задача, соответствующая первому случаю, ранее нигде не рассматривалась, поэтому физические процессы, происходящие при рассеянии нелинейно взаимодействующих акустических волн на сфере, являются неисследованными.

Для первого случая процесс рассеяния имеет более сложный характер, так как падающие плоские волны накачки, рассеиваясь в некотором объеме вокруг рассеивателя, будут взаимодействовать как между собой, так и с падающими плоскими волнами. В результате этого за пределами указанного объема распространяются вторичные волны, образовавшиеся в результате этих взаимодействий.

Глава 1

РАССЕЯНИЕ НЕЛИНЕЙНО ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ПЛОСКИХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН НА СФЕРЕ

1.1. Обзор исследований по рассеянию плоских акустических волн на сфере

Существующие работы по рассеянию на сфере звуковых волн можно разделить на две группы:

- первая группа — это работы, которые посвящены теоретическим и экспериментальным исследованиям рассеяния монохроматических акустических волн на сферических телах;
- вторая группа — это те работы, которые посвящены непосредственно исследованию нелинейного рассеяния акустических волн на сферических рассеивателях.

В свою очередь каждая из этих групп делится на две подгруппы, которые включают в себя:

- первая подгруппа — работы, посвященные исследованию волновых процессов в пространстве вокруг рассеивателя (объемный эффект);
- вторая подгруппа — работы, посвященные исследованию волновых процессов на поверхности при рассеянии акустических волн на сферических телах (поверхностный эффект).

Учитывая, что линейная задача является классической и хорошо изучена, а также приняв во внимание линейное рассеяние самих волн накачки параметрической антенны в нашей исследуемой задаче, рассмотрим работы для линейного случая.

В качестве примера из серии работ, посвященных исследованию пространственных волновых процессов при рассеянии акустических волн на сфере, можно привести классический труд Х. Штенцеля [4] (рис. 3). Волновые размеры сфер охватывают диапазон от 0,5 до 10, т.е. это диапазон, где жесткая сфера ведет себя сложно. С увеличением волнового размера индикатриса из первоначальной, почти круговой диаграммы, превращается в фигуру с длинным “хвостом” в прямом направлении. Дальнейшее увеличение волнового размера приводит только к обострению данного “хвоста”. Данная работа является в принципе основной в этой подгруппе, посвященной исследованию пространственных эффектов.

Вторая подгруппа, относящаяся к исследованию поверхностных эффектов, включает большое количество работ. Первым на важность поверхностных волн обратил внимание В. Франц [6]. Он показал, что при описании рассеяния зондирующей звуковой волны на жестком сферическом теле могут быть выделены следующие компоненты рассеянного волнового поля: во-первых, отраженная волна, во-вторых, две последовательности ползущих волн, распространяющихся в жидкости вокруг объекта по и против направления часовой стрелки.

Каждая волна из этих последовательностей соответствует одной моде и распространяется со своей групповой скоростью, уменьшаясь по амплитуде вследствие постоянного излучения. Каждая волна огибает объект теоретически бесконечное число раз. Число этих мод также бесконечно велико. Отметим, что в случае рассеяния электромагнитных волн на непроводящей сфере Г. Ватсон [7] обнаружил подобное явление и дал его математическое описание.

Следует подчеркнуть также, что исследование поверхностных эффектов проводится в моностатическом режиме (при $\theta = 0^\circ$), поэтому здесь необходимость в угловых характеристиках рассеивателей отпадает.

Исследованию поверхностных эффектов посвящены также работы [8] и [9]. В этих работах рассматривается вопрос математического моделирования эхо-сигналов от следующих объектов: от поллой упругой сферы с наполнителем, поллой пустой упругой сферы, сплошной упругой сферы, сплошной жидкой или газовой сферы, недеформируемой неподвижной сферы и сферической полости. Математическое моделирование проводится в рамках линейной теории упругости, линейной теории упругих оболочек и теории идеальной сжимаемой жидкости.

Периферические волны возникают в упруго-деформируемом объекте и распространяются в самом объекте. В толстостенных и сплошных деформируемых объектах, кроме вышеуказанных волн, формирующих эхосигнал, распространяются еще волны, которые, проходя сквозь объект, отражаются от его тыльной поверхности. Вклады этих волн в эхо-сигнал от сплошных деформируемых цилиндров исследованы в работе [10].

В работах [11, 12] исследуются процессы рассеяния звуковых волн на упругой сфере и цилиндре и на сферической оболочке с жидкостью. В работе [11] приведены экспериментальные исследования рассеяния акустических волн на сплошных стальных цилиндрах и сфере с помощью многочастотного импульсного метода ультразвуковой спектроскопии. В экспериментах использовались стальные цилиндры с диаметром 50 и 30 мм и длиной 180 мм, а также стальная сфера с диаметром 100 мм.

Первый отраженный пакет имеет в эхо-сигнале наибольшую амплитуду, далее следует серия вторичных волновых пакетов. Переизлученные волновые пакеты возникают в эхо-сигнале вследствие периферических и ползущих (дифракционных) волновых процессов.