

581

**ТАГАНРОГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

АББАСОВ Ифтихар Балакиши оглы

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ НЕЛИНЕЙНО-
ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ
ПЛОСКИХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН НА СФЕРЕ**

*Специальность 01.04.06 - акустика,
05.11.06 - акустические приборы и системы*

АВТОРЕФЕРАТ

*диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук*

Таганрог - 1997

Работа выполнена в Таганрогском государственном радиотехническом университете.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, академик АЕН РФ **В.И. Тимошенко**.

Научный консультант: кандидат физико-математических наук, доцент **Н.П. Заграй**.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор **В.М. Меркулова**, ТРТУ, г. Таганрог,
кандидат физико-математических наук,
доцент **К.А. Надолин**, РГУ, г. Ростов на-Дону.

Ведущая организация: НИИ «БРИЗ», г. Таганрог.

Защита состоится «18» 08. 1997 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета КР063.13.20 Таганрогского государственного радиотехнического университета.

Адрес: 347928, Ростовская область, ГСП 17а,
г. Таганрог пер. Некрасовский, 44.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «03» 08. 1997 г.

**Ученый секретарь
диссертационного
совета, к.т.н., доцент:**



М.С. РЫБАЧЕК

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Для освоения Мирового океана применяются акустические параметрические антенны основанные на нелинейных свойствах водной среды. Они используются в основном для лоцирования на низкочастотной составляющей вторичного звукового поля из-за её дальнего распространения. Однако, естественной является задача, когда лоцируемый объект находится в области нелинейного взаимодействия волн накачки акустической параметрической антенны. Тогда, необходимо исследовать рассеянные сигналы от данного объекта с учетом всех четырех спектральных составляющих вторичного звукового поля: по разностной, суммарной частотам и по вторым гармоникам волн накачки. Актуальность данной задачи обуславливает проблему исследования физических процессов при рассеянии поля параметрической антенны на сфере, в случае нахождения её в области нелинейного взаимодействия исходных волн накачки. Задачу, нелинейного рассеяния акустических волн на объектах сферической формы рассматривали Л.М.Лямшев, П.В.Саков, А.П.Поддубняк, J.C.Piquette, A.L.Vigen, но в данной постановке задача рассеяния нигде не рассматривалась, хотя решение этой задачи даёт возможность получить важную информацию о свойствах рассеивателя и тем самым повысить эффективность применения параметрических антенн для целей ближней локации.

Цель работы. Исследовать физические процессы, происходящие при рассеянии нелинейно-взаимодействующих плоских акустических волн на сфере в случае нахождения её в зоне нелинейного взаимодействия волн накачки.

Научная новизна. Получены высокочастотные асимптотические выражения для акустических давлений всех четырех частотных составляющих вторичного поля при рассеянии нелинейно-взаимодействующих плоских акустических волн на сфере, удовлетворяющей граничным условиям Неймана (жесткая сфера). Разработана и апробирована численно-аналитическая методика расчета диаграмм рассеяния акустического давления вторичных волн. Проведены экспериментальные исследования рассеяния поля акустической параметрической антенны на сплошных стальных сферах. Получены диаграммы рассеяния акустического давления вторичного поля и исходных волн накачки. Проведен сравнительный анализ теоретических и экспериментальных диаграмм рассеяния общего акустического давления волн

вторичного поля при рассеянии нелинейно-взаимодействующих плоских акустических волн на жесткой сфере.

Практическая ценность. Анализ диаграмм рассеяния акустического давления по всем частотным составляющим вторичного поля позволяет повысить точность определения пространственных размеров сферических рассеивателей благодаря наличию широкого частотного диапазона, который охватывается вторичными волнами. Следует отметить, что волновые размеры одного и того же сферического рассеивателя при одновременном анализе, находятся как в рэлеевской, резонансной, а также и в геометрической областях рассеяния. На основе полученных асимптотических выражений разработаны пакеты программ для расчета диаграмм рассеяния акустических давлений волн вторичного поля. Полученная теоретическая модель затрагивает также вопросы исследования волнового поля параметрической антенны, имеющей пространственную сферическую апертуру. Создан лабораторный стенд для проведения экспериментальных исследований рассеяния поля акустической параметрической антенны на сферических рассеивателях и разработана методика проведения данных исследований.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях: X Всесоюзная конференция "Информационная акустика" (1990г., г. Москва), Областные научно-технические конференции посвященные Дню радио (1990, 1992, 1993 гг., г. Ростов-на-Дону), научно-техническая конференция стран СНГ "Проблемы метрологии гидрофизических измерений" (1992г., г. Москва), II Международная научно-техническая конференция "Актуальные проблемы фундаментальных наук" (1994г., г. Москва), XVI Всероссийская конференция с Международным участием "Акустоэлектроника и физическая акустика твердого тела" (1994г., г. Сыктывкар), Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием "Радиотехнические цепи и сигналы" (1994г., г. Таганрог), II Всероссийская научно-техническая конференция "Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления" (1994г., г. Таганрог), XX и XXI Всероссийские научно-технические конференции "Гагаринские чтения" (1994, 1995гг., г. Москва), Всероссийская научно-техническая конференция "Медицинские информационные системы" (1995г., г. Таганрог), Всероссийская научно-техническая конференция "Новые информаци-

онные технологии" (1995г., г. Таганрог), Международная конференция "Фундаментальные и прикладные проблемы охраны окружающей среды (1995г., г. Томск), Международный научный конгресс студентов, аспирантов, молодых ученых "Молодежь и наука-третье тысячелетие"(1996г., г. Таганрог), Международная научно-техническая конференция "Актуальные проблемы электронного приборостроения" (1996г., г. Новосибирск), 39-42 научно-технические конференции ГРТУ (1993, 1994, 1995, 1996 гг., г. Таганрог).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 27 работ.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти основных глав, заключения, списка цитируемой литературы, включающего 64 наименования и приложения. Работа содержит 100 страниц машинописного текста и 56 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении отмечена актуальность выбранной темы исследования, определена цель работы и дана краткая аннотация разделов диссертации. Приводится обзор литературы по исследованиям рассеяния акустических волн на объектах сферической формы.

В первой главе сформулирована теоретическая модель и постановка задачи рассеяния нелинейно-взаимодействующих плоских акустических волн на жесткой сфере. По методу последовательных приближений получено решение неоднородного волнового уравнения для акустического давления $p^{(1)}$ в первом приближении, которое характеризует падающие и рассеянные волны накачки в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 p^{(1)} = p_1^{(1)} + p_2^{(1)} = & \left\{ i\omega_1 \rho_0 \psi_{10} \left[\sum_{l=0}^{\infty} B_l^{(1)} \exp(i(\omega_1 t - l\pi/2)) \right] + \right. \\
 & \left. + \sum_{m=0}^{\infty} B_m^{(1)} \exp(i(\omega_1 t - \varphi_m^{(1)})) \right] + (k.c.) \left. \right\} + \\
 & + \left\{ i\omega_2 \rho_0 \psi_{20} \left[\sum_{l=0}^{\infty} B_l^{(2)} \exp(i(\omega_2 t - l\pi/2)) \right] + \right. \\
 & \left. + \sum_{m=0}^{\infty} B_m^{(2)} \exp(i(\omega_2 t - \varphi_m^{(2)})) \right] + (k.c.) \left. \right\},
 \end{aligned}$$

где ω_1, ω_2 – круговые частоты волн накачки, ρ_0 – плотность невозмущенной среды, ψ_{10}, ψ_{20} – амплитуды функций потенциалов скорости,

$$B_l^{(n)} = (2l+1)j_l(k_n r)P_l(\cos\theta), \quad B_m^{(n)} = A_m^{(n)}(-i)D_m^{(n)}P_m(\cos\theta),$$

$j_l(k_n r)$ – сферическая функция Бесселя l -ого порядка, k_n – волновое число, $n = 1, 2$, $D_m^{(n)}, \varphi_m^{(n)}$ – модуль и фаза сферической функции Ханкеля второго рода m -ого порядка $h_m^{(2)}(k_n r)$, $P_l(\cos\theta), P_m(\cos\theta)$ – полиномы Лежандра, θ – угол между направлением волнового вектора и направлением на точку наблюдения, $A_m^{(n)}$ – коэффициент, определяемый из граничных условий (условие Неймана).

Получено выражение для функции источников Q , являющейся правой частью неоднородного волнового уравнения, которое содержит все четыре частотные компоненты вторичного поля: разностную $\Omega = \omega_2 - \omega_1$, суммарную $\omega_2 + \omega_1$ частоты и вторые гармоники $2\omega_1$ и $2\omega_2$.

Вторая глава посвящена исследованиям характеристик полей разностной и суммарной частот при рассеянии нелинейно-взаимодействующих плоских акустических волн на сфере, так как они имеют по четыре пространственных слагаемых.

Получены решения второго приближения неоднородного волнового уравнения для общего акустического давления (через неоднородное уравнение Гельмгольца) на волнах разностной $P_-^{(2)}$ и суммарной $P_+^{(2)}$ частот, которые представляют собой объемные интегралы от произведения функций вторичных источников на функцию Грина. Объем интегрирования реализуется в виде сферического слоя среды вокруг рассеивателя. После интегрирования по угловым координатам объемный интеграл для общего звукового давления волны разностной частоты имеет вид

$$P_-^{(2)}(r, \theta) = \left[P_{-1}^{(2)} + P_{-2}^{(2)} + P_{-3}^{(2)} - P_{-4}^{(2)} \right] = \quad (1)$$

$$= C_- \int_a^d \int_{l=0}^{\infty} (2l+1)^2 j_l(k_1 r') j_l(k_2 r') P_l^2(\cos\theta) +$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=l}^{\infty} (2l+1) j_l(k_1 r') P_l(\cos \theta) A_m^{(2)} (-i) D_m^{(2)} P_m(\cos \theta) e^{-i\varphi_m^{(2)}} + \\
& + \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=m}^{\infty} A_m^{(1)} (-i) D_m^{(1)} P_m(\cos \theta) (2l+1) j_l(k_1 r') P_l(\cos \theta) e^{-i\varphi_m^{(1)}} - \\
& - \sum_{m=0}^{\infty} A_m^{(1)} D_m^{(1)} P_m^2(\cos \theta) A_m^{(2)} D_m^{(2)} e^{i(\varphi_m^{(1)} - \varphi_m^{(2)})} \left] \sin(k_3 r') \sin(k_4 r') dr',
\end{aligned}$$

где $C_- = 12e^{-ik_-r} \varepsilon \omega_1 \omega_2 \rho_0 \psi_{10} \psi_{20} \Omega^2 / k_-^2 c_0^4 r \sin 2\theta$, a — радиус сферы, $k_3 = k_- \cos \theta$, $k_4 = k_- \sin \theta$, d — протяженность сферического слоя среды вокруг рассеивателя, в котором происходит нелинейное взаимодействие.

Анализ выражения (1) показывает, что первое слагаемое $P_{-1}^{(2)}$ соответствует той части общего давления вторичного поля волны разностной частоты, которая формируется в сферическом слое среды области нелинейного взаимодействия падающими плоскими волнами накачки ω_1 и ω_2 , второе слагаемое $P_{-2}^{(2)}$ описывает взаимодействие падающей плоской волны частоты ω_1 и рассеянной сферической волной частоты ω_2 в этой области, третье, $P_{-3}^{(2)}$ соответствует взаимодействию падающей плоской волны частоты ω_2 с рассеянной сферической волной частоты ω_1 , и последнее четвертое, $P_{-4}^{(2)}$ — взаимодействию рассеянных сферических волн с частотами ω_1 и ω_2 в сферическом слое среды.

Учитывая значения сферических функций Бесселя и Ханкеля (для высокочастотного предельного рассмотрения $kr' \rightarrow \infty$) после некоторых преобразований получены решения интеграла (1) для каждого слагаемого общего акустического давления вторичного поля разностной частоты.

Полученное асимптотическое выражение акустического давления для первого слагаемого $P_{-1}^{(2)}$ состоит из произведения экспоненциальной функции и функции $(\sin 2\theta)^{-1}$ с некоторым амплитудным коэффициентом. При этом вид диаграммы рассеяния акустического давления слагаемого $P_{-1}^{(2)}$

определяется в основном поведением функции $(\sin 2\theta)^{-1}$, что и соответствует формированию вторичного звукового поля нелинейно-взаимодействующими плоскими волнами накачки, имеющего преобладающий уровень рассеяния в направлениях $\theta = \pm \pi/2$. В обратном $\theta = 0^0$ и прямом направлениях $\theta = \pi$ диаграмма рассеяния имеет незначительные уровни.

Асимптотическое выражение акустического давления для второго слагаемого $P_{-2}^{(2)}$ состоит из произведения интегральной показательной функции и функции вида $(\sin 2\theta \sqrt{2 - 2 \cos \theta})^{-1}$. С появлением дополнительного члена $(\sqrt{2 - 2 \cos \theta})^{-1}$ диаграмма рассеяния звукового давления слагаемого $P_{-2}^{(2)}$, характеризующего нелинейное взаимодействие падающей плоской и рассеянной сферической волн, приобретает вид, где преобладающими становятся уровни рассеяния в обратном $\theta = 0^0$ и прямом $\theta = \pi$ направлениях.

Асимптотическое выражение акустического давления для третьего слагаемого $P_{-3}^{(2)}$ имеет вид, аналогичный слагаемому $P_{-2}^{(2)}$, и соответственно диаграммы рассеяния акустического давления будут аналогичными.

Асимптотическое выражение акустического давления для четвертого слагаемого $P_{-4}^{(2)}$, характеризующего нелинейное взаимодействие рассеянных сферических волн, состоит из произведений экспоненциальной и интегральной показательной функции с функцией $(\sin 2\theta(2 - 2 \cos \theta))^{-1}$, поэтому диаграмма рассеяния акустического давления имеет единственный максимум в обратном $\theta = 0^0$ направлении.

Диаграмма рассеяния общего звукового давления волны разностной частоты $P_{-2}^{(2)}$ представлена кривой 1 на рис. 1 при $f_2 = 1030$ кГц, $f_1 = 986.6$ кГц, $F_- = 43.4$ кГц, $k_a = 1$, $a = 5.5 \times 10^{-3}$ м, $d = 10 \times 10^{-3}$ м. Данная диаграмма имеет преобладающий уровень рассеяния поля акустического давления в обратном направлении $\theta = 0^0$ с шириной около 20^0 , примерно в два раза меньший уровень в боковых направ-

лениях $\theta = \pm\pi/2$ и несколько меньший уровень (относительно $\theta = 0^\circ$) в пределах 60° в прямом $\theta = \pi$ направлении. Увеличение протяженности сферического слоя среды вокруг рассеивателя приводит к обужению основных максимумов диаграммы рассеяния ($\theta = 0^\circ, \pm\pi/2, \pi$), что является характерным для акустических параметрических антенн, т.к. увеличивается апертура переизлучающей антенны. Изменение волнового размера ($k_a = 0.5 \div 20$) приводит к некоторому количественному изменению в соотношениях основных и промежуточных максимумов диаграмм рассеяния.

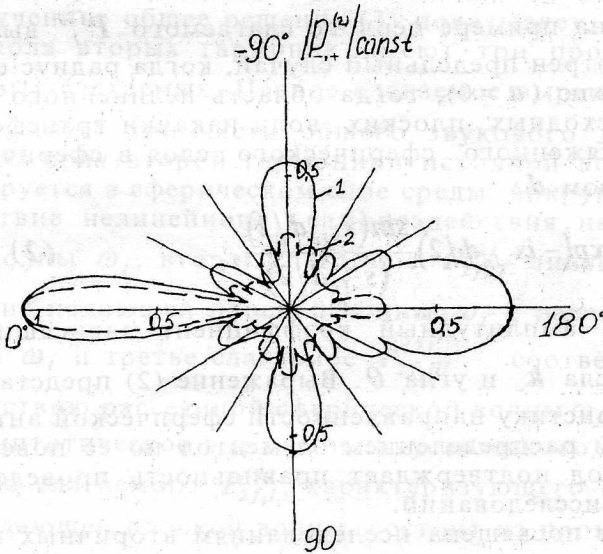


Рис.1 Диаграммы рассеяния общего звукового давления волн разностной $P_-^{(2)}$ (1) и суммарной $P_+^{(2)}$ (2) частот.

Выражение для общего звукового давления волны суммарной частоты имеет вид аналогичный выражению (1), с заменой волнового числа k_- на k_+ и частоты Ω на $(\omega_2 + \omega_1)$. Необходимо отметить, что в отличие от волны разностной частоты рассеяние для волны суммарной частоты носит чисто геометрический характер ($k_+ a \approx 46$). Поэтому, несмотря на аналогичность выражений акустического давления, диаграммы рассеяния суммарной волны, будут

отличаться от диаграмм рассеяния волны разностной частоты, т.к. проявляется влияние экспоненциальных составляющих.

Кривая 2 рис.1 представляет диаграмму рассеяния общего звукового давления волны суммарной частоты $P_+^{(2)}$ при $f_2 = 1030$ кГц, $f_1 = 986.6$ кГц, $F_+ = 2016$ кГц, $k_+ a = 46.5$, $a = 5.5 \times 10^{-3}$ м, $d = 10 \times 10^{-3}$ м. Данная диаграмма имеет единственный максимум в обратном $\theta = \theta^0$ направлении и незначительные уровни рассеяния в боковых $\theta = \pm \pi/2$ и прямом $\theta = \pi$ направлениях.

Для проверки правильности проведенных теоретических исследований на примере первого слагаемого $P_{-1}^{(2)}$ выражения (1), рассмотрен предельный случай, когда радиус сферы будет равен нулю ($a = 0$), тогда область нелинейного взаимодействия исходных плоских волн накачки трансформируется из протяженного сферического слоя в сферический объем с радиусом d :

$$P_{-1n}^{(2)} \Big|_{a=0} = \left(\frac{d}{2} \right) \exp(-is_{-1n}d/2) \frac{\sin(s_{-1n}d/2)}{(s_{-1n}d/2)}, \quad (2)$$

где $s_{-1n}(k_-, \theta)$ — амплитудный коэффициент зависящий от волнового числа k_- и угла θ . Выражение (2) представляет собой характеристику направленности сферической антенны с непрерывным распределением элементов по её поверхности. Этот вывод подтверждает правильность проведенных теоретических исследований.

Третья глава посвящена исследованиям вторичных полей на вторых гармониках исходных волн накачки, при рассеянии нелинейно-взаимодействующих плоских акустических волн на сфере.

Получены решения второго приближения неоднородного волнового уравнения для общего звукового давления на вторых гармониках $P_{2f_1}^{(2)}$ и $P_{2f_2}^{(2)}$. После интегрирования по угловым координатам объемный интеграл для акустического давления второй гармоники первой волны накачки $P_{2f_1}^{(2)}$ принимает вид:

$$P_{2f_1}^{(2)}(r, \theta) = \left[P_{2f_1I}^{(2)} + P_{2f_1II}^{(2)} - P_{2f_1III}^{(2)} \right] = \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
&= C_{2f_1} \int_a^d \left[\sum_{l=0}^{\infty} (2l+1)^2 j_l^2(k_1 r') P_l^2(\cos \theta) + \right. \\
&+ \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=l}^{\infty} (2l+1) j_l(k_1 r') P_l(\cos \theta) A_m^{(1)} P_m(\cos \theta) e^{-i\varphi_m^{(1)}} - \\
&\left. - \sum_{m=0}^{\infty} A_m^{(1)2} D_m^{(1)2} P_m^2(\cos \theta) e^{-2i\varphi_m^{(1)}} \right] \sin(k_{13} r') \sin(k_{14} r') dr',
\end{aligned}$$

где $C_{2f_1} = 24 \exp(-ik_{2f_1} r) \varepsilon \omega_1^4 \rho_0 \psi_{10}^2 / k_{2f_1}^2 r c_0^4 \sin 2\theta$,

$$k_{2f_1} = 2k_1, \quad k_{13} = k_{2f_1} \cos \theta, \quad k_{14} = k_{2f_1} \sin \theta.$$

Полученное общее решение (3) показывает, что акустические поля вторых гармоник имеют три пространственно-волновых слагаемых. Первое слагаемое выражения (3) $P_{2f_1 I}^{(2)}$ соответствует той части общего звукового давления вторичного поля второй гармоники исходной волны, которая формируется в сферическом слое среды вокруг рассеивателя вследствие нелинейного самовоздействия падающей плоской волны ω_1 , второе слагаемое $P_{2f_1 II}^{(2)}$ описывает взаимодействие падающей плоской волны ω_1 с рассеянной сферической ω_1 и третье слагаемое $P_{2f_1 III}^{(2)}$ соответствует самовоздействию рассеянной сферической волны ω_1 .

Асимптотическое выражение акустического давления для первого слагаемого $P_{2f_1 I}^{(2)}$, характеризующего самовоздействие падающей плоской волны, состоит из произведения экспоненциальной функции и функции вида $(\sin 2\theta \times s_{2f_1 In})^{-1}$, где $s_{2f_1 In}(k_{2f_1}, \theta)$ — функция угла θ и волнового числа k_{2f_1} ; её влияние является преобладающей. Таким образом, диаграмма рассеяния акустического давления для первого слагаемого имеет два равнозначных максимума в пределах 20° в обратном $\theta = 0^\circ$ и прямом $\theta = \pi$ направлениях. Она имеет в два раза меньший уровень рассеяния в боковых направлениях $\theta = \pm \pi/2$, а также присутствуют несколько промежуточных максимумов.

Асимптотическое выражение акустического давления для второго слагаемого $P_{2f_1,II}^{(2)}$, характеризующего нелинейное взаимодействие падающей плоской и рассеянной сферической волн, состоит из произведения интегральной показательной функции и функции вида $(\sin 2\theta\sqrt{2-2\cos\theta})^{-1}$. Диаграмма рассеяния акустического давления для слагаемого $P_{2f_1,II}^{(2)}$ имеет преобладающий уровень рассеяния в обратном направлении $\theta = 0^\circ$ и незначительные уровни рассеяния в боковых $\theta = \pm\pi/2$ направлениях. В прямом направлении рассеяние почти отсутствует.

Высокочастотная асимптотика акустического давления для третьего слагаемого $P_{2f_1,III}^{(2)}$, характеризующего нелинейное самовоздействие рассеянной сферической волны, состоит из произведения экспоненциальной и интегральной показательной функций с функцией $(\sin 2\theta(2-2\cos\theta))^{-1}$. Диаграмма рассеяния акустического давления имеет один единственный максимум в обратном $\theta = 0^\circ$ направлении.

На рис. 2 кривой 1 представлена диаграмма рассеяния общего акустического давления второй гармоники первой волны накачки $P_{2f_1}^{(2)}$ при $f_2 = 1030$ кГц, $f_1 = 986.6$ кГц, $2f_1 = 1973.2$ кГц, $k_{2f_1}a = 45.4$, $a = 5.5 \times 10^{-3}$ м, $d = 10 \times 10^{-3}$ м. Диаграмма имеет основной максимум в обратном направлении, в два раза меньшие уровни по боковым и прямом направлениях, а также небольшие промежуточные максимумы, сопровождающие боковое рассеяние. Изменение волнового размера рассеивателя ($k_{2f_1}a = 43 \div 47$) приводит к незначительным колебаниям уровней рассеяния в прямом и в промежуточных направлениях. Увеличение протяженности сферического слоя среды вокруг рассеивателя приводит также к сужению основных максимумов диаграммы рассеяния.

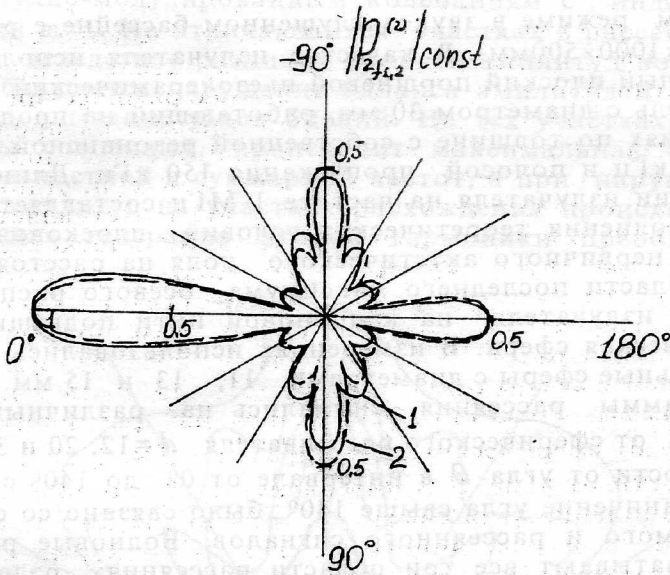


Рис.2. Диаграммы рассеяния общего звукового давления вторых гармоник волн накачки $P_{2f_1}^{(2)}$ (1) и $P_{2f_2}^{(2)}$ (2).

Анализ выражения для общего акустического давления второй гармоники второй волны накачки является аналогичным выражению (3) с соответствующей заменой волнового числа k_{2f_1} на k_{2f_2} и частоты $2\omega_1$ на $2\omega_2$. При этом вторая гармоника второй волны накачки из-за наивысшего значения имеет наибольший волновой размер из всех волн вторичного поля.

Кривой рис.2 представлена диаграмма рассеяния общего звукового давления второй гармоники второй волны накачки $P_{2f_2}^{(2)}$ при $2f_2=2060$ кГц, $k_{2f_2}a=47.5$. В целом данная диаграмма повторяет поведение частотной составляющей $P_{2f_1}^{(2)}$, с небольшим различием в уровне промежуточных максимумов.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям рассеяния нелинейно-взаимодействующих плоских акустических волн на жестких стальных сферах. Экспериментальная установка была выполнена на базе нелинейного акустического излучателя НАИ-5, разработанного на кафедре ЭГА и МТ ТРТУ. Измерения проводились в им-

пульсном режиме в звукозаглушенном бассейне с размерами $2100 \times 1000 \times 500 \text{ мм}^3$. В качестве излучателя использовался круглый плоский поршневой пьезокерамический преобразователь с диаметром 30 мм, работающий на продольных колебаниях по толщине с собственной резонансной частотой 990 кГц и полосой пропускания 150 кГц. Длина зоны дифракции излучателя на частоте 1 МГц составляет 47 см. Для выполнения теоретических условий плосковолнового падения первичного акустического поля на расстоянии 32 см (в области последнего максимума осевого распределения), от излучателя на капроновой нити подвешивалась металлическая сфера. В измерениях использовались сплошные стальные сферы с диаметрами 11, 13 и 15 мм.

Диаграммы рассеяния снимались на различных расстояниях от сферического рассеивателя $d = 12, 20$ и 30 см, в зависимости от угла θ в интервале от 0° до 140° с шагом 10° . Ограничение угла свыше 140° было связано со слиянием прямого и рассеянного сигналов. Волновые размеры сфер охватывают все три области рассеяния: рэлеевскую $ka \ll 1$ и резонансную $ka \approx 1$ (для волны разностной частоты $k_a = 0.5 \div 3$), геометрическую $ka \gg 1$ (для волн накачки, суммарной частоты и вторых гармоник $ka = 20 \div 48$).

Анализ снятых диаграмм рассеяния показал, что нельзя оценивать поведение диаграмм общего акустического давления волн вторичного поля без учета диаграмм рассеяния исходных волн накачки, рассеяние которых носит чисто линейный характер. Поэтому для представления полной картины рассеяния необходимо совмещение диаграмм рассеяния всех спектральных составляющих первичного и вторичного полей.

На рисунке 3 представлены совмещенные диаграммы рассеяния в относительных масштабах как по волнам накачки, так и по вторичным волнам, при этом: $f_2 = 1030$ кГц, $f_1 = 995.4$ кГц, $F_- = 34.6$ кГц, $(k_a = 0.8)$, $F_+ = 2025.4$ кГц, $2f_1 = 1990.8$ кГц, $2f_2 = 2060$ кГц, $a = 5.5 \times 10^{-3}$ м, $d = 120 \times 10^{-3}$ м.

Анализ диаграмм рассеяния общего давления волн накачки f_1 и f_2 показывает, что они имеют как совпадающие, так и отличающиеся участки по разным углам. Для высокочастотных волн накачки при равенстве их амплитуд по направлениям совпадения наблюдаются биения, аналогично

амплитудно-модулированным колебаниям с индексом модуляции $m=1$. На отличающихся участках в рассеянном импульсе, вследствие различия уровней амплитуд волн накачки, наблюдается нарушение баланса амплитуд и происходит расплывание узлов биений. На тех участках, где диаграммы совпадают, происходит максимальная генерация волн разностной и суммарной частот, а при нарушении баланса амплитуд на участках расхождения происходит максимальная генерация второй гармоники преобладающей волны.

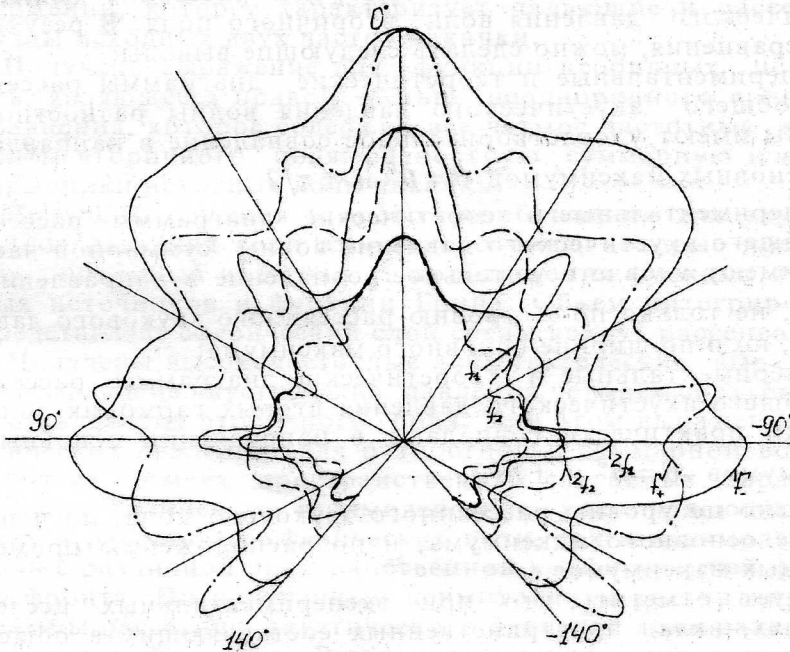


Рис.3 Совмещенные диаграммы рассеяния в относительных масштабах волн накачки и волн вторичного поля.

Несмотря на то, что диаграммы рассеяния вторых гармоник, по форме повторяют (с квадратичной зависимостью) диаграммы рассеяния исходных волн накачки, они действуют в полной "противофазе" друг с другом, т.е. максимум $2f_1$ соответствует минимум по $2f_2$ и наоборот. На участках, где диаграммы рассеяния волн накачки имеют наименьшее расхождение, наблюдаются максимумы по разностной и суммарной частотам. Таким образом, диаграмма рассеяния разностной волны является своего рода усредненным приближением более неравномерной диаграммы сум-

марной волны (т.к. она более высокочастотна). Диаграммы рассеяния разностной и суммарной волн зависят как от соотношения диаграмм волн накачки, так и от расстояния до рассеивателя, т.е. от протяженности области, где происходит нелинейное взаимодействие волн накачки. Увеличение расстояния до рассеивателя приводит к обужению диаграмм рассеяния волн вторичного поля по основным направлениям.

В пятой главе проводится сравнительный анализ теоретических и экспериментальных диаграмм рассеяния общего акустического давления волн вторичного поля. В результате сравнения, можно сделать следующие выводы:

- экспериментальные и теоретические диаграммы рассеяния общего акустического давления волны разностной частоты имеют удовлетворительное совпадение в направлении основных максимумов $\theta = 0^{\circ}$ и $\pm \pi/2$;

- экспериментальные и теоретические диаграммы рассеяния общего акустического давления волны суммарной частоты имеют удовлетворительное совпадение в направлении $\theta = 0^{\circ}$, не только по уровню рассеянного звукового давления, но и по ширине основного максимума;

- экспериментальные и теоретические диаграммы рассеяния общего акустического давления вторых гармоник волн накачки практически совпадают в направлении основных максимумов $\theta = 0^{\circ}$ и $\pm \pi/2$,

не только по уровню рассеянного звукового поля, но и по ширине основного максимума, и по расположению промежуточных максимумов.

Следует отметить, что при экспериментальных исследованиях, вклад пространственных составляющих в общее поле звукового давления вторичных волн является неравнозначным. Так как, в импульсном режиме время встречного взаимодействия (смешанное взаимодействие волн с различной пространственной конфигурацией волнового фронта) ограничено, и поэтому влияние смешанных составляющих уменьшается. С увеличением волнового размера степень соответствия теоретических и экспериментальных диаграмм рассеяния общего акустического давления повышается, что связано с лучшим выполнением условий теоретического рассмотрения предельности аргумента $ka \rightarrow \infty$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе теоретически и экспериментально исследованы волновые процессы, происходящие при рассеянии на сфере нелинейно-взаимодействующих плоских акустических волн.

Разработана теоретическая модель и сформулирована постановка задачи рассеяния на жесткой сфере нелинейно-взаимодействующих плоских акустических волн. С помощью метода последовательных приближений получено решение однородного волнового уравнения в первом приближении, которое характеризует падающие и рассеянные волны исходных двух частот накачки.

Получено выражение для функции вторичных источников, являющееся правой частью неоднородного волнового уравнения, которое содержит все четыре частотные компоненты вторичного поля: разностную, суммарную и вторые гармоники исходных волн накачки.

Получены решения второго приближения для акустического давления волн вторичного поля, которые представляют объемный интеграл от произведения функции вторичных источников и функции Грина. Объем интегрирования представляет сферический слой среды вокруг рассеивателя.

Получены высокочастотные асимптотические выражения, описывающие акустические давления четырех спектральных составляющих вторичного поля. При этом выражения акустических давлений для разностной и суммарной волн состоят из четырех пространственных слагаемых, характеризующих нелинейное взаимодействие, как падающих плоских и рассеянных сферических волн, так и взаимодействие волн с различной пространственной конфигурацией фазового фронта. По полученным асимптотикам рассчитаны диаграммы рассеяния акустического давления волн разностной и суммарной частот. Результирующее вторичное поле акустического давления имеет преобладающий максимум в обратном направлении, а в прямом и в боковых направлениях, уровни рассеяния не превышают половину основного максимума в обратном направлении, наблюдаются также незначительные промежуточные уровни рассеяния.

Выражения акустического давления для вторых гармоник волн накачки состоят из трёх пространственных слагаемых, характеризующих самовоздействие падающей плоской волны, нелинейное взаимодействие плоской и рассеянной сферической волн, а также самовоздействие рассеянной сферической волны. Результирующее акустическое давление вторых гармоник имеет преобладающий максимум в обрат-

ном направлении, высокие уровни бокового рассеяния и промежуточные максимумы соизмеримые с уровнем прямого рассеяния.

Проведены экспериментальные исследования рассеяния на сплошных стальных сферах поля параметрической антенны. При этом имеет место, как рэлеевское и резонансное рассеяние (для низкочастотной компоненты вторичного поля), так и геометрическое (для высокочастотных компонент первичного поля волн накачки и вторичных полей волны суммарной частоты и вторых гармоник). В результате анализа полученных диаграмм установлено, что для рассмотрения поведения вторичного акустического поля одной частоты, необходимо учитывать диаграммы рассеяния других спектральных составляющих, т.е. диаграммы рассеяния как исходных волн накачки, так и остальных волн вторичного звукового поля.

В результате сравнения теоретических и экспериментальных диаграмм рассеяния установлено, что с увеличением волнового размера вторичной волны, степень совпадения диаграмм рассеяния увеличивается, что объясняется большим соответствием теоретическим предпосылкам.

Проведенные экспериментальные исследования позволяют говорить о приемлемости данной теоретической модели для рассмотрения и анализа волновых процессов, происходящих при рассеянии на сфере нелинейно-взаимодействующих плоских акустических волн.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Аббасов И.Б., Заграй Н.П. "Рассеяние поля параметрической антенны на сфере". Областная НТК посвященная Дню радио. Тезисы докладов. Ростов на-Дону. 1990.С.48.
2. Аббасов И.Б., Заграй Н.П. "Рассеяние плоской волны на сфере и цилиндре при нелинейном взаимодействии". X Всесоюзная конференция "Информационная акустика". Москва. 1990.
3. Аббасов И.Б., Заграй Н.П. "Угловой спектр рассеяния волны разностной частоты на металлической сфере в области нелинейного взаимодействия". Областная НТК посвященная Дню радио. Тезисы докладов. Ростов на-Дону.1992.С.18.
4. Аббасов И.Б., Заграй Н.П. "Рассеяние на сфере бигармонической плоской волны". НТК стран СНГ "Проблемы метрологии гидрофизических измерений". Тезисы докладов. ВНИИФТИ, Москва. 1992. С.92.

5. Аббасов И.Б., Заграй Н.П. "Методика определения параметров широкополосного рассеяния акустического поля на объектах, находящихся в водной среде". Областная НТК посвященная Дню радио. Тезисы докладов. Ростов на-Дону. 1993. С.32.
6. Аббасов И.Б., Заграй Н.П. "Исследование вторичных акустических полей рассеяния на сфере". Материалы 39-ой НТК ТРТУ. Таганрог. 1993. С.120-123.
7. Abbasov I.B., Zagrai N.P., Pavlovsky A.W. "Physical processes of scattering non-linearly interacting waves by spherical dispersers". II International scientific-technical conference "Current problems of fundamental sciences". Moscow. 1994. V.3.
8. Аббасов И.Б. "Использование гидроакустической параметрической антенны для экологического мониторинга водных акваторий". Тезисы докладов XX НТК "Гагаринские чтения". Москва. МГАТУ. 1994. ч.4. С.13-14.
9. Аббасов И.Б., Заграй Н.П. "Рассеяние взаимодействующих плоских акустических волн на сфере" // Акуст. журн. 1994. Т.40. № 4. С.535-541.
10. Аббасов И.Б., Заграй Н.П. "Применение нелинейно-взаимодействующих акустических волн для диагностики водной среды". Тезисы докладов XVI Всероссийской конференции с международным участием по "Акустоэлектронике и физической акустике твердого тела". Сыктывкар. 1994. С.136-138.
11. Аббасов И.Б., Георги М.Ю. "Исследование неоднородностей водной среды с помощью параметрических антенн". Тезисы докладов II Всероссийской НТК "Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления". Таганрог. 1994. С.192-193.
12. Аббасов И.Б., Гарбуз А.М., Заграй Н.П. "Исследование рассеяния нелинейно-взаимодействующих волн на сфере". Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. 1994. № 1-2, С.8-13.
13. Аббасов И.Б., Кириченко И.А., Старченко И.Б. "Влияние реальных условий работы в Мировом океане на характеристики параметрических антенн". Сборник научных трудов молодых учёных ТРТУ. 1995. С.5-8.
14. Аббасов И.Б. "Использование нелинейно-взаимодействующих акустических волн для оценки экологического состояния водной среды". Тезисы докладов XXI НТК конференции "Гагаринские чтения". Москва. МГАТУ. 1995. ч.5. С.25-26.

15. Аббасов И.Б., Заграй Н.П. "Рассеяние на сфере нелинейно-взаимодействующих акустических волн" // Известия АН. Механика жидкости и газа. 1995. № 2.С.4-12.
16. Аббасов И.Б., Заграй Н.П. "Рассеяние акустического поля биологическими объектами в области нелинейного взаимодействия". Медицинские информационные системы. Таганрог. 1995. Вып.5. С.26-27.
17. Аббасов И.Б. "Методы проверки достоверности информации при проведении экспериментальных исследований рассеяния нелинейно-взаимодействующих волн на сфере". Тезисы докладов Всероссийской НТК "Новые информационные технологии". Таганрог. ТРТУ. 1995. С.166-167.
18. Abbasov I.B., Zagrai N.P."The nonlinear-interacting acoustic waves application for world ocean ecology monitoring". International conference "Fundamental and applied problems of environment protection". Tomsk. 1995. V.1. P.3.
19. Аббасов И.Б., Заграй Н.П. "Исследование гидроакустических сигналов, рассеянных от сферических неоднородностей водной среды" //Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 1995. № 4. С.94-95.
20. Abbasov I.B., Zagrai N.P. "Sphere scattering of nonlinear interacting acoustic waves" // Fluid Dynamics.(N.Y.) V.30. № 2. 1995. P.158-165.
21. Аббасов И.Б., Кириченко И.А., Тимошенко В.И. "Параметрические антенны в исследовании обратного рассеяния звука". 1995. Известия ТРТУ. № 1. С.124-127.
22. Аббасов И.Б., Заграй Н.П. "Экспериментальные исследования рассеяния нелинейно-взаимодействующих плоских акустических волн на сфере"// Акуст. журн. 1996. Т.42. № 3. С.309-314.
23. Аббасов И.Б. "Рассеяние поля акустической параметрической антенны на сферических рассеивателях с различными граничными условиями". Материалы международного научного конгресса студентов, аспирантов, молодых ученых "Молодежь и наука-третье тысячелетие". Таганрог. 1996. С.95-96.
24. Аббасов И.Б., Заграй Н.П. "Особенности экспериментальных исследований рассеяния поля параметрической антенны на жестких сферах". Тезисы докладов III Всероссийской НТК с международным участием "Теория цепей и сигналов". Таганрог. 1996. С.68-69.
25. Аббасов И.Б., Заграй Н.П. "Исследование акустических полей вторых гармоник при рассеянии на сфере нелинейно-

взаимодействующих плоских волн"//Акуст. журн. 1996.Т.42. № 4. С.453-458.

26. Аббасов И.Б., Заграй Н.П. "Исследование звукового поля волны суммарной частоты при рассеянии на сфере нелинейно-взаимодействующих плоских акустических волн". Труды III Международной НТК "Актуальные проблемы электронного приборостроения". Новосибирск. 1996. С.101-102.

27. Аббасов И.Б., Заграй Н.П. «Экспериментальные исследования рассеяния на жесткой сфере поля акустической параметрической антенны»//Журнал технич. физики. 1996. Т.66. № 11. С.162-170.

В работах, написанных в соавторстве, личный вклад автора состоит в следующем: автором диссертации в работах [1,2] проанализировано неоднородное волновое уравнение, описывающее процесс рассеяния звуковых волн на сфере и цилиндре; в работе [3] проведены предварительные расчеты диаграммы рассеяния амплитуды давления звуковой волны по разностной частоте; в работе [4] проведен анализ волновых размеров рассеивателя; в работе [5] в соавторстве описана методика широкополосного анализа рассеянных звуковых сигналов; в работе [6] проведены исследования выражения акустического давления волны разностной частоты по пространственным слагаемым; в работе [7] описан процесс рассеяния в геометрической постановке; в работе [9] получено асимптотическое выражение и проведен расчет акустического давления волны разностной частоты; в работе [10] анализированы неколлинеарные пространственные слагаемые общего акустического давления волны разностной частоты; в работе [11] проведено исследование диапазонов изменения волн вторичного поля; в работе [12] сняты экспериментальные диаграммы рассеяния стальных и пластмассовых сфер; в работе [13] проведена оценка влияния неоднородностей в ближней зоне на работу акустической параметрической антенны; в работе [15] рассчитаны и построены диаграммы рассеяния всех четырех пространственных слагаемых общего акустического давления волны разностной частоты; в работе [16] проведен анализ поведения диаграмм рассеяния волн вторичного поля; в работе [18] представлены экспериментальные диаграммы рассеяния общего акустического давления волны разностной частоты на жестких сферических рассеивателях с различными волновыми размерами; в работе [19] описаны особенности измерения диаграмм рассеяния при проведении эксперименталь-

ных исследований; в работе [20] получено решение неоднородного волнового уравнения в высокочастотном приближении; в работе [21] представлено выражение для общего акустического давления волны вторичного звукового поля; в работе [22] разработана экспериментальная установка, представлены диаграммы рассеяния волн первичного и вторичного полей на жестких сферических рассеивателях; в работе [24] проведены исследования гидроакустического преобразователя экспериментальной установки; в работе [25] получены асимптотические выражения и диаграммы рассеяния общего акустического давления вторых гармоник волн накачки, в работе [26] и [27] получены асимптотические выражения и диаграммы рассеяния общего акустического давления волны суммарной частоты.