

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

08

Журнал технической физики, т. 66, в. 11, 1996

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАССЕЯНИЯ
НА ЖЕСТКОЙ СФЕРЕ ПОЛЯ АКУСТИЧЕСКОЙ
ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ**

© И.Б.Аббасов, Н.П.Заграй

Таганрогский государственный радиотехнический университет,
Таганрог, Россия
(Поступило в Редакцию 14 февраля 1995 г.
В окончательной редакции 15 июня 1995 г.)

Задачи рассеяния плоских акустических монохроматических волн на сфере хорошо изучены [1,2], но случай рассеяния на сфере плоских нелинейно-взаимодействующих акустических волн исследован недостаточно [3,4]. В предлагаемой работе рассматриваются экспериментальные исследования рассеяния поля акустической параметрической антенны на объектах сферической формы. Теоретическое рассмотрение данной задачи приведено в работе [5], где дано описание волновых процессов, происходящих при рассеянии на жесткой сфере нелинейно-взаимодействующих высокочастотных волн накачки параметрической антенны. Падающие волны являются плоскими, а сферические рассеиватели находятся в области нелинейного взаимодействия высокочастотных акустических волн. Высокочастотные акустические волны продолжают взаимодействовать и после рассеяния на сфере, в результате которого за пределами сферического объема среды вокруг рассеивателя формируется вторичное поле. Это поле состоит из вторых гармоник падающих высокочастотных волн, а также волн с суммарной и разностной частотами.

В данной работе экспериментально исследуется как рассеянное поле исходных волн накачки параметрической антенны, так и рассеянное поле вторичных волн. Структурная схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Исходные волны накачки вырабатываются генератором 1 и формирователем 2, в котором находится встроенный генератор второй волны накачки. Формирователь 2 выдает радиоимпульсы с заполнением в виде биений волн накачки с длительностью 0.06–0.1 мс, максимальная частота следования этих импульсов составляет 200 Гц. Разностная частота между двумя высокочастотными

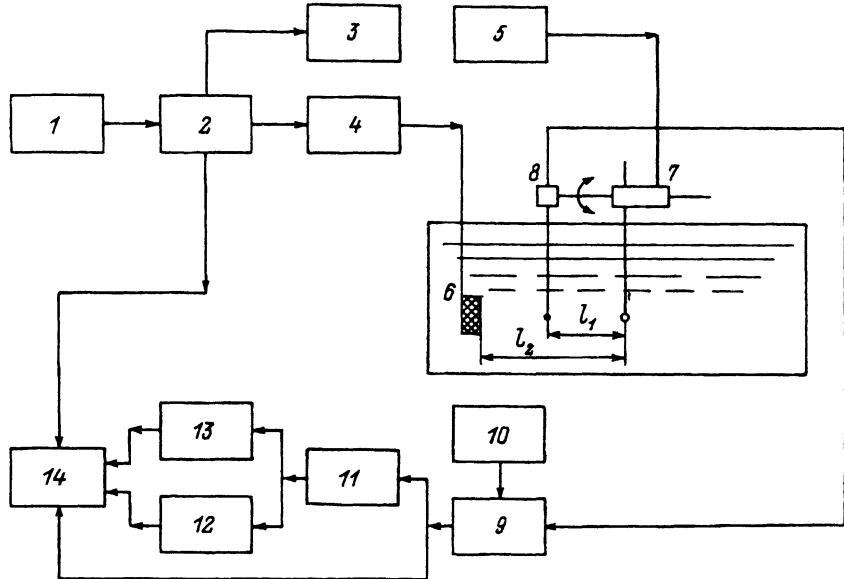


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки.

волнами накачки контролируется частотомером 3. Далее сформированный радиоимпульс усиливается до необходимого уровня усилителем мощности 4 и излучается в воду с помощью акустической параметрической антенны 6. В качестве акустической излучающей антенны используется пьезокерамический преобразователь с диаметром 30 мм и частотой резонанса 990 кГц. Полоса пропускания преобразователя составляет 150 кГц. Экспериментальные исследования проводились в бассейне размером 2100 × 1000 × 500 мм. На расстоянии $l_2 = 32$ см от излучающей антенны подвешивались стальные сферы диаметрами 11, 13 и 15 мм. Здесь необходимым условием подбора является соблюдение плоскостного падения волн накачки (размеры поверхности излучения параметрической антенны должны быть в несколько раз больше диаметра рассеивателя). Поэтому сферические рассеиватели находились в ближней зоне параметрической антенны, где падающие волны являются плоскими. Длина зоны дифракции волн накачки параметрической антенны на частоте 1 МГц равна 47 см. Рассеянные от стальной сферы импульсы принимались гидрофоном 8, в качестве чувствительного элемента которого использовался пьезокерамический цилиндр с диаметром 1 мм и высотой 1,5 мм. Гидрофон был прикреплен к рычагу поворотного устройства 7, электродвигатель которого подпитывался источником питания 5. Принятый с гидрофона сигнал усиливался предварительным гидрофонным усилителем 9, который в свою очередь подпитывался с источника питания 10. Далее сигнал поступал на усилитель напряжения 11, с выхода которого он подавался на низкочастотный 12 и высокочастотный 13 избирательные усилители. Сигналы с выхода предварительного усилителя 9 и с избирательных усилителей 12 или 13 в зависимости от частоты исследуемой волны одновременно подавались на синхронизированный с формирователем 2 двухканальный осциллограф 14.

Индикатрисы рассеяния снимались через 10° в пределах угла θ от 0 до 140° . Ограничение угла θ выше 140° было связано с тем, что рассеянный от сферы импульс начинал сливаться на экране осциллографа с прямым импульсом, излучаемым с антенны, которые попадали на гидрофон почти одновременно (задний фронт прямого импульса перекрывал передний фронт рассеянного). Индикатрисы рассеяния снимались также на трех фиксированных от сферического рассеивателя расстояниях $l_1 = 12, 20$ и 30 см.

Волновые размеры сфер относительно волн накачки (произведение волнового числа k на радиус сферы a соответственно для исходных волн накачки $f_1 - k_1$, $f_2 - k_2$, вторых гармоник $2f_1 - k_{2f_1}$, $2f_2 - k_{2f_2}$, суммарной волны $f_2 - k_2$ и разностной волны $f - k$) составляют $k_{1,2}a \approx 20$, для вторых гармоник волн накачки и суммарной частоты будут порядка 40. Единственной частотной компонентой, охватывающей почти все диапазоны рассеяния своими волновыми размерами остается волна разностной частоты, так как для остальных частотных компонент в области рэлеевского и резонансного рассеяния диаметры сферических рассеивателей будут составлять примерно 1 мм, что делает проведение измерений практически невозможным. Поэтому волна разностной частоты охватывает все три области рассеяния: ($ka < 1$) рэлеевская, ($ka \approx 1$) резонансная и ($ka > 1$) геометрическая.

Учитывая условие плосковолнового падения, для анализа экспериментальных результатов возьмем сферу с наименьшим диаметром, т.е. $d_1 = 11$ мм. Для того чтобы исследовать все волновые процессы, происходящие при рассеянии на жесткой сфере поля акустической параметрической антенны, необходимо описать сначала поле первичных волн накачки. В нашем случае вторая волна накачки f_2 оставалась постоянной и менялась только частота первой волны накачки f_1 . По первичному полю рассеяния волны накачки друг на друга не влияют, т.е. при подаче второй волны накачки поле первой волны накачки не меняется.

Первая волна накачки f_1 менялась в диапазоне от 943.2 до 1008.3 кГц (в зависимости от значения волны разностной частоты), а вторая волна накачки оставалась постоянной $f_2 = 1030$ кГц. Следует подчеркнуть, что рассеяние для волн накачки f_1 и f_2 носит линейный характер и с удалением от рассеивателя индикатрисы рассеяния не меняются. Экспериментально полученные для этих волн индикатрисы имеют характерные для геометрического рассеяния максимумы в направлениях $\theta = 0$ и $\pm 90^\circ$, и изменение волновых размеров сферических рассеивателей приводит к изменению углов расположения промежуточных максимумов индикатрис рассеяния.

Прежде чем перейти к рассмотрению вторичных волн, необходимо отметить, что для сферы с диаметром 11 мм все вторичные волны имеют один и тот же набор исходных волн накачки. На рис. 2 представлены индикатрисы рассеяния второй гармоники первой волны накачки $2f_1$ на сфере с диаметром 11 мм на расстоянии $l_1 = 20$ см, при этом $2f_1 = 2016.6$ ($k_{2f_1}a = 46.4$), 1973.2 ($k_{2f_1}a = 45.2$) и 1886.4 кГц ($k_{2f_1}a = 43.4$).

Индикатрисы рассеяния второй гармоники $2f_1$ в основном повторяют форму индикатрис самой волны накачки f_1 , но имеют и свои особенности, которые уже связаны непосредственно с нелинейным взаимодействием исходных волн накачки.

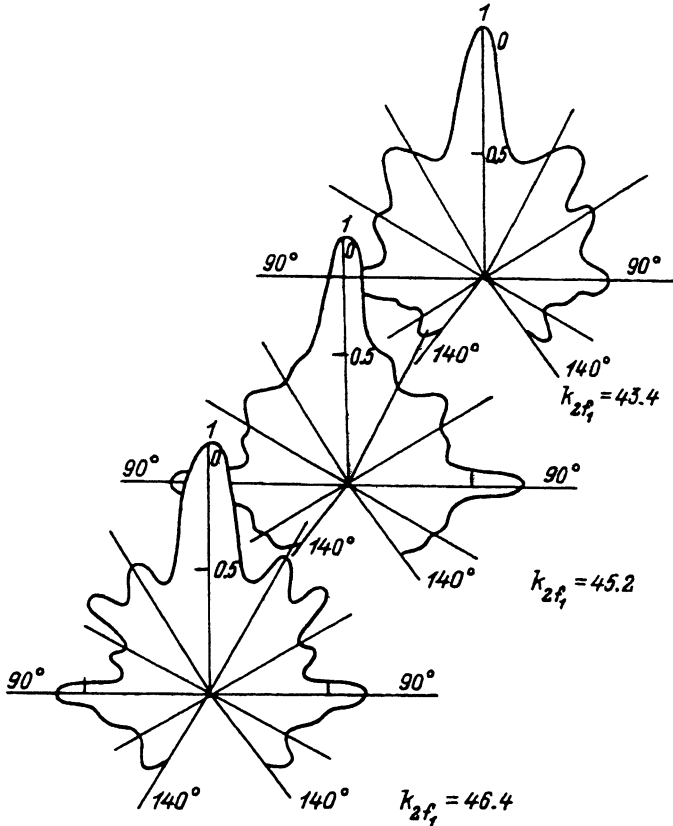


Рис. 2. Индикатрисы рассеяния второй гармоники первой волны накачки $2f_1$.

Необходимо отметить, что вторые гармоники, суммарная и разностная волны уже являются результатом нелинейного взаимодействия высокочастотных волн накачки, которые составляют первичное поле рассеяния, и следствием их взаимодействия является вторичное поле рассеяния, состоящее из четырех спектральных компонент.

На рис. 3 приведены индикатрисы рассеяния второй гармоники второй волны накачки $2f_2$ на сфере с диаметром 11 мм на расстоянии $l_1 = 20$ см, при этом для всех трех индикатрис $2f_2 = 2060$ кГц ($k_{2f_2}a = 47.2$). Однако индикатрисы рассеяния отличаются друг от друга, хотя они приведены для одного и того же значения частоты $2f_2$ и следовательно волнового числа $k_{2f_2}a$, меняется только первая волна накачки $f_1 = 1008.3, 986.6, 943.2$ кГц. Отсюда следует, что первая волна накачки f_1 влияет на вторую гармонику второй волны накачки $2f_2$; и наоборот (хотя исходные f_1 и f_2 друг на друга не влияют). Но так как на рис. 4 меняется также и частота волны накачки, поэтому гораздо труднее определить влияние второй волны накачки f_2 на вторую гармонику первой волны накачки $2f_1$ (этот момент дает преимущество случаю, когда частота второй волны накачки f_2 поддерживается постоянной). С другой стороны, этот факт подтверждает, что нелинейное взаимодействие между высокочастотными волнами накачки происходит в основном после рассеяния от сферы. Здесь следует подчеркнуть, что вторичные волны образуются частично и до рассея-

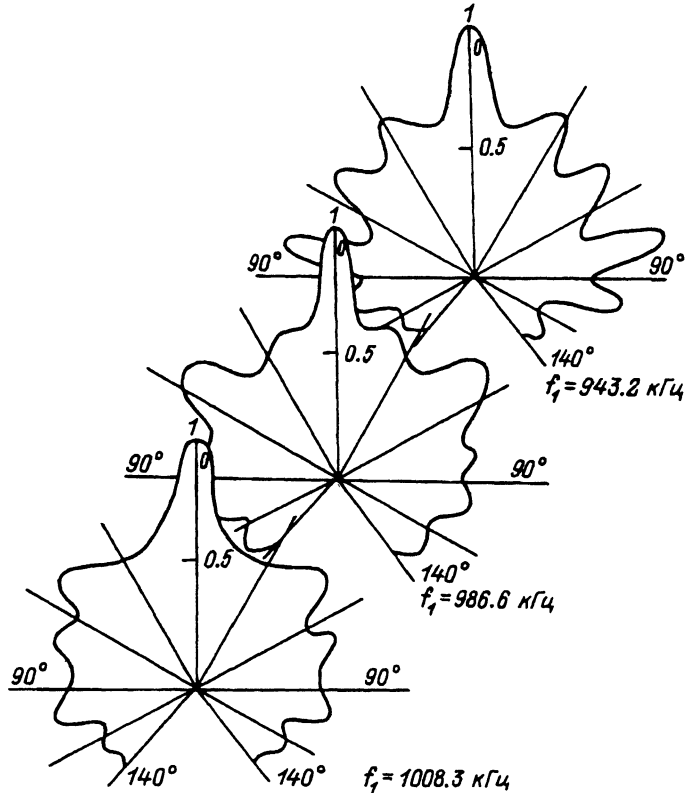


Рис. 3. Индикатрисы рассеяния второй гармоники второй волны накачки $2f_2$.

ния, т.е. падающая волна уже содержит вторичные волны и они также рассеиваются на сфере. Следовательно, приведенные индикатрисы также могут содержать некоторую часть вторых гармоник, рассеянных непосредственно на самой сфере, а не только тех, которые возникают вследствие нелинейного взаимодействия рассеянных волн накачки. Приведенные индикатрисы рассеяния второй гармоники второй волны накачки показывают, что вторые гармоники $2f_1$ и $2f_2$ являются именно результатом нелинейного взаимодействия уже рассеянных волн накачки параметрической антенны.

На рис. 4 приведены индикатрисы рассеяния волны разностной частоты F на сфере с диаметром 11 мм на расстоянии $l_1 = 20$ см, при этом $F = 21.7$ кГц с волновым числом $ka = 0.5$ ($f_2 = 1030$ кГц, $f_1 = 1008.3$ кГц); $F = 43.4$ кГц, $ka = 1$ ($f_1 = 986.6$ кГц); $F = 86.8$ кГц, $ka = 2$ ($f_1 = 943.2$ кГц). Индикатрисы рассеяния для волны разностной частоты наряду с основными максимумами в направлениях $\theta = 0$ и $\pm 90^\circ$ с увеличением волнового числа ka имеют некоторое усиление бокового рассеяния, вследствие которого индикатриса становится более равномерной.

Также были получены индикатрисы рассеяния волны разностной частоты на сфере с диаметром 11 мм для расстояний $l_1 = 12, 20$ и 30 см. Полученные индикатрисы показали, что в отличие от линейного рассеяния на сфере самих волн накачки рассеяние волны разностной ча-

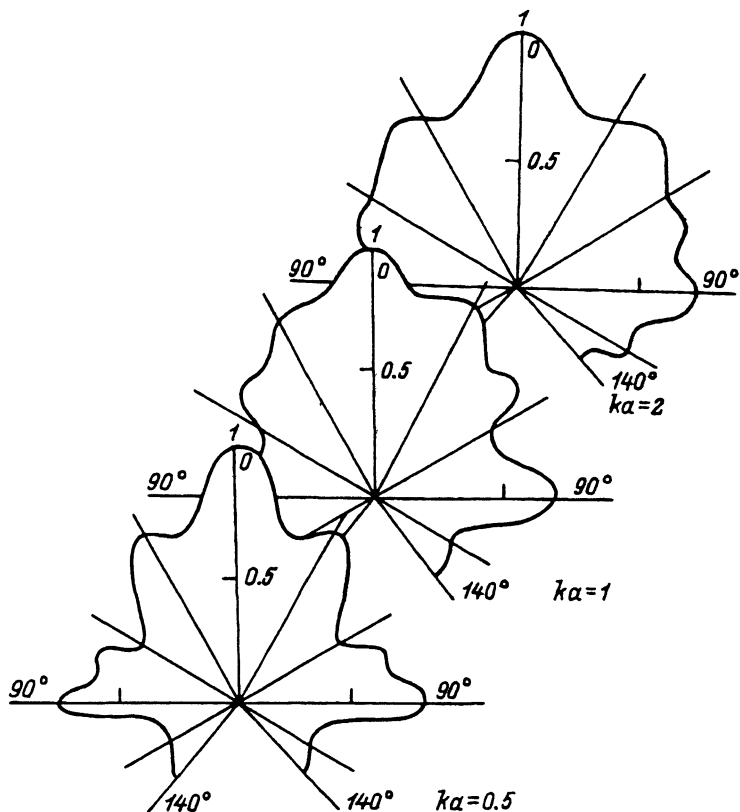


Рис. 4. Индикатрисы рассеяния разностной частоты F_0 .

стоты, являющейся результатом нелинейного взаимодействия тех же волн накачки, для различных расстояний l_1 имеет свои особенности. С удалением от рассеивателя индикатриса обужается в направлениях основных максимумов, т.е. с увеличением расстояния l_1 радиус переизлучающего сферического объема среды вокруг рассеивателя увеличивается и, следовательно, поле вторичных волн, создаваемое этой переизлучающей сферической параметрической антенной, становится более направленной, что подтверждается теоретическими расчетами, приведенными в работе [5].

Для волны разностной частоты еще были получены индикатрисы рассеяния на сферах с диаметром $d_1 = 11$ мм, $d_2 = 13$ мм и $d_3 = 15$ мм, но с одинаковыми волновыми размерами (т.е. для каждой сферы волна разностной частоты имела свое значение) на расстоянии $l_1 = 20$ см. Их анализ показал, что с увеличением диаметра сфер наблюдаются обужение в направлении основных максимумов, а также уменьшение рассеяния в направлениях угла $\theta = \pm 90^\circ$, т.е. перпендикулярных к падающей волне. Это свидетельствует о том, что с увеличением диаметра сферического рассеивателя начинает проявляться неравномерность амплитуды падающей волны по поверхности сферы, что в свою очередь приводит к уменьшению уровня рассеяния в перпендикулярном направлении.

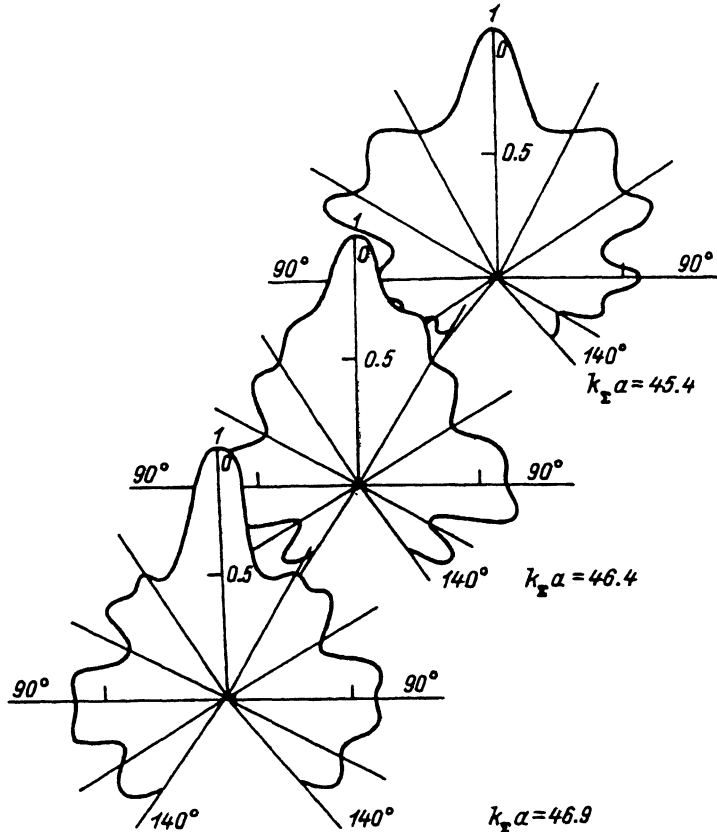


Рис. 5. Индикатрисы рассеяния волны суммарной частоты F_{Σ} ($f_2 = 1030$ кГц постоянна).

На рис. 5 приведены индикатрисы рассеяния волны суммарной частоты F_{Σ} на сфере с диаметром 11 мм на расстоянии $l_1 = 20$ см, при этом $F_{\Sigma} = 2038.3$ ($k_{\Sigma}a = 46.9$, $f_1 = 1008.3$ кГц), 2016.6 ($k_{\Sigma}a = 46.4$, $f_1 = 986.6$ кГц), $F_{\Sigma} = 1973.2$ кГц ($k_{\Sigma}a = 45.4$, $f_1 = 943.2$ кГц).

Зависимости индикатрис на рис. 2–5 представляют динамику их изменения отдельно по каждой частотной составляющей. Однако для представления полной картины происходящих волновых процессов при рассеянии поля параметрической антенны на сфере необходимо их комплексное рассмотрение для выявления закономерностей, которое становится возможным с помощью рис. 6, где приведены индикатрисы рассеяния всех частотных составляющих рассеянного поля для сферы с диаметром 11 мм.

На рис. 6 представлены совмещенные индикатрисы рассеяния в относительных масштабах на расстоянии $l_1 = 12$ см как по волнам накачки $f_1 = 995.3$ кГц и $f_2 = 1030$ кГц, так и по вторичным волнам $2f_1 = 1990.6$ кГц, $2f_2 = 2060$ кГц, $F_{\Sigma} = 2025.3$ кГц и $F = 34.7$ кГц. Анализ рис. 6 начнем с индикатрис волн накачки, которые имеют как совпадающие участки по разным направлениям, так и расходящие. Это означает, что в направлениях совпадения наблюдается чистое биение в рассеянном импульсе двух высокочастотных волн накачки, т.е. их амплитуды по уровням являются одинаковыми, но, как только мы пе-

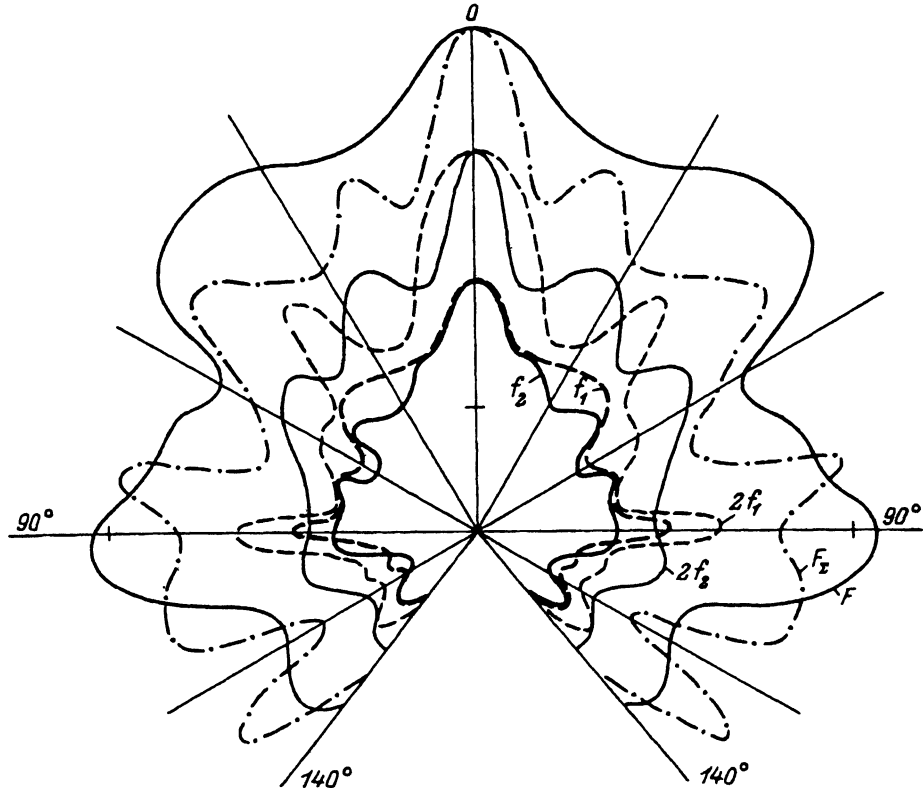


Рис. 6. Индикатрисы рассеяния для волн накачки f_1 , f_2 и для вторичных волн.

переходим в область, где индикатрисы начинают расходиться, в рассеянном импульсе наблюдается нарушение баланса амплитуд (расплывание узлов) вследствие различия уровней амплитуд волн накачки. На тех участках, где индикатрисы совпадают, происходит максимальная генерация волн разностной и суммарной частот, а при нарушении баланса амплитуд на участках расхождения происходит максимальная генерация второй гармоники превосходящей волны накачки. Несмотря на то что вторые гармоники в основном по форме повторяют индикатрисы рассеяния исходных волн накачки, они действуют почти в полной противофазе друг с другом, т.е. максимуму $2f_1$ соответствует минимум по $2f_2$, и наоборот. На тех участках, где индикатрисы волн накачки имеют наименьшее расхождение, наблюдаются максимумы по разностной и суммарной частотам. По сути дела индикатриса разностной волны является своего рода усредненным приближением более неравномерной индикатрисы суммарной волны, т.е. для разностной и суммарной волн, волновые размеры самого сферического рассеивателя почти никакой роли не играют, так как они генерируются рассеянными на сфере высокочастотными волнами накачки, а не рассеиваются непосредственно сами на сфере. Поэтому индикатрисы разностной и суммарной волн естественно зависят как от соотношения индикатрис волн накачки, так и от расстояния до рассеивателя, где происходит нелинейное взаимодействие между высокочастотными волнами накачки. Следовательно, при одних и тех же исходных вол-

нах накачки с увеличением расстояния до рассеивателя индикатриса начинает обужаться.

В целом необходимо отметить, что в случае рассеяния высокочастотных волн накачки параметрической антенны на сфере при нахождении ее в области нелинейного взаимодействия вторичные волны генерируются в основном уже рассеянными волнами накачки и их волновые характеристики определяются не только размерами самого сферического рассеивателя, но и протяженностью сферического объема вокруг него, в котором происходит нелинейное взаимодействие между исходными волнами накачки. Для того чтобы анализировать поведение индикатрис по вторичным волнам, необходимо точное представление всей картины происходящих волновых процессов по исходному полю нелинейно-взаимодействующих высокочастотных акустических волн.

Список литературы

- [1] Рэлей Л. Теория звука. Т. 2. М.: Гостехиздат, 1955. 578 с.
- [2] Лепендин Л.Ф. Акустика. М.: Высшая школа, 1978. 298 с.
- [3] Поддубняк А.П., Пороховский В.В. // Акуст. журн. 1988. Т. 34. № 5. С. 919-924.
- [4] Лямшев Л.М., Саков П.В. // Акуст. журн. 1992. Т. 38. № 1. С. 100-107.
- [5] Аббасов И.Б., Заграй Н.П. // Акуст. журн. 1994. Т.40. № 4. С. 535-541.

ГАЗОДИНАМИКА ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧАЮЩЕГО РАЗРЯДА В СМЕСИ ПАРОВ НАТРИЯ С КСЕНОНОМ

© Ф.Г.Бакшт, В.Ф.Лапшин

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
(Поступило в Редакцию 3 августа 1995 г.)

1. Одним из актуальных направлений исследований в современной светотехнике является создание безртутных маломощных натриевых ламп высокого давления [1,2]. Наиболее перспективные разработки таких ламп опираются на использование импульсного разряда в смеси паров Na с Xe [3,4]. Исследованию маломощных импульсных дуг с относительно плавным нарастанием тока ($dI/dt \sim 10^5 - 10^6$ А/с) посвящен ряд работ [5-8]. В таких дугах разогрев плазмы происходит относительно медленно, так что полное давление плазмы P в каждый момент времени t успевает выравниваться по радиусу газоразрядной трубки, а радиальные перемещения газа происходят с существенно дозвуковыми скоростями. Расчету импульсных дуг небольшой мощности посвящены работы [7,8]. В этих работах, однако, пренебрегалось радиальным проскальзыванием компонент плазмы относительно друг друга и состав газовой смеси считался заданным: фиксировалось отношение концентраций компонент газовой смеси.