

УДК 534.222.2

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАССЕЯНИЯ НЕЛИНЕЙНО ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ПЛОСКИХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН НА СФЕРЕ

© 1996 г. И. Б. Аббасов, Н. П. Заграй

Таганрогский государственный радиотехнический университет  
347928 Таганрог, пер. Некрасовский, 44

Поступила в редакцию 14.02.95 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований рассеяния на сфере нелинейно-взаимодействующих плоских волн накачки акустической параметрической антенны. Сферические рассеиватели находятся в зоне взаимодействия высокочастотных волн накачки. Анализируются полученные индикатрисы рассеяния как первичных волн накачки, так и вторичных волн комбинационных частот.

Классические задачи рассеяния плоских акустических волн на сфере хорошо изучены [1, 2], однако рассеяние на сфере плоских нелинейно взаимодействующих акустических волн исследовано недостаточно [3, 4]. В данной работе рассматриваются экспериментальные исследования рассеяния нелинейно взаимодействующих плоских волн на сферических объектах. Теоретическое рассмотрение этой задачи приведено в работе [5], где дано описание физических волновых процессов при рассеянии на сфере высокочастотных нелинейно взаимодействующих волн накачки параметрической антенны. Падающие волны являются плоскими, а сферический рассеиватель располагается в области нелинейного взаимодействия волн накачки. Рассеиваясь, волны накачки продолжают взаимодействовать в пространстве сферического слоя вокруг рассеивателя. В результате их нелинейного взаимодействия рассеяние наблюдается и для вторичных волн, т.е. для вторых гармоник исходных высокочастотных волн накачки, а также их суммарной и разностной частот.

В предлагаемой работе экспериментально исследуется как рассеянное поле волн накачки, так и рассеянные поля вторичных волн. Структурная схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Исходные волны накачки вырабатываются генератором 1 и формирователем 2, в котором находится встроенный генератор второй волны накачки. Формирователь 2 выдает импульсы с длительностью 0.06–0.1 мс с частотой следования 200 Гц. Разностная частота между двумя волнами накачки контролируется частотомером 3. Далее сформированный импульс усиливается до необходимого уровня усилителем 4 и излучателем в воду с помощью акустической антенны 6. В качестве акустической излучающей антенны используется пьезокерамический преобразователь с диаметром 30 мм и с частотой резонанса 990 кГц.

Полоса пропускания преобразователя составляет 150 кГц. Измерения проводились в бассейне с размерами 2100 × 1000 × 500 мм. На расстоянии  $l_2 = 32$  см от излучающей антенны была подвешена металлическая сфера. В измерениях использовались стальные сферы с диаметром 11, 13 и 15 мм. Сферические рассеиватели находились в ближней зоне параметрической антенны, где падающая волна является плоской. Длина зоны дифракции антенны на частоте 1 МГц равна ≈ 47 см. Рассеянные от сферы импульсы принимались гидрофоном 8; в качестве чувствительного элемента которого использовался пьезокерамический цилиндр с диаметром 1 и высотой 1.5 мм. Гидрофон был прикреплен к рычагу поворотного устройства 7, электродвигатель которого подпитывался источником питания 5. Принятый сигнал усиливался предварительным гидрофонным усилителем 9, который в свою очередь подпитывался источником 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 на разных расстояниях от сферического рассеивателя  $l_1 = 12, 20$  и  $30$  см в зависимости от угла в интервале от  $0^\circ$  до  $140^\circ$  через  $10^\circ$ . При  $\theta > 140^\circ$  рассеянный от сферы импульс начинал сливаться на экране осциллографа с прямым импульсом, излучаемым антенной, которые попадали на гидрофон почти одновременно (задний фронт прямого импульса перекрывал передний фронт рассеянного).

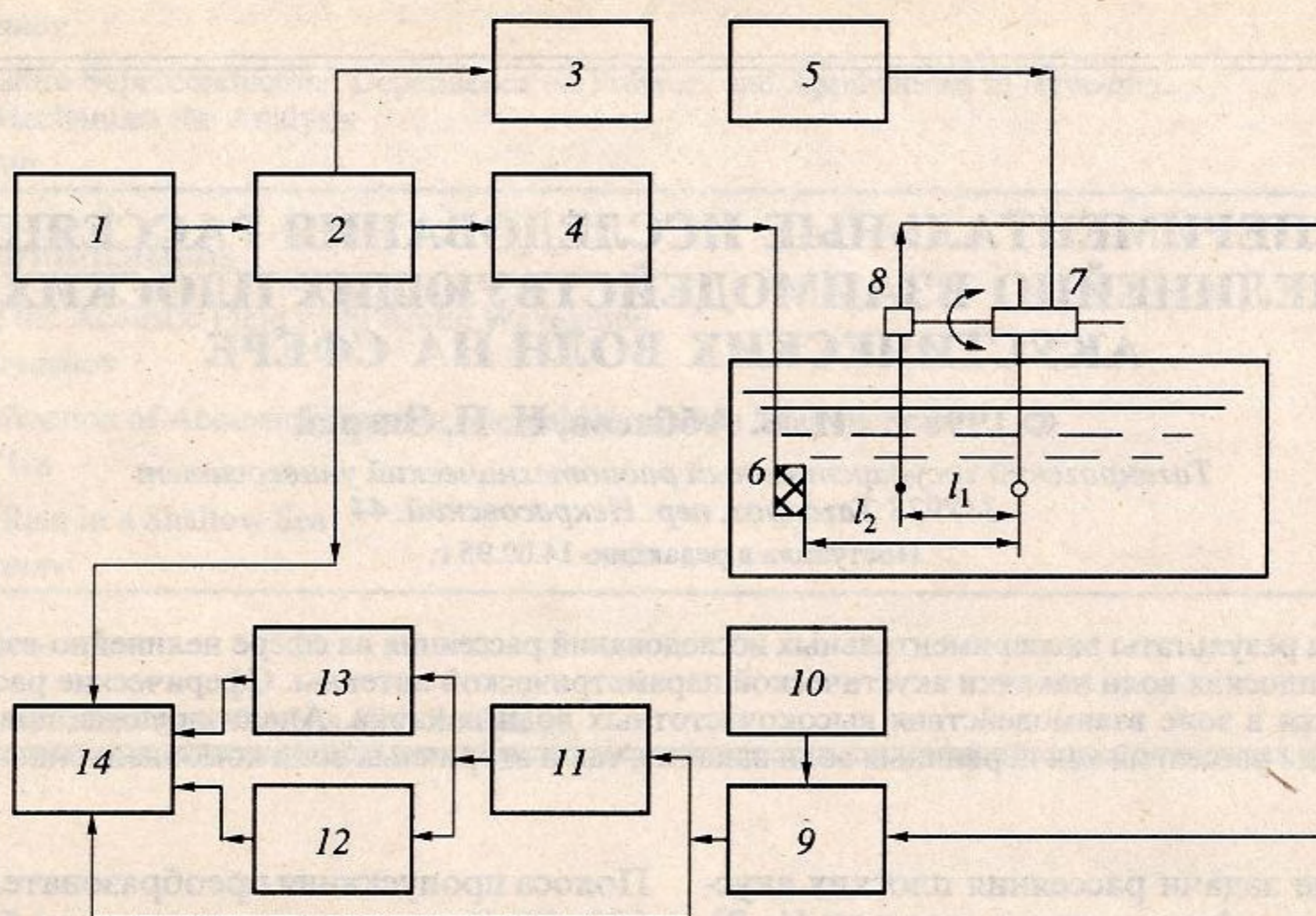


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки.

Волновые размеры сфер (произведение волнового числа  $k$  на радиус сферы  $a$ , соответственно при этом для  $f_1 - k_1; f_2 - k_2; F_{\Sigma} - k_{\Sigma}; F - k; 2f_1 - k_{2f_1}; 2f_2 - k_{2f_2}$ ) составляют для волн накачки  $\approx 20$ , а для вторых гармоник суммарной частоты — порядка 40. Для них в области рэлеевского и резонансного рассеяния диаметры сферических рассеивателей должны составлять меньше 1 мм, что делает проведение лабораторных измерений практически невозможными.

Единственной частотной компонентой, для которой экспериментально возможны все три области рассеяния: ( $ka < 1$ ) рэлеевская; ( $ka \approx 1$ ) резонансная и ( $ka > 1$ ) геометрическая при используемых размерах сфер остается волна разностной частоты.

Чтобы для рассеивателя падающая волна считалась плоской, в экспериментах использовалась сфера с наименьшим диаметром, равным  $d_1 = 11$  мм. Первичное поле рассеяния состоит из рассеянных высокочастотных волн накачки  $f_1$  и  $f_2$ . В нашем случае частота  $f_2$  оставалась постоянной, а менялась только частота первой волны накачки  $f_1$ .

На рис. 2 представлены индикатрисы рассеяния первой волны накачки для сферы с диаметром 11 мм на расстоянии  $l_1 = 20$  см от центра сферы для различных частот:  $f_1 = 1008.3$  кГц ( $k_1 a = 23.2$ );  $f_1 = 986.6$  кГц ( $k_1 a = 22.6$ );  $f_1 = 943.2$  кГц ( $k_1 a = 21.7$ ). При этом разностная частота будет иметь соответствующие значения:  $F = 21.7$  кГц ( $ka = 0.5$ );  $F = 43.4$  кГц ( $ka = 1$ );  $F = 86.8$  кГц ( $ka = 2$ ).

На рис. 3 приведены индикатрисы рассеяния второй волны накачки частоты  $f_2 = 1030$  кГц ( $k_2 a = 23.6$ ) с увеличением расстояния от рассеивателя. Следует отметить, что рассеяние для волн накачки  $f_1$  и  $f_2$  носит линейный характер и с удалением от рассеивателя индикатриса рассеяния почти не меняется. Индикатрисы имеют характерные для геометрического рассеяния максимумы в направлениях  $\theta = 0^\circ$  и  $\pm 90^\circ$ . С увеличением волновых размеров рассеивателя происходит только некоторое изменение углов расположения промежуточных максимумов индикатрис рассеяния.

На рис. 4 представлены индикатрисы рассеяния второй гармоники первой волны накачки на сфере с диаметром 11 мм на расстоянии  $l_1 = 20$  см для значений частоты  $f_1$ , указанных на рис. 2:  $2f_1 = 2016.6$  кГц ( $k_{2f_1} a = 46.4$ );  $2f_1 = 1973.2$  кГц ( $k_{2f_1} a = 45.2$ );  $2f_1 = 1886.4$  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  $f_1$  и  $f_2$ .

На рис. 5 приведены индикатрисы рассеяния второй гармоники второй волны накачки  $2f_2 = 2060$  кГц ( $k_{2f_2} a = 47.2$ ) на сфере с диаметром 11 мм на расстоянии  $l_1 = 20$  см.

Однако индикатрисы рассеяния отличаются друг от друга, хотя они приведены для одного и того же значения частоты и, следовательно,

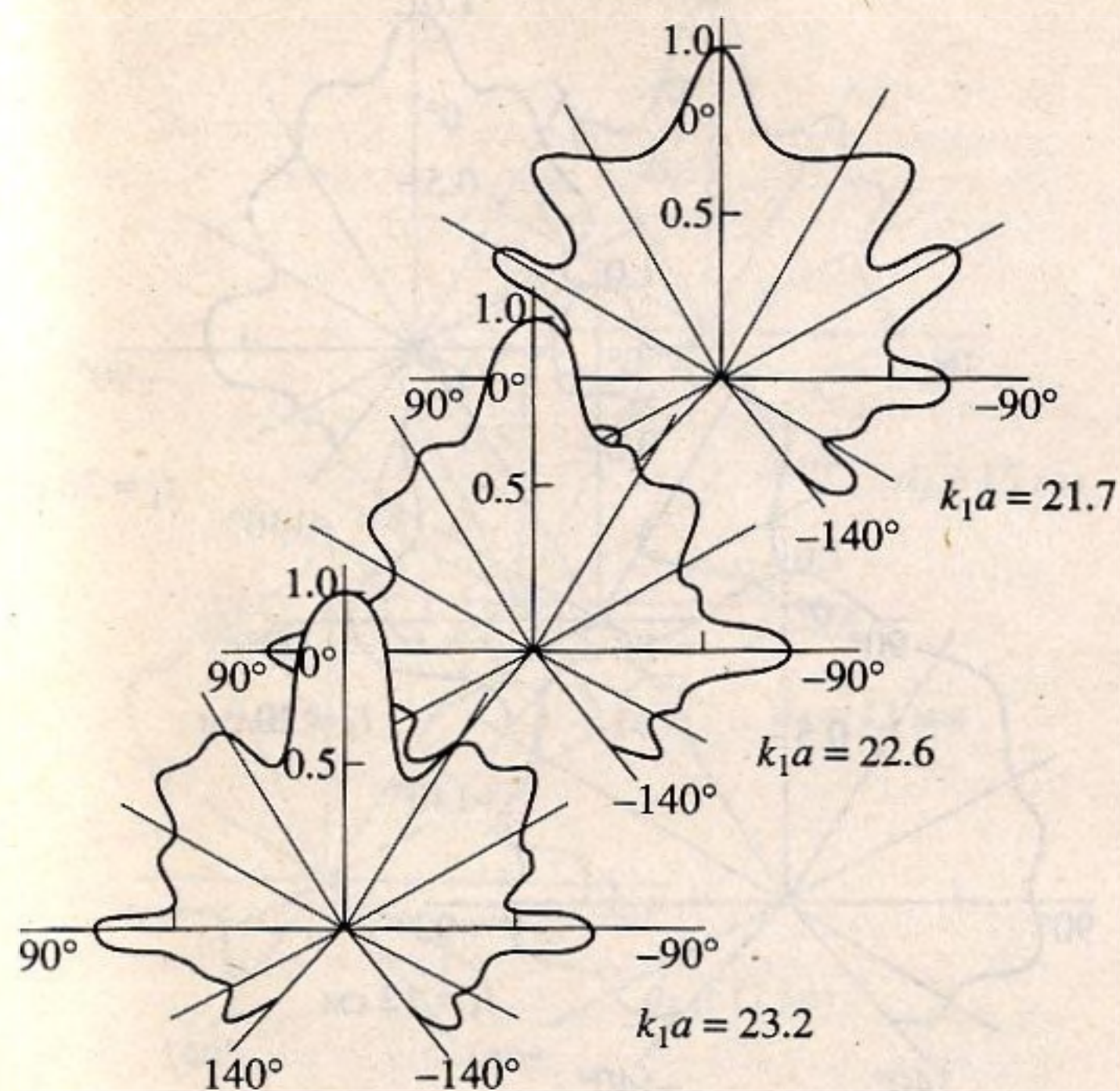


Рис. 2. Индикатрисы рассеяния первой волны накачки  $f_1$  на сфере с диаметром 11 мм на расстоянии  $l_1 = 20$  см для различных волновых чисел:  $f_1 = 1008.3$  кГц ( $k_1a = 23.2$ );  $f_1 = 986.6$  кГц ( $k_1a = 22.6$ );  $f_1 = 943.2$  кГц ( $k_1a = 21.7$ ).

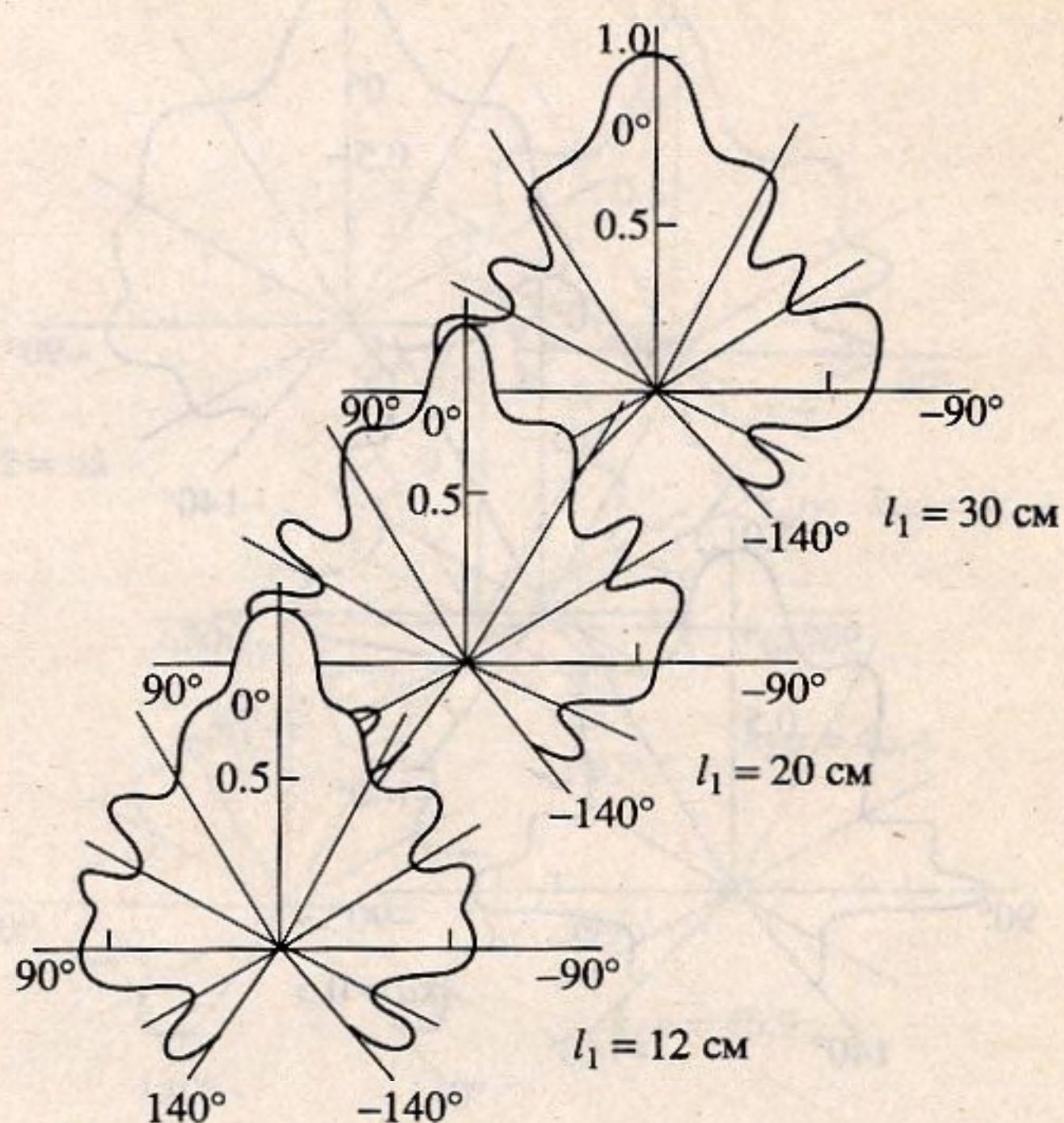


Рис. 3. Индикатрисы рассеяния второй волны накачки  $f_2 = 1030$  кГц ( $k_2a = 23.6$ ) на сфере с диаметром 11 мм для расстояний  $l_1 = 12; 20; 30$  см.

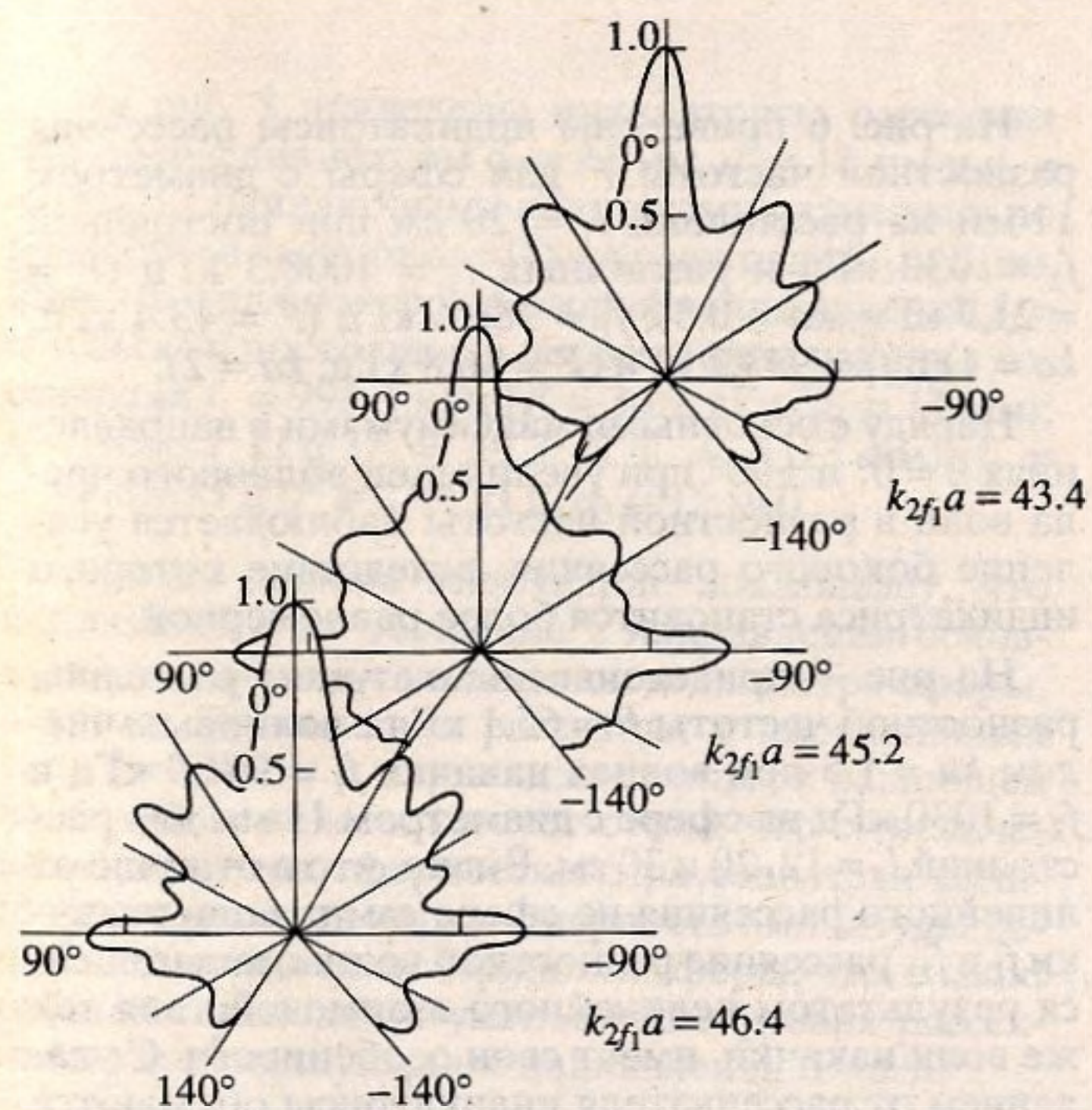


Рис. 4. Индикатрисы рассеяния второй гармоники первой волны накачки  $2f_1$  на сфере с диаметром 11 мм на расстоянии  $l_1 = 20$  см:  $2f_1 = 2016.6$  кГц ( $k_{2f_1}a = 46.4$ );  $2f_1 = 1973.2$  кГц ( $k_{2f_1}a = 45.2$ );  $2f_1 = 1886.4$  кГц ( $k_{2f_1}a = 43.4$ ).

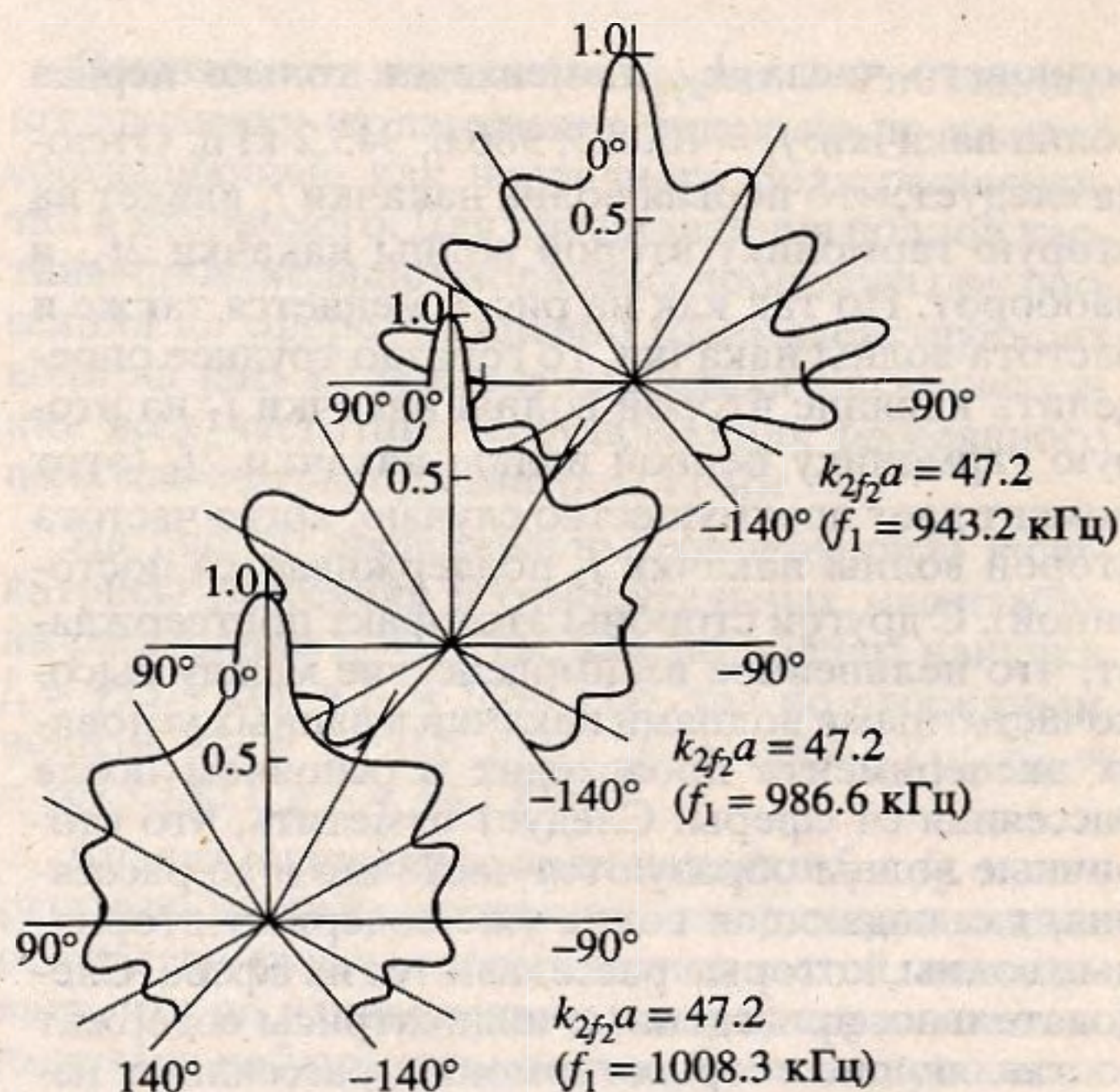
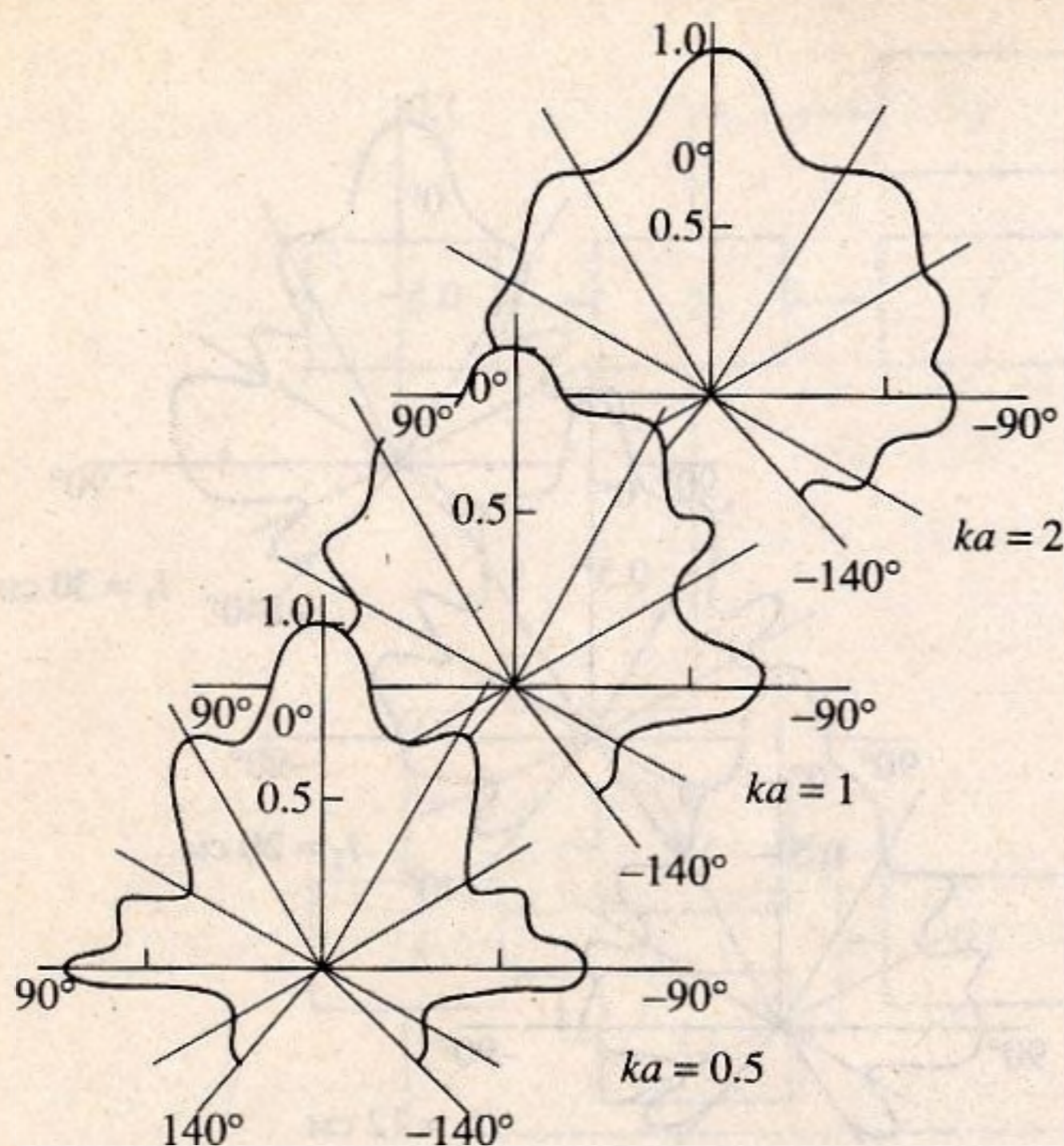


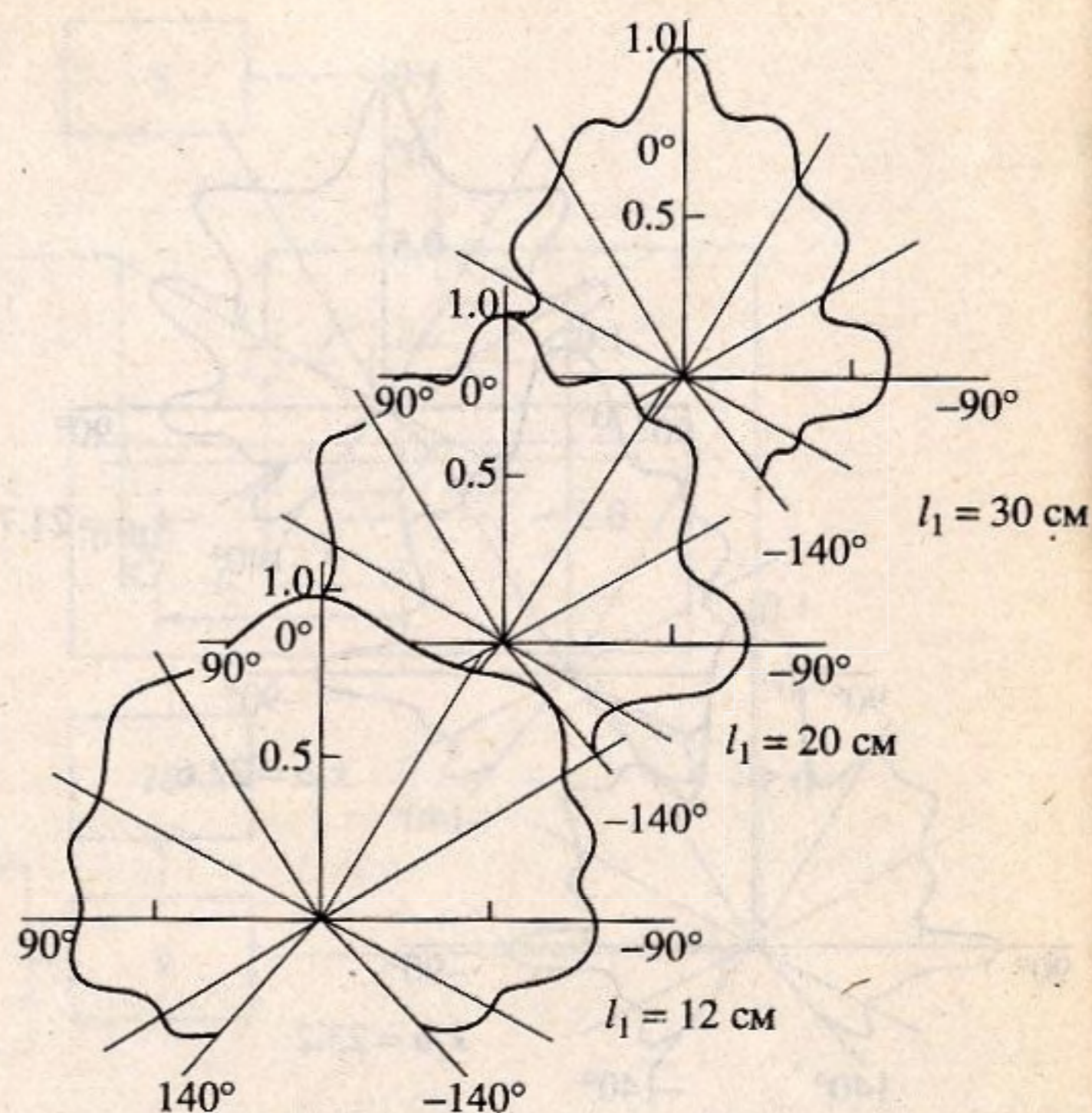
Рис. 5. Индикатрисы рассеяния второй гармоники второй волны накачки  $2f_2 = 2060$  кГц ( $k_{2f_2} = 47.2$ ) на сфере с диаметром 11 мм на расстоянии  $l_1 = 20$  см при различных значениях первой волны накачки  $f_1 = 1008.3$  кГц;  $986.6$  кГц;  $943.2$  кГц.



**Рис. 6.** Индикатрисы рассеяния разностной частоты  $F$  на сфере с диаметром 11 мм на расстоянии  $l_1 = 20$  см для различных волновых чисел:  $F = 21.7$  кГц  $ka = 0.5$  ( $f_1 = 1008.3$  кГц,  $f_2 = 1030$  кГц);  $F = 43.4$  кГц  $ka = 1$  ( $f_1 = 986.6$  кГц,  $f_2 = 1030$  кГц);  $F = 86.8$  кГц  $ka = 2$  ( $f_1 = 943.2$  кГц,  $f_2 = 1030$  кГц).

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. Но так как на рис. 4 меняется также и частота волны накачки, то 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 в данных условиях эксперимента происходит в основном после рассеяния от сферы. Следует отметить, что вторичные волны образуются частично и до рассеяния, т.е. падающая волна уже содержит вторичные волны, которые рассеиваются на сфере. Следовательно, приведенные индикатрисы содержат составляющие вторых гармоник, рассеянных непосредственно на самой сфере, помимо генерируемых рассеянными волнами накачки.

Приведенные индикатрисы рассеяния второй гармоники второй волны накачки  $2f_2$  показывают, что вторые гармоники являются именно результатом нелинейного взаимодействия рассеянных волн накачки.

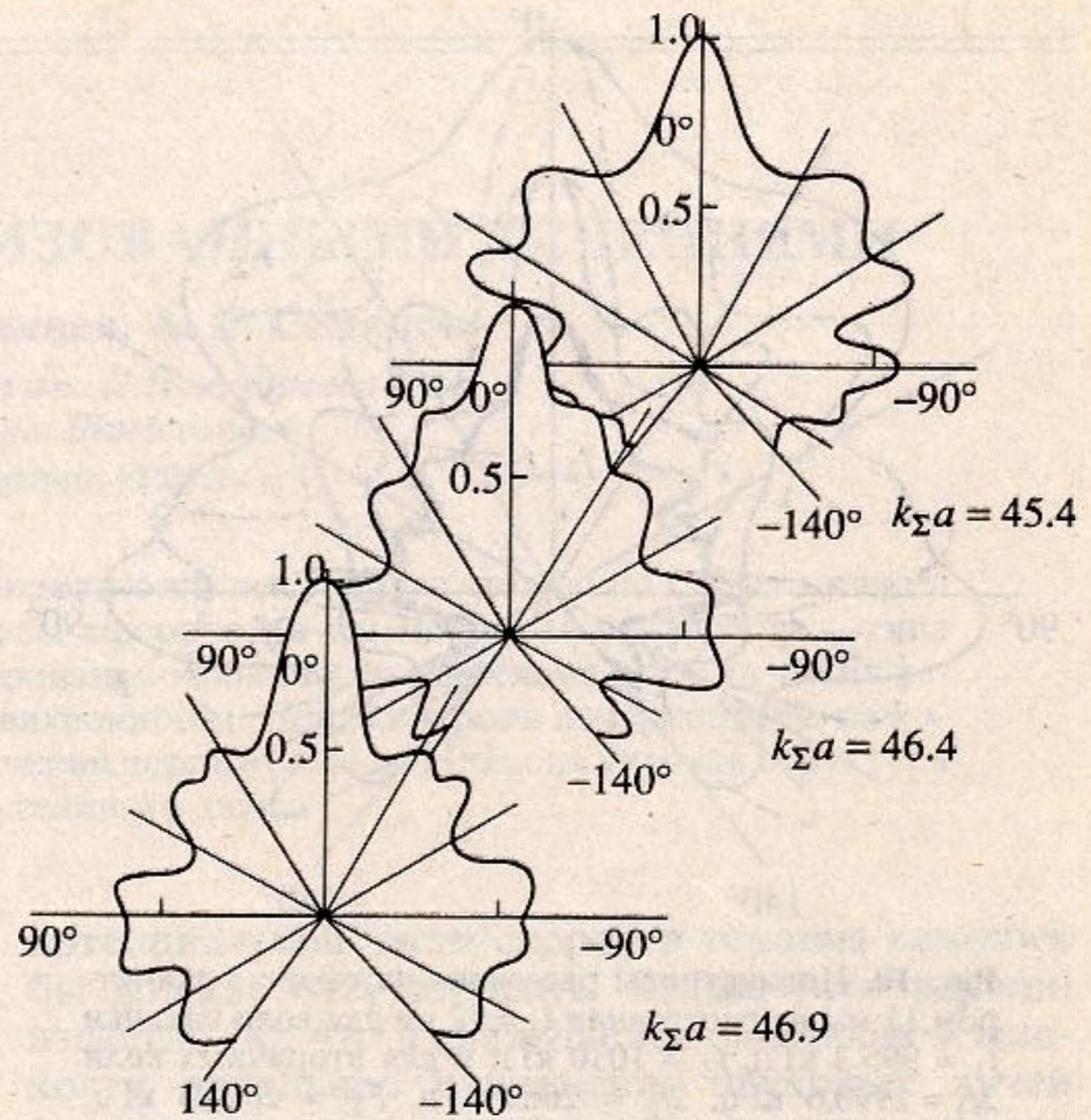
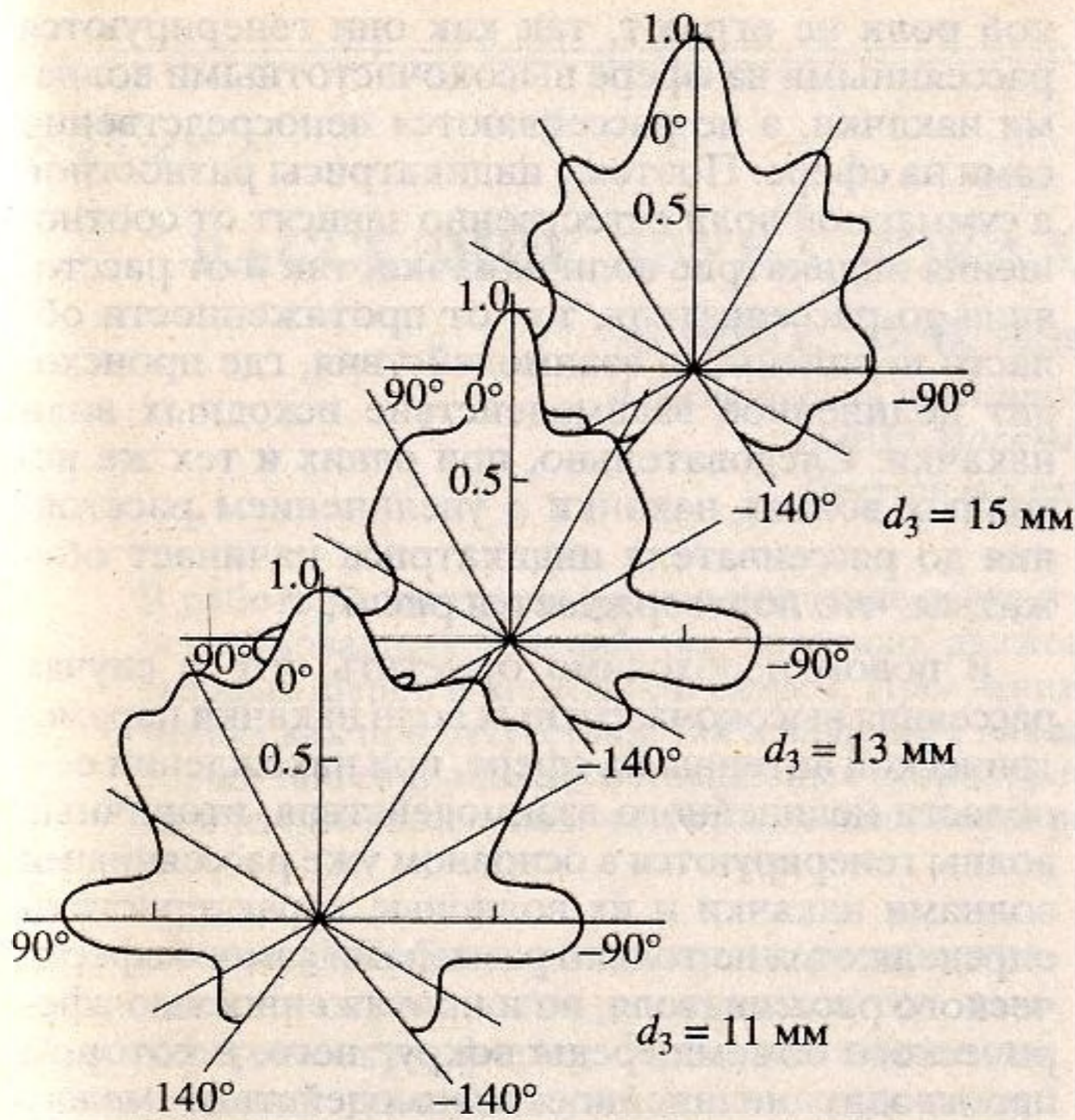


**Рис. 7.** Индикатрисы рассеяния разностной частоты  $F = 65.1$  кГц с волновым числом  $ka = 1.5$  при волнах накачки  $f_1 = 964.9$  кГц и  $f_2 = 1030$  кГц на сфере с диаметром 11 мм для расстояний  $l_1 = 12; 20; 30$  см.

На рис. 6 приведены индикатрисы рассеяния разностной частоты  $F$  для сферы с диаметром 11 мм на расстоянии  $l_1 = 20$  см при постоянной  $f_2 = 1030$  кГц и различных  $f_1 = 1008.3$  кГц ( $F = 21.7$  кГц,  $ka = 0.5$ );  $f_1 = 986.6$  кГц ( $F = 43.4$  кГц,  $ka = 1$ ) и  $f_1 = 943.2$  кГц ( $F = 86.8$  кГц,  $ka = 2$ ).

Наряду с основными максимумами в направлениях  $\theta = 0^\circ$  и  $\pm 90^\circ$  при увеличении волнового числа волн в разностной частоте наблюдается усиление бокового рассеяния, вследствие которого индикатриса становится более равномерной.

На рис. 7 приведены индикатрисы рассеяния разностной частоты  $F = 65.1$  кГц с волновым числом  $ka = 1.5$  при волнах накачки  $f_1 = 964.9$  кГц и  $f_2 = 1030$  кГц на сфере с диаметром 11 мм для расстояний  $l_1 = 12, 20$  и  $30$  см. Видно, что в отличие от линейного рассеяния на сфере самих волн накачки  $f_1$  и  $f_2$ , рассеяние разностной волны, являющейся результатом нелинейного взаимодействия тех же волн накачки, имеет свои особенности. С удалением от рассеивателя индикатрисы обужаются в направлениях основных максимумов, т.е. с увеличением расстояния  $l_1$  вокруг рассеивателя увеличивается протяженность области нелинейного взаимодействия, и поле вторичных волн становится более направленным, что подтверждается теоретическими расчетами, приведенными в работе [5].



**Рис. 8.** Индикатрисы рассеяния сфер с одинаковыми волновыми размерами  $ka = 0.8$  (при постоянных  $f_2 = 1030$  кГц) на расстоянии  $l_1 = 20$  см при диаметрах:  $d_1 = 11$  мм ( $F = 34.7$  кГц,  $f_1 = 995.3$  кГц);  $d_2 = 13$  мм ( $F = 29.3$  кГц,  $f_1 = 1000.7$  кГц);  $d_3 = 15$  мм ( $F = 21.6$  кГц,  $f_1 = 1008.4$  кГц).

**Рис. 9.** Индикатрисы рассеяния волны суммарной частоты  $F_\Sigma$  на сфере с диаметром 11 мм на расстоянии  $l_1 = 20$  см для различных волновых чисел ( $f_2 = 1030$  кГц постоянна):  $F_\Sigma = 2038.3$  кГц  $k_\Sigma a = 46.9$ ;  $F_\Sigma = 2016.6$  кГц  $k_\Sigma a = 46.4$ ;  $F_\Sigma = 1973.2$  кГц  $k_\Sigma a = 45.4$ .

На рис. 8 приведены индикатрисы рассеяния для сфер с диаметром  $d_1 = 11$  мм,  $d_2 = 13$  мм и  $d_3 = 15$  мм с одинаковыми волновыми размерами по разностной частоте  $ka = 0.8$  на расстояние  $l_1 = 20$  см. При этом для всех сфер вторая волна накачки  $f_2 = 1030$  кГц постоянна, а первая волна накачки составляла  $f_1 = 995.3$  кГц ( $F = 34.7$  кГц,  $d_1 = 11$  мм);  $f_1 = 1000.7$  кГц ( $F = 29.3$  кГц,  $d_2 = 13$  мм),  $f_1 = 1008.4$  кГц ( $F = 21.6$  кГц,  $d_3 = 15$  мм).

Зависимости индикатрис на рис. 2–9 показывают динамику их изменения отдельно по каждой составляющей, как первичного поля рассеяния, так и вторичного. Для представления полной картины происходящих волновых процессов при рассеянии на сфере нелинейно взаимодействующих волн на рис. 10 приведены индикатрисы рассеяния всех частотных составляющих рассеянного поля для сферы с диаметром 11 мм.

Анализ данных индикатрис показывает, что наблюдается их обужение в направлении основных максимумов с увеличением диаметра сферы, 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  $\theta = \pm 90^\circ$ .

На рис. 10 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 по вторичным волнам  $2f_1 = 1990.6$  кГц;  $2f_2 = 2060$  кГц;  $F_\Sigma = 2025.3$  кГц и  $F = 34.7$  кГц.

На рис. 9 приведены индикатрисы рассеяния суммарной частоты  $F_\Sigma$  для сферы с диаметром 11 мм на расстоянии  $l_1 = 20$  см. Вторая волна накачки  $f_2 = 1030$  кГц постоянна, а первая волна накачки составляла  $f_1 = 1008.3$  кГц ( $F_\Sigma = 2038.3$  кГц,  $k_\Sigma a = 46.9$ );  $f_1 = 986.6$  кГц ( $F_\Sigma = 2016.6$  кГц,  $k_\Sigma a = 46.4$ );  $f_1 = 943.2$  кГц ( $F_\Sigma = 1973.2$  кГц,  $k_\Sigma a = 45.4$ ).

Анализ индикатрис волн накачки  $f_1$  и  $f_2$ , которые имеют как совпадающие, так и отличающиеся участки своих угловых зависимостей, показывает, что по направлениям падения в рассеянном импульсе наблюдается чистое биение двух высокочастотных волн накачки (их амплитуды по уровню являются одинаковыми). На отличающихся участках в рассеянном импульсе вследствие различия уровней амплитуд волн накачки наблюдается нарушение баланса амплитуд (расплывание узлов). На тех участках, где индикатрисы совпадают, происходит максимальная генерация волн разностной и суммарной частот, в при нару-

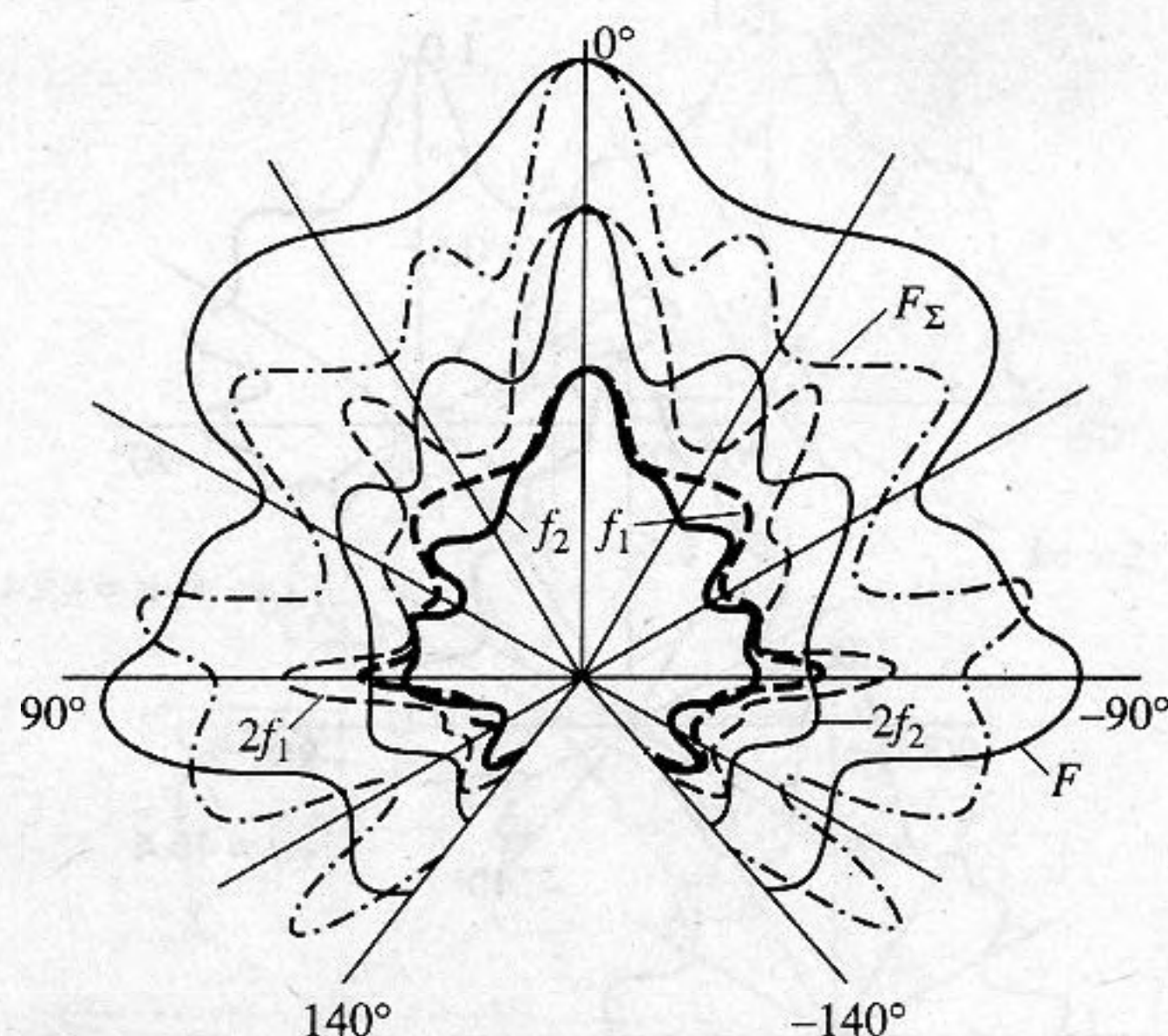


Рис. 10. Индикатрисы рассеяния на сфере с диаметром 11 мм на расстоянии  $l_1 = 12$  см для волн накачки  $f_1 = 995.3$  кГц,  $f_2 = 1030$  кГц и для вторичных волн  $2f_1 = 1990.6$  кГц,  $2f_2 = 2060$  кГц,  $F_\Sigma = 2025.3$  кГц,  $F = 34.7$  кГц.

шении баланса амплитуд на участках расхождения происходит максимальная генерация второй гармоники превосходящей волны накачки. Из рис. 10 видно, что несмотря на то, что индикатрисы вторых гармоник в основном по форме повторяют индикатрисы рассеяния исходных волн накачки, они действуют почти в 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 ника-

кой 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 от соотношения индикатрис волн накачки, так и от расстояния до рассеивателя, т.е. от протяженности области нелинейного взаимодействия, где происходит нелинейное взаимодействие исходных волн накачки. Следовательно, при одних и тех же исходных волнах накачки с увеличением расстояния до рассеивателя индикатриса начинает обужаться, что подтверждается рис. 7.

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 среды вокруг него, в котором происходит нелинейное взаимодействие между исходными волнами накачки.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Релей 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. Рассеяние звукового пучка на недеформируемых сфере и цилиндре // Акуст. журн. 1988. Т. 34. № 5. С. 919–924.
4. Лямшев Л.М., Саков П.В. Нелинейное рассеяние звука на пульсирующей сфере // Акуст. журн. 1992. Т. 38. № 1. С. 100–107.
5. Аббасов И.Б., Заграй Н.П. Рассеяние взаимодействующих плоских акустических волн на сфере // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 4. С. 535–541.

## The Experimental Investigation of Scattering of Nonlinearly Interacting Plane Sound Waves at a Sphere

I. B. Abbasov and N. P. Zagray

The results of experimental investigations of scattering of nonlinearly interacting plane acoustical waves of a parametric array at a sphere are presented. Spherical scatterers are placed in the interacting area of high-frequency pump sound waves. The directivity patterns for primary pump waves and secondary combination frequency waves are considered.