

УДК 534.26

© 1990 г.

И. В. Васьк, Л. Г. Гулега

ЗВУКОВОЕ ПОЛЕ СФЕРИЧЕСКОГО РЕФЛЕКТОРА С РЕШЕТКОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В ФОКАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ

Решена задача об излучении звука системой, состоящей из сферического рефлектора и линейной решетки точечных источников звука, размещенной в его фокальной области. Приведены количественные данные, иллюстрирующие изменение направленных свойств такой системы в зависимости от характера возбуждения источников звука.

В работе [1] решена задача дифракции звуковых волн на параболическом рефлекторе конечного диаметра и конечной звукопрозрачности путем аппроксимации его сферическим рефлектором. На основе полученного решения определены характеристики дальнего и ближнего полей рефлектора в широком интервале его волновых, геометрических и физических параметров. При этом все приводимые в [1] количественные данные касались одного частного случая, когда в фокусе рефлектора размещался один точечный ненаправленный источник (приемник) звука. Вместе с этим известно [2], что, придавая определенные направленные свойства источнику, размещенному в фокальной области, можно оказывать существенное влияние на характеристики дальнего и ближнего полей рефлектора.

Цель настоящей работы — обобщение задачи, рассмотренной в [1], на случай, когда в фокальной области рефлектора размещено некоторое конечное число источников звука, а также исследование степени изменения характеристик поля, создаваемого рефлектором, в зависимости от характера возбуждения этих источников.

На рис. 1 изображено сечение рефлектора и все необходимые обозначения, которые идентичны принятым в [1]. Будем полагать, что на оси симметрии рефлектора на участке $0 \leq r < r_0$ имеется Q точечных источников, которые расположены в точках с координатами $r_q, \theta_q = 0$ и характеризуются некоторой амплитудой ξ_q и фазой ψ_q возбуждения. Так же как и в работе [1], будем считать, что поверхность рефлектора имеет локальный импеданс

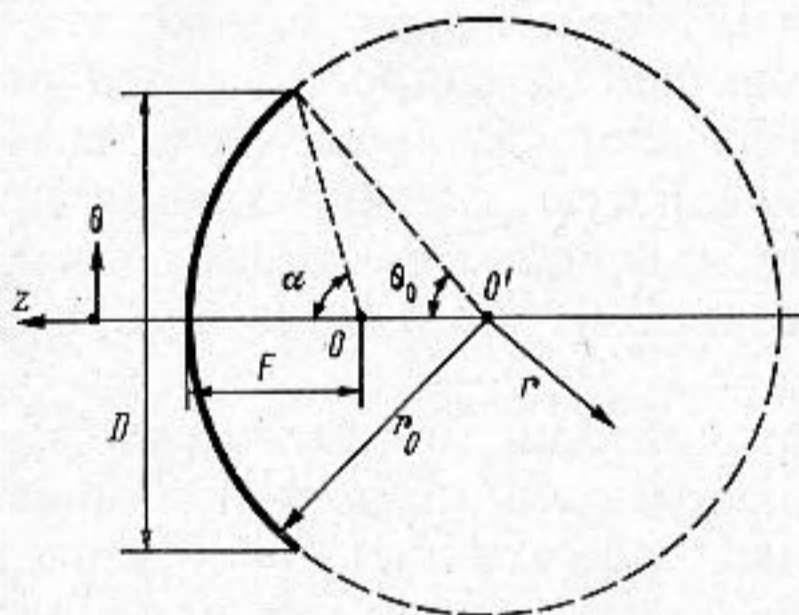


Рис. 1. Сферический рефлектор

$$Z = -i\omega M, \tag{1}$$

где M — поверхностная плотность, а угол полураскрыва рефлектора $\alpha < \pi/2$, из чего, кстати, вытекает допустимость аппроксимации параболического рефлектора сферическим рефлектором [1, 2].

С учетом принятых допущений и известных разложений функции, определяющей точечный источник по сферическим волновым функциям [3], представим потенциал скорости для системы рефлектор — решетка излучателей в следующей форме:

$$\Phi = \begin{cases} \sum_{n=0}^{\infty} A_n j_n(kr) P_n(\cos \theta) + ik \sum_{q=1}^Q \xi_q e^{i\psi_q} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) j_n \times \\ \times (kr_q) h_n^{(1)}(kr) P_n(\cos \theta), \\ r \leq r_0 \\ \sum_{n=0}^{\infty} B_n h_n^{(1)}(kr) P_n(\cos \theta). \\ r \geq r_0 \end{cases} \quad (2)$$

Используя последнее выражение и функциональные уравнения, сформулированные в работе [1] (выражение (4)), нетрудно показать, что неизвестные комплексные коэффициенты B_n определяются из следующей бесконечной системы линейных алгебраических уравнений:

$$B_n - j_n'(kr_0) \frac{\omega(2n+1)M(kr_0)^2}{2\rho c} \sum_{m=0}^{\infty} B_m N_{nm} = ik(2n+1) \sum_{q=1}^Q \xi_q e^{i\psi_q} j_n(kr_q), \quad (3)$$

где ρc — волновое сопротивление окружающей рефлктор среды,

$$N_{nm} = h_m^{(1)}(kr_0) \int_{\cos \theta_0}^1 P_n(\cos \theta) P_m(\cos \theta) d(\cos \theta),$$

а коэффициенты A_n — через соотношение

$$A_n = B_n \frac{h_n^{(1)}(kr_0)}{j_n'(kr_0)} - ik(2n+1) \frac{h_n^{(1)}(kr_0)}{j_n'(kr_0)} \sum_{q=1}^Q \xi_q e^{i\psi_q} j_n(kr_q).$$

Перейдем к анализу количественных данных, полученных с помощью изложенной выше расчетной схемы, для следующих параметров рефлктора и окружающей среды: $D/F = 2,8$, $r_0 = 2,14 F$, $\alpha = 70^\circ$, $D/\lambda = 2,6$, $M = 177 \text{ кг/м}^3$, $\rho c = 1,5 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$. Чтобы конкретизировать задачу, остановимся на вопросе выбора количества источников в фокальной области рефлктора и характера их возбуждения. Рассмотрим простейшую, но весьма важную, с точки зрения практики, линейную решетку, состоящую из двух точечных ненаправленных источников звука ($Q = 2$). Будем полагать, что амплитуды и фазы возбуждения этих источников соответственно равны $\xi_1 = 1$, $\xi_2 = -1$, $\psi_1 = 0$, $\psi_2 = \beta kd$, где $d = (r_1 - r_2)$ — расстояние между источниками (полагаем, что $r_1 > r_2$), а β — некоторый вещественный параметр, который может изменяться в пределах от 0 до 1. Тогда совершенно очевидно, что для $\beta = 0$ имеем диполь [4], который при $d < \lambda/2$ характеризуется диаграммой направленности в форме «восьмерки», причем максимумы излучения направлены вдоль оси z . Если положить $\beta = 1$, то, как нетрудно убедиться, диаграмма направленности (при $d < \lambda/4$) приобретает форму кардиоиды, имеющей максимальный уровень в направлении положительных значений оси z и нуль — в противоположном направлении. В диапазоне $0 < \beta < 1$ диаграмма направленности двух точечных источников будет иметь некоторую промежуточную форму между «восьмеркой» и кардиоидой, для которой характерно максимальное значение в направлении положительных значений z и некоторый меньший уровень в противоположном направлении. Легко показать, что при $\beta = 0,33$ коэффициент концентрации будет максимальным и в этом смысле диаграмму направленности условно можно считать «оптимальной».

Именно при указанных выше трех значениях $\beta = 0, 0,33, 1$ и были выполнены расчеты дальнего поля рефлктора. Ниже на рис. 2 и 3 приведены результаты этих расчетов, когда источники находились в точках с координатами $r_1 = 1,157 F$, $r_2 = 1,144 F$, $\theta_1 = \theta_2 = 0$. Количество неизвестных, удерживаемых в системе (3), $n = 0, 1, 2 \dots 32$.

Прежде всего обратимся к рис. 2, где представлены диаграммы направленности рефлктора с двумя источниками в фокальной области при различных значениях параметра β . Сравнительный анализ кривых 1—3 и 4 показывает, что использование всего лишь двух, надлежащим образом

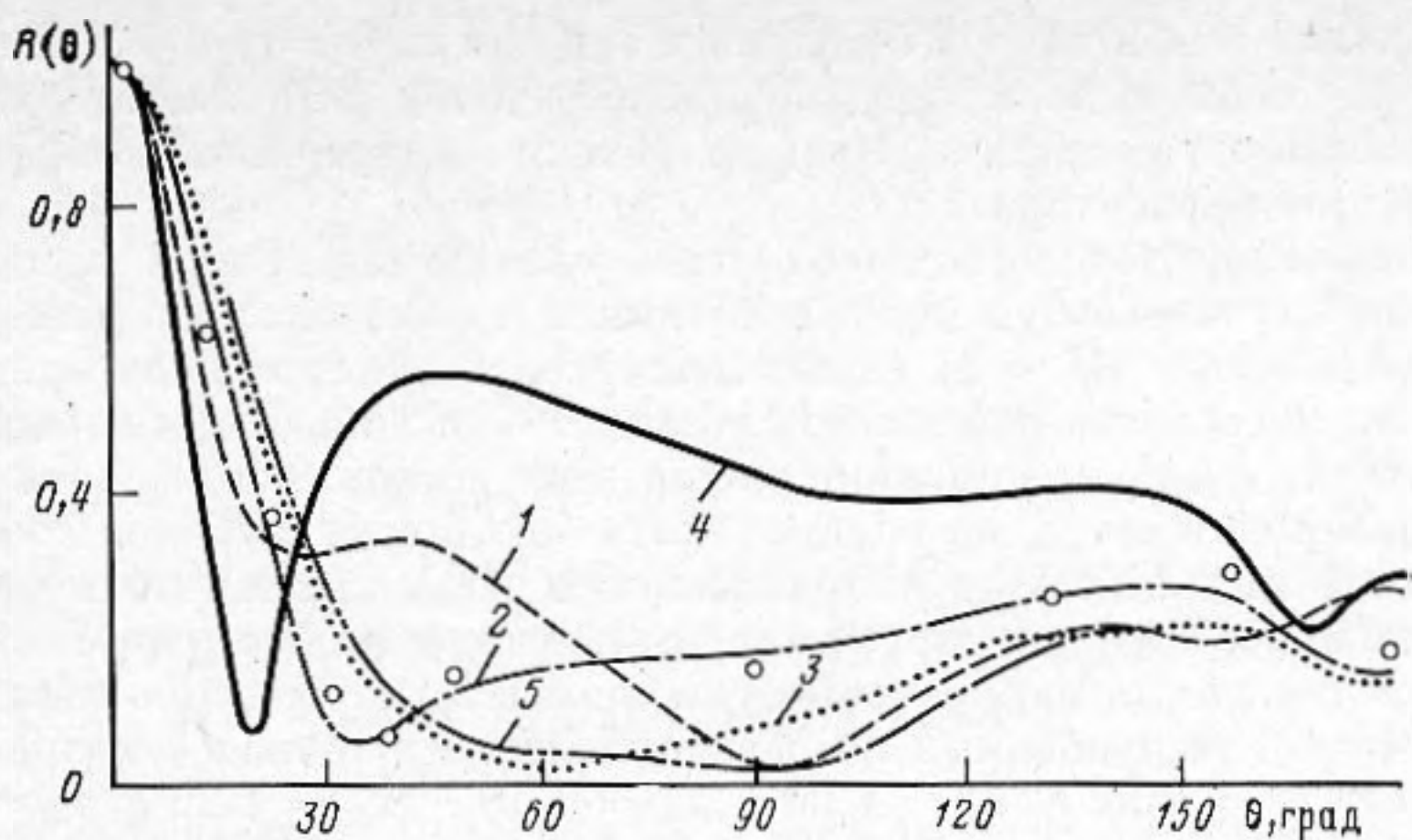


Рис. 2

Рис. 2. Диаграмма направленности рефлектора: 1—3 для $\beta = 0$; 1; 0,33 при $Q = 2$, 4 соответствует одному источнику звука в фокусе [1], 5 — для $Q = 6$, кружки — экспериментальные значения при $\beta = 1$, $Q = 2$

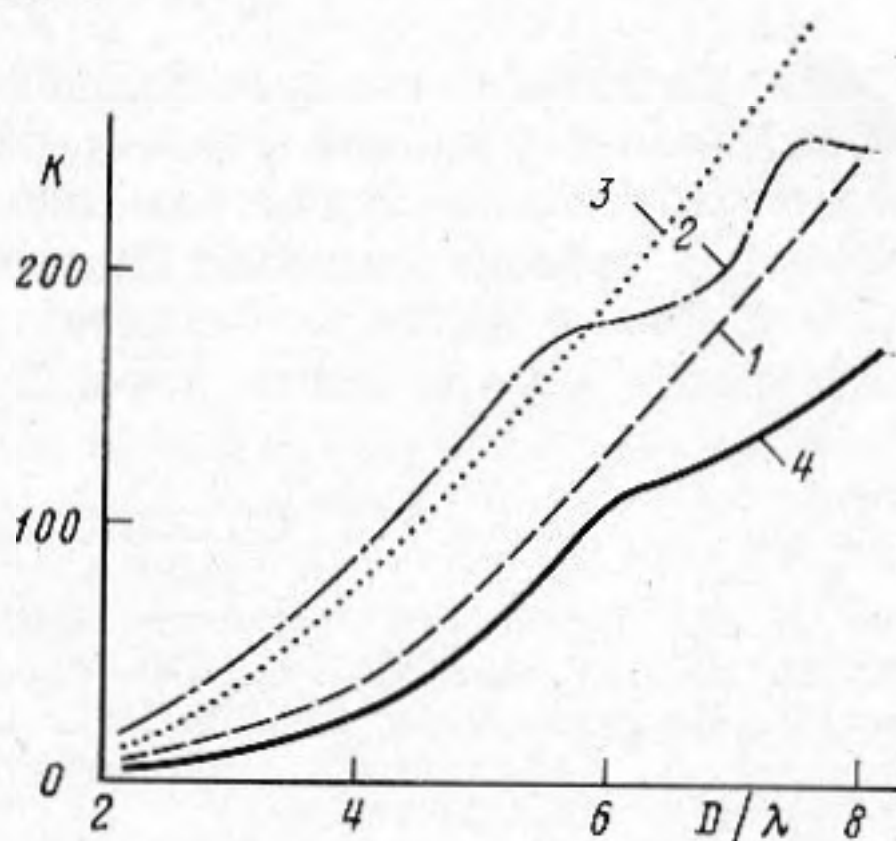


Рис. 3

размещенных и сфазированных источников позволяет существенно подавить излучение звука практически во всей зоне углов θ , лежащих за основным лепестком диаграммы направленности. Вместе с этим наблюдаются и более тонкие особенности в диаграмме направленности рефлектора при различной фазировке источников. Так, для случая, когда источники работают противофазно и образуют диполь ($\beta = 0$), диаграмма направленности рефлектора характеризуется особенно низким уровнем в зоне углов θ , близких к 90° . При $\beta = 1$ весьма низкий уровень излучения наблюдается сразу за основным лепестком диаграммы направленности ($25^\circ \lesssim \theta \lesssim 45^\circ$). Наконец, в случае «оптимального» значения $\beta = 0,33$ зона углов, где наблюдается низкий уровень излучения, значительно расширяется и лежит уже в пределах $40^\circ \lesssim \theta \lesssim 90^\circ$.

Вывод на основе этого краткого анализа можно сформулировать следующим образом: размещая два простейших источника на оси рефлектора в фокальной области и подбирая надлежащим образом их возбуждение, можно осуществлять эффективное управление диаграммой направленности рефлектора¹, в том числе снижать общий уровень излучения в зонах углов θ за основным лепестком, а также создавать глубокое подавление излучения в определенных направлениях пространства.

Анализируя зависимости коэффициента концентрации K от волновых размеров рефлектора (см. рис. 3), можно заключить, что здесь также имеет место значительное влияние характера возбуждения источников. Как нетрудно видеть, рефлектор с одним источником звука по величине коэффициента концентрации сильно проигрывает рефлектору с двумя источ-

¹ Сравнение расчетных и экспериментальных данных на рис. 2 подтверждает этот вывод (эксперимент выполнен при $\delta/\lambda = 0,04$ и $\delta/D = 0,0154$, где δ — диаметр источников).

никами звука, особенно при значениях параметра $\beta = 1, 0,33$. Таким образом, с помощью выбора характера возбуждения источников можно при необходимости осуществлять управление также и величиной коэффициента концентрации рефлектора.

В заключение хотелось бы отметить следующее. Выше рассмотрены простейшие случаи возбуждения источников и показано, что даже при их минимальном числе ($Q = 2$) удается оказывать значительное влияние на направленные свойства рефлектора в целом. Как показали численные эксперименты, за счет наращивания количества источников и соответствующей их фазировки нетрудно осуществлять еще более глубокое и эффективное влияние на диаграмму направленности рефлектора, что представляется весьма важным для практики. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведена диаграмма направленности (кривая 5) для случая шести источников ($Q = 6$), размещенных на оси рефлектора в точках с координатами $r_1 = 0,89 F$, $r_2 = 0,99 F$, $r_3 = 1,09 F$, $r_4 = 1,19 F$, $r_5 = 1,29 F$, $r_6 = 1,39 F$ и характеризующихся следующими амплитудами и фазами возбуждения $\xi_1 = 1$, $\xi_2 = 1,17$, $\xi_3 = 1,31$, $\xi_4 = 1,35$, $\xi_5 = 1,04$, $\xi_6 = 0,83$, $\psi_1 = 0^\circ$, $\psi_2 = 61^\circ$, $\psi_3 = 126^\circ$, $\psi_4 = 204^\circ$, $\psi_5 = 255^\circ$, $\psi_6 = 325^\circ$. Сравнение кривых позволяет убедиться, что при большем количестве источников зону углов θ , где обеспечивается низкий уровень излучения, можно значительно расширить. Дополнительно следует отметить, что при уменьшении поверхностной плотности M уровень значений диаграммы направленности в области углов $30^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ в целом повышается, что закономерно, так как при этом увеличивается прозрачность рефлектора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вовк И. В.* Дифракция звуковых волн на параболическом рефлекторе // Акуст. журн. 1979. Т. 25. № 5. С. 670—674.
2. *Кюн Р.* Микроволновые антенны. Л.: Судостроение, 1967. 517 с.
3. *Иванов Е. А.* Дифракция электромагнитных волн на двух телах. Минск: Наука и техника, 1968. 584 с.
4. *Боббер Р.* Гидроакустические измерения. М.: Мир, 1974. 362 с.

Киевский научно-исследовательский
институт гидроприборов

Поступила в редакцию
01.06.88

после окончательного исправления
27.03.89

I. V. Vovk, L. G. Gulega

THE SOUND FIELD OF A SPHERICAL REFLECTOR WITH THE GRATE OF RADIATORS IN ITS FOCAL AREA

The problem of sound radiation of a spherical reflector with the grate of sources located in its focal area is solved. The quantitative data, which illustrate the change of far field of such system in dependence on the character of sound sources stimulation are cited.