УДК 534.23

ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ СОВОКУПНОСТИ НЕКОГЕРЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ

А. С. Никифоров

В ряде практических случаев (например, при проектировании систем озвучивания помещений) приходится производить расчеты звукового поля, создаваемого совокупностью точечных некогерентных источников звука. Такие расчеты становятся чрезмерно трудоемкими при большом числе источников, различной их интенсивности и сложной геометрии размещения в пространстве.

Для непоглощающих сред оказывается возможным электрическое моделирование упомянутого поля, существенно упрощающее решение задачи. В общем случае плотность звуковой энергии в некоторой точке $A(x, y, z)$ бесконечного пространства V, в котором размещены произвольным образом N точечных источников звука, будет определяться собственной звуковой мощностью всех источников, а также взаимной мощностью, образующейся в результате интерференции.

Формально взаимную мощность в звуковом поле можно рассматривать как результат действия некоторого пространственного распределения источников звука с положительной и отрицательной производительностью $Q(A)$. Распределение производительности этих источников таково, что

$$\int_V Q(A)\,dV = 0. \tag{1}$$

Выражение (1) означает, что в пространстве нет другой энергии, кроме излученной совокупностью N источников, а взаимная мощность является следствием перераспределения в пространстве энергии, излученной этими источниками.

Поэтому дивергенцию потока звуковой энергии $\mathbf{q}(\mathbf{A})$ в точке A (за исключением точек, где размещены рассматриваемые источники), пренебрегая поглощением в среде, можно написать как $\operatorname{div}\mathbf{q}(\mathbf{A}) = Q(A)$.

Для интересующего нас случая некогерентных источников интерференция отсутствует и, следовательно, $Q(A) = 0$. Поэтому

$$\operatorname{div}\mathbf{q}(\mathbf{A}) = 0. \tag{2}$$

Поскольку звуковое поле безвихревое [1], то

$$\operatorname{rot}\mathbf{q}(\mathbf{A}) = 0. \tag{3}$$

Уравнениям (2) и (3) удовлетворяет, в частности, выражение для потока энергии, создаваемого точечным ненаправленным источником с производительностью Q_0:

$$q(r) = \frac{Q_0}{4\pi r^2},$$

где r — расстояние от источника до точки наблюдения.

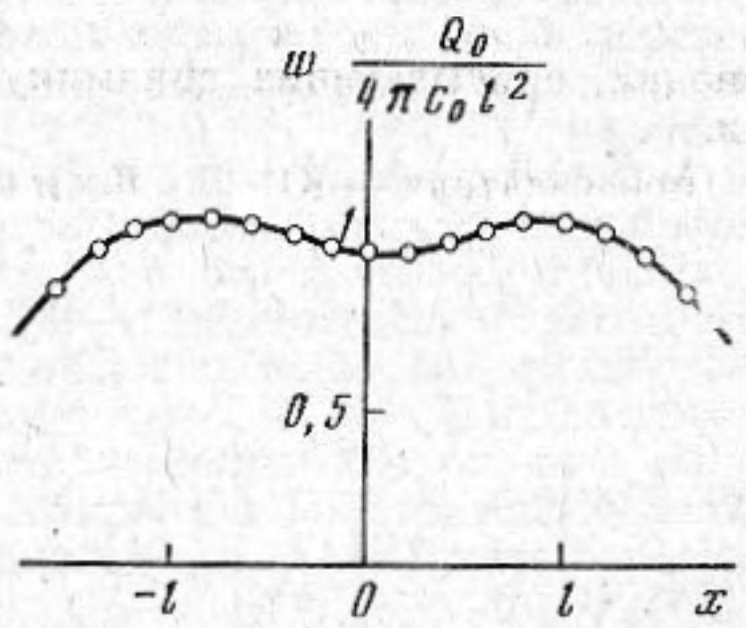
Из уравнений (2) и (3) следует, что существует поле некоторой скалярной величины $\varphi(A)$, градиент которой определяет поток энергии $\mathbf{q}(\mathbf{A})$ в звуковом поле, образуемом совокупностью некогерентных источников:

$$\mathbf{q}(\mathbf{A}) = \operatorname{grad}\varphi(A). \tag{4}$$

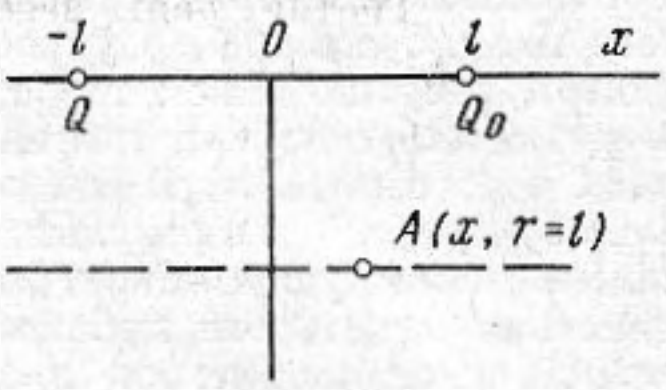
Величина $\varphi(A)$, как это следует из подстановки выражения (4) в формулу (2), удовлетворяет уравнению Лапласа $\nabla\varphi(A) = 0$. Таким образом, существует возможность электрического моделирования двумерного или трехмерного поля $\varphi(A)$, а, следовательно, и $\mathbf{q}(\mathbf{A})$ с помощью любого из методов моделирования уравнения Лапласа. Может быть, в частности, использован метод, основанный на применении плоских или пространственных сеток активных сопротивлений [2].

Измерения, произведенные на модели, собранной из сетки активных сопротивлений, непосредственно дают информацию о пространственном распределении $\varphi(A)$. Несложный пересчет данных, полученных на модели, позволяет получить пространственное распределение потока звуковой энергии $\mathbf{q}(\mathbf{A})$. При этом граничные условия, соответствующие производительности источников и их размещению в пространстве, обеспечиваются подачей электрического тока в соответствующие узловые точки сетки сопротивлений. Абсолютную величину $\mathbf{q}(\mathbf{A})$ по данным измерений на электрической модели легко получить сравнением потенциала напряжения в точке расположения одного из источников звука с известной производительностью и в точке A.

Некоторую трудность создает то обстоятельство, что измерения на модели при заданных граничных условиях дают информацию о потоке звуковой энергии в каждой точке поля, образующемся в результате геометрического (векторного) суммирования вкладов всех источников. В то же время, поскольку микрофоны являются приемниками звукового давления, а, следовательно, реагируют на плотность звуковой энергии, практически интересно знать также распределение арифметической суммы вкладов всех источников. Указанную трудность можно преодолеть, если с помощью модели произвести измерения потока энергии, обусловленного вкладом каждого источника по отдельности, а затем арифметически сложить полученные результаты.



Фиг. 1



Фиг. 2

Электрическое моделирование звукового поля совокупности точечных источников звука в принципе можно осуществить при любом их числе, особенно, если использование сеток сопротивлений сочетать с применением ЭВМ. Ниже в качестве примера приводятся результаты моделирования звукового поля, образуемого двумя такими источниками.

На фиг. 1 приведены результаты измерения распределения плотности энергии $w(A)$ в звуковом поле, создаваемом двумя точечными ненаправленными некогерентными источниками равной производительности Q_0, расположенными на расстоянии $2l$ друг от друга, вдоль прямой, проходящей на расстоянии $r = l$ от источников (см. фиг. 2).

Измерения производились с помощью сеточного электроинтегратора типа МСМ-1. Кроме того на фиг. 1 приведены расчетные значения плотности энергии на той же прямой, полученные по очевидной формуле

$$w(x, r) = \frac{Q_0(r^2 + x^2 + l^2)}{2\pi c_0[(r^2 + x^2 + l^2)^2 - 4x^2l^2]}, \tag{5}$$

где c_0 — скорость звука в среде. Смысл остальных обозначений в формуле (5) ясен из фиг. 2. Видно хорошее совпадение расчетных данных и результатов измерений на электрической модели.

Автор благодарен Р. А. Павловскому за помощь при проведении измерений на модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Скучик. Основы акустики, т. I, ИЛ, Москва, 1958.
2. У. Карплюс. Моделирующие устройства для решения задач теории поля. ИЛ., Москва, 1962.

Поступила в редакцию
30 июля 1971 г.