

УДК 534.873
OECD 01.03.AA

Моделирование формы звукоотражающей поверхности для получения заданного звукового потока

Мурзинов В.Л.¹, Попов С.В.², Татаринова Ю.В.³

¹Д.т.н., профессор кафедры «Техносферная и пожарная безопасность»,

²Аспирант кафедры «Техносферная и пожарная безопасность»,

³Студент кафедры «Техносферная и пожарная безопасность»,

^{1,2,3}Воронежский государственный технический университет,

г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Аннотация

В статье рассматривается задача построения звукоотражающей поверхности. По заранее спланированному характеру звукового поля для конкретной области моделируют формы отражающих поверхностей, изготавливают их и устанавливают в заданном порядке. Для точечного источника звука рассчитывается форма отражающей поверхности, находящаяся на заданном расстоянии от источника, и обеспечивающая формирование параллельного звукового потока в заданном направлении.

Ключевые слова: звуковое поле, лучевая оптика, отражающая поверхность, моделирование.

Modeling the shape of the sound-reflecting surface to obtain a given sound field

Murzinov V.L.¹, Popov S.V.², Tatarinova Yu.V.³

¹Doctor of technical Sciences, Professor of Technosphere and fire safety Department,

²Post-graduate student, Department of technosphere and fire safety,

³Student, Department of technosphere and fire safety,

^{1,2,3}Voronezh state technical University, Voronezh, Russia, St. 20-letia Oktyabrya, 84

Abstract

The article deals with the problem of constructing a sound-reflecting surface. According to the pre-planned nature of the sound field for a particular area, the forms of reflecting surfaces are modeled, made and installed in a given order. For a point source of sound, the shape of the reflecting surface is calculated, located at a given distance from the source, and provides the formation of a parallel sound flow in a given direction.

Key words: sound field, ray optics, reflecting surface, modeling.

Введение

Многие прикладные акустические исследования посвящены анализу звукового поля. Накапливается информация о распределении звукового давления в различных помещениях, полостях, объемах. Определение звукового поля – эта прямая задача, то есть, учитывая реальную конфигурацию отражающих поверхностей и наличие источников звука, с помощью приборов исследуют звуковое поле и получают его характеристику. Для получения заданной конфигурации звукового поля, обычно, используют метод проб и ошибок, изменяя формы отражающих поверхностей и их расположение. Однако можно рассмотреть обратную задачу, используя методы лучевой оптики. По заранее

спланированному характеру звукового поля для конкретной области моделируют формы отражающих поверхностей, изготавливают их и устанавливают в заданном порядке.

Характер звукового поля внутри объемов различных устройств принципиально отличается от характера поля в открытом пространстве. Значительно изменяется картина распределения звукового давления в открытом пространстве. Давление звука в точках объема может меняться таким образом, что возможны процессы концентрирования звуковой энергии в определенных точках объема. На этот процесс влияют форма и материал отражающих поверхностей, их взаимное расположение, как поверхностей, так и самого источника звука. В некоторых устройствах специально изготавливают отражающие поверхности заданного профиля, обеспечивающего концентрацию звуковой энергии в определенной точке объема. Например, в устройстве для корректировки направления на трудно наблюдаемые или не наблюдаемые источники звука используется принцип фокусировки звукового потока на датчик, измеряющий звуковое давление [1]. В других устройствах поверхности стенок изготавливают не линейной формы, обеспечивают уплотнение параллельного звукового потока в определенной точке, в которой установлен микрофон [2]. Во многих публикациях рассматриваются вопросы взаимодействия звуковых потоков и отражающих поверхностей, например, в анализе шумозащитных экранов и звукоподавляющих панелей [3, 4, 5, 6]. Современная вентиляция требует решения вопроса о снижении шума, как аэродинамического, так и структурного [7, 8, 9]. Однако в публикациях не ставится вопрос о построении отражающей поверхности заданного профиля с целью получения звукового потока заданной характеристики. Можно рассмотреть следующую задачу. Построить звукоотражающую поверхность, формирующую параллельный звуковой поток от точечного источника. Дано взаимное расположение точечного источника и крайней точки звукоотражающей поверхности.

1. Постановка задачи

Даны пространственные координаты источника звука и звукоотражающей поверхности. Рассматривается плоская задача. Источник звука точечный. Отражающая поверхность изготовлена из акустически жесткого материала.

На рисунке 1 показана схема с изображением взаимного расположения источника звука Q и крайних точек M и T звукоотражающей поверхности. Требуется построить плоскую кривую, обладающую тем свойством, что в каждой ее точке проходящий из источника луч отражается от местной касательной к кривой в заданном направлении. Задачей является определение с помощью аналитических методов формы звукоотражающей поверхности. При этом исходными данными являются координаты крайних точек проектируемой звукоотражающей поверхности, а начало координат помещают в источник звука. Оригинальность задачи заключена в предложении удобного для практической работы метода, не требующего дифференциальной постановки задачи.

2. Вывод основных соотношений

Рассмотрим произвольный луч QN в заданном секторе, ограниченном точками M и T . Точка N является точкой пересечения луча QN и поверхности MT . Касательная в точке N должна быть перпендикулярна к линии KN , которая делит угол α_1 , обеспечивая для лучей условие «угол падения равен углу отражения». В точке N нормаль будет описываться дифференциальным уравнением первого порядка [10]:

$$(f(x) - y_1) = -\frac{1}{f'(x)}(x - x_1),$$

или

$$f'(x)(f(x) - y_1) = -(x - x_1),$$

решением которого будет:

$$f(x) = y_1 \pm \sqrt{y_1^2 - x^2 + 2x_1x - 2C_1} \quad (1)$$

где C_1 – константа, определяемая из граничных условий. В уравнение (1) формы отражающей поверхности входит радикал, и это осложнит дальнейшие вычисления. Поэтому для получения инженерного метода расчета формы отражающей поверхности примем параболическую форму в виде полинома второго порядка:

$$f(x) = Ax^2 + Bx + C, \quad (2)$$

где A, B, C – константы требующие определения.

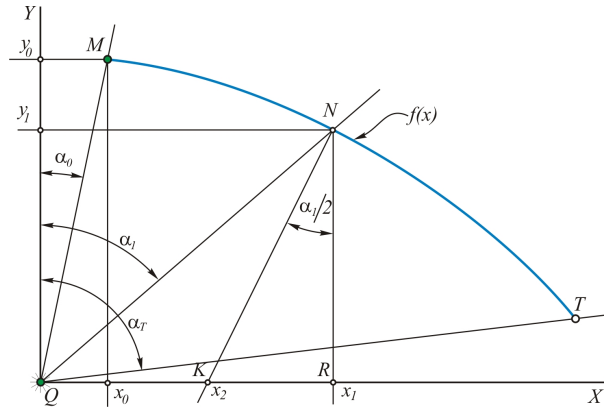


Рис. 1. Схема взаимного расположения источника звука и отражающей поверхности. Q – источник звука; M, N, T – базовые точки; $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_T$ – базовые углы лучей

Уравнение луча QN будет:

$$y = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1\right) x \text{ или } y = \frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha_1)} x. \quad (3)$$

Координаты точки N можно определить из совместного решения уравнений (2) и (3), тогда получим систему (4):

$$\begin{cases} y = \frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha_1)} x \\ y = Ax^2 + Bx + C \end{cases} \quad (4)$$

Подставим значение x из первого уравнения системы (3) и получим значение ординаты точки N и затем значение абсциссы:

$$y_1 = \frac{1 - B \operatorname{tg}(\alpha_1) \pm \sqrt{1 - 2B \operatorname{tg}(\alpha_1) + [B \operatorname{tg}(\alpha_1)]^2 - 4AC[\operatorname{tg}(\alpha_1)]^2}}{2A[\operatorname{tg}(\alpha_1)]^2}, \quad (5)$$

$$x_1 = y_1 \operatorname{tg}(\alpha_1). \quad (6)$$

Касательная в точке N должна быть перпендикулярна к линии KN , которая делит угол α_1 , обеспечивая для лучей условие «угол падения равен углу отражения». В точке N нормаль будет описываться уравнением [10]:

$$(y - y_1) = -\frac{1}{f'(x)}(x - x_1),$$

где « $-\frac{1}{f'(x)}$ » – угловой коэффициент нормали и учитывая (2) запишем:

$$(y - y_1) = -\frac{1}{2Ax_1 + B}(x - x_1). \quad (7)$$

С другой стороны нормаль определена двумя точками N и K . Уравнение нормали по двум точкам имеет вид [11]:

$$\frac{y - y_1}{y_1 - y_2} = \frac{x - x_1}{x_1 - x_2}, \quad (8)$$

где $x_2 = x_1 - y_1 \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)$.

Исходя из расчетной схемы, соотношение (8) примет вид:

$$y = \frac{1}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)}x + y_1 - \frac{x_1}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)}. \quad (9)$$

Приравняем угловые коэффициенты из соотношений (9) и (7):

$$\frac{1}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)} = -\frac{1}{2Ax_1 + B}$$

и тогда получим соотношение, связывающее неизвестные константы в уравнении (2) и параметры системы «источник – отражающая поверхность»:

$$2Ax_1 + B + \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_1}{2}\right) = 0$$

или с учетом (5) будет:

$$2Ay_1 \operatorname{tg}(\alpha_1) + B + \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_1}{2}\right) = 0. \quad (10)$$

Учитывая в соотношении (10) y_1 из соотношения (5) получим формулу, связывающую неизвестные константы A , B , C и параметры формы отражающей поверхности при условии, что отражающая поверхность формирует параллельный звуковой поток в заданном направлении:

$$\frac{1 - B \operatorname{tg}(\alpha_1) \pm \sqrt{1 - 2B \operatorname{tg}(\alpha_1) + [B \operatorname{tg}(\alpha_1)]^2 - 4AC[\operatorname{tg}(\alpha_1)]^2}}{\operatorname{tg}(\alpha_1)} + B + \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_1}{2}\right) = 0. \quad (11)$$

Для определения констант A , B , C необходимо составить систему из трех уравнений. Для этого нужно выбрать три точки на кривой $f(x)$.

Таблица 1

Исходные данные для построения звукоотражающей поверхности. Размеры величин даны в относительных единицах

Точки	Фиксируемый угол, α_i	$\frac{\alpha_i}{2}$	$\text{tg}(\alpha_i)$	$\text{tg}(\frac{\alpha_i}{2})$	y_i
М	$\alpha_0 = 0,349$	0,1745	$6,091 \cdot 10^{-3}$	$3,045 \cdot 10^{-3}$	$y_0 = 77$
N	$\alpha_1 = 0,698$	0,349	0,012	$6,091 \cdot 10^{-3}$	y_1
T	$\alpha_2 = 1,222$	0,611	0,021	0,011	y_2

3. Пример построения звукоотражающей поверхности

Рассмотрим конкретную ситуацию. В таблице 1 представлены исходные данные для построения формы профиля звукоотражающей поверхности.

Составим систему уравнений в следующем виде: для первого уравнения используем формулу (10), для второго и третьего – формулу (11), и тогда получим:

$$\begin{cases} 2Ay_0 \text{tg}(\alpha_0) + B + \text{tg}\left(\frac{\alpha_0}{2}\right) = 0 \\ \frac{1 - B \text{tg}(\alpha_1) \pm \sqrt{1 - 2B \text{tg}(\alpha_1) + [B \text{tg}(\alpha_1)]^2 - 4AC[\text{tg}(\alpha_1)]^2}}{\text{tg}(\alpha_1)} + B + \text{tg}\left(\frac{\alpha_1}{2}\right) = 0 \\ \frac{1 - B \text{tg}(\alpha_2) \pm \sqrt{1 - 2B \text{tg}(\alpha_2) + [B \text{tg}(\alpha_2)]^2 - 4AC[\text{tg}(\alpha_2)]^2}}{\text{tg}(\alpha_2)} + B + \text{tg}\left(\frac{\alpha_2}{2}\right) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Решение системы (12) дает следующий результат:

$$A = -3,181 \cdot 10^{-3}; B = 1,997 \cdot 10^{-3}; C = 79,029.$$

Форма звукоотражающей поверхности определится формулой:

$$f(x) = -3,181 \cdot 10^{-3}x^2 + 1,997 \cdot 10^{-3}x + 79,029. \quad (13)$$

На рисунке 2 показана форма звукоотражающей поверхности, построенной по уравнению (13). На графике представлены базовые точки, по которым строилась поверхность.

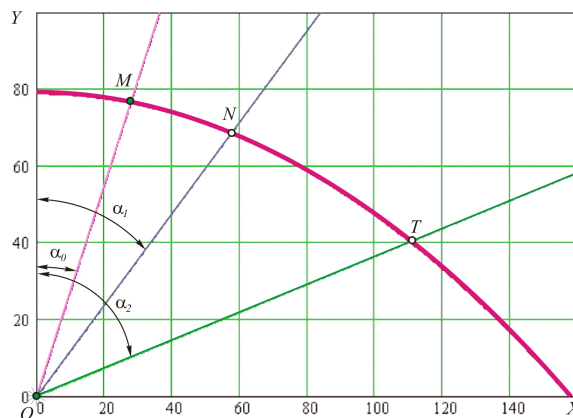


Рис. 2. Функция формы профиля звукоотражающей поверхности. Q – источник звука; M, N, T – базовые точки; $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$, – базовые углы лучей

Заключение

Система уравнений (13) позволяет построить профиль звукоотражающей поверхности, обеспечивающий формирование параллельного звукового потока от точечного источника звука. При этом используется одна базовая точка на отражающей поверхности, фиксированная относительно источника звука, и два базовых луча, проходящих через отражающую поверхность.

Список литературы

1. Патент 2643690 РФ. Способ корректировки направления оси отражательного приемника звуковых волн на визуально трудно наблюдаемые или ненаблюдаемые источники звука / Качалов А.Ю., Крутяков Ю.А., Неустроев В.П., Янков В.И. – Оpubл. 05.02.2018. – Бюл. № 4.
2. Патентная заявка 20090316927 США. Метод и устройство звукоусиления для музыкальных инструментов / Чарльз К. – Оpubл. 24.12.2009.
3. Иванов Н.И., Шашурин А.Е., Бойко Ю.С. Влияние материала на акустическую эффективность шумозащитных экранов // NOISE Theory and Practice. – 2016. – Т. 2, № 4. – С. 24 – 28.
4. Мурзинов В.Л., Мурзинов П.В. Звукоподавляющие панели для защиты от шума на путях его распространения // Безопасность труда в промышленности. – 2018, № 02. – С. 5–11. DOI: 10.24000/0409-2961-2018-2-5-11.
5. Нагараджа Джейд, Венкатешам Б. Воссоздание источника звука на гибкой пластине, поддерживаемой полостью, с использованием метода эквивалентного источника // NOISE Theory and Practice. – 2017. – Т. 4, № 1. – С. 5 – 17.
6. Murzinov V.L. Mathematical modeling of sound insulation for sound suppressing lightweight structured panels (SSLWSP) / V.L. Murzinov, P.V. Murzinov, Yu.V. Murzinov, V.I. Buyanov, V.A. Popov // International Journal of Engineering & Technology International. – 2018, N 7 (2.13) – Pp. 109-113. DOI: 10.14419/ijet.v7i2.13.11621.
7. Патент 170696 РФ. Звукоподавляющий вентиляционный канал / Мурзинов В.Л., Мурзинов П.В., Мурзинов Ю.В. – Оpubл. 03.05.2017. – Бюл. № 13.
8. Маков Ю.Н. Возможно ли проникновение импульса звукового удара от современного истребителя в водную среду и с его дальнейшим волновым распространением в этой среде? // NOISE Theory and Practice. – 2017. – Т. 4, № 1. – С. 18 – 29.
9. Дроздова Л.Ф., Кудаев А.В., Куклин Д.А. Влияние шума компрессорных станций на окружающую среду // NOISE Theory and Practice. – 2017. – Т. 3, № 2. – С. 38 – 43.
10. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления. – М: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1978. – 456 с.
11. Гусак А.А., Гусак Г.М. Линии и поверхности. – Минск: Высшэйшая школа, 1985. – 220 с.