

УДК 534.874.2

Н.П. Красненко, А.Н. Кудрявцев, А.С. Раков, Д.С. Раков

Исследование характеристик мощной излучающей акустической антенной решетки

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований характеристик мощной излучающей акустической антенной решетки для атмосферных приложений. Описана методика проведения расчетов и исследований. Подтверждена правильность расчетов диаграммы направленности решетки. Приведены основные характеристики созданной антенной решетки.

Ключевые слова: антенная решетка, диаграмма направленности, звуковое давление, дальность действия, мощность.

Акустические антенные решетки на сегодняшний день являются достаточно востребованными и универсальными для применения в различных фундаментальных и прикладных задачах атмосферной акустики. Так, например, они успешно применяются в системах дистанционного акустического зондирования атмосферы [1, 2]. Другим направлением их практического применения является звуковое вещание [3] как инструмент информационного и психологического воздействия на людей.

Исследование и анализ характеристик разрабатываемых акустических антенных решеток с целью синтеза оптимальных конфигураций и конструкций является актуальной задачей. Здесь помимо общих теоретических вопросов расчета решеток, в основном соответствующих скалярной теории расчета решеток в радиодиапазоне, имеется и чисто акустическое взаимное влияние элементов решетки, которое весьма затруднительно учесть.

В работах [4, 5] приводилось описание некоторых, разработанных авторами моделей акустических антенных решеток. Ниже проведем исследования характеристик плоской излучающей акустической антенной решетки, состоящей из 91 элемента и собранной по гексагональной схеме (рис. 1).

В качестве отдельных элементов решетки использованы рупорные пьезоэлектрические преобразователи (громкоговорители) [6], создающие максимальное акустическое давление на резонансной частоте 2350 Гц до 115 дБ на расстоянии 1 м. Их амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) приведена на рис. 2. Диаметр рупора 85 мм.



Рис. 1. Внешний вид 91-элементной антенной решетки с лицевой стороны

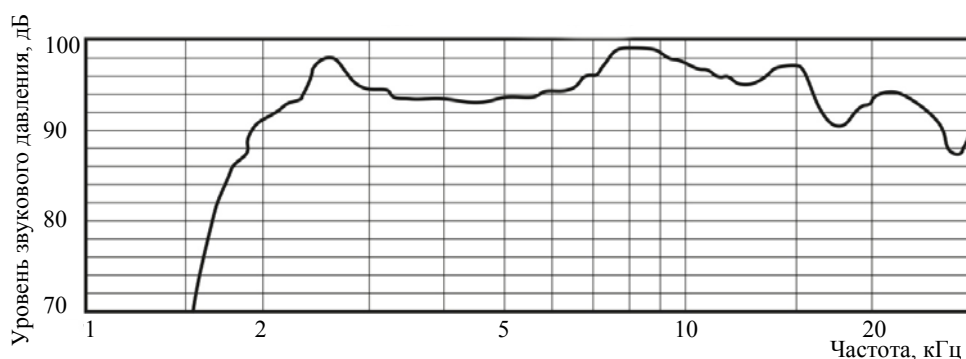


Рис. 2. АЧХ единичного излучателя [6]

Выбор типа преобразователей обусловлен такими достоинствами пьезоэлектрических громкоговорителей, по сравнению с электродинамическими, как меньшая масса и больший КПД.

Целью проведенных экспериментальных исследований было измерение в натуральных условиях следующих характеристик антенной решетки: диаграммы направленности для рабочих частот, ам-

плитудно-частотной характеристики, уровня звукового давления в зависимости от расстояния до антенной решетки для различных значений подаваемой мощности сигнала.

Методики и результаты исследований. Экспериментальное оборудование включало в себя переносной компьютер типа ноутбук, с установленным специальным программным обеспечением; осциллограф для отслеживания уровня подаваемого сигнала; шумомер для измерения уровня звукового давления и непосредственно анализируемую излучающую антенную решетку.

Процесс измерения характеристик антенной решетки проходил следующим образом. Антенная решетка устанавливалась на треноге на площадке, так чтобы ось решетки была на высоте 6 м над уровнем земли. Микрофон шумомера располагался в дальней зоне на расстоянии 20 м от антенной решетки и также на мачте на высоте 6 м. Данное расположение микрофона и антенной решетки позволяло минимизировать влияние подстилающей поверхности на распространяющуюся звуковую волну. Эксперимент проводился при отсутствии ветра, а также при минимуме фонового окружающего шума.

При измерении АЧХ с помощью специального программного обеспечения в компьютере формировался шумоподобный сигнал и подавался на вход антенной решетки для излучения. Уровень создаваемого звукового давления фиксировался измерительным шумомером и передавался на компьютер, где происходила его дальнейшая обработка.

На рис. 3 представлена амплитудно-частотная характеристика антенной решетки, полученная в процессе эксперимента. Анализируя полученный результат, можно сделать вывод, что разработанная антенная решетка имеет неравномерную амплитудно-частотную характеристику в области речевого диапазона звуковых частот. На низких частотах имеется провал, обусловленный амплитудными характеристиками единичных излучателей (рис. 2). Можно сделать вывод, что данную антенную решетку можно эффективно использовать на частотах от 2 до 10 кГц, т.е. в области наиболее равномерного распределения звукового давления амплитудно-частотной характеристики.

Измерения характеристики направленности решетки проходили в следующем порядке. С помощью специального программного обеспечения формировался звуковой сигнал заданной частоты, подавался на антенную решетку и излучался в атмосферу. Далее с помощью шумомера фиксировался уровень принимаемого звукового давления на данной частоте. После этого антенная решетка поворачивалась на определенный угол в горизонтальной плоскости и процесс излучения сигнала и замера звукового давления повторялся. Данная процедура повторялась до тех пор, пока не пройден сектор углов от минус 90 до плюс 90 град относительно оси антенной решетки. Далее полученные данные заносились в компьютер, где происходили их обработка и сравнение с теоретическими расчетами.

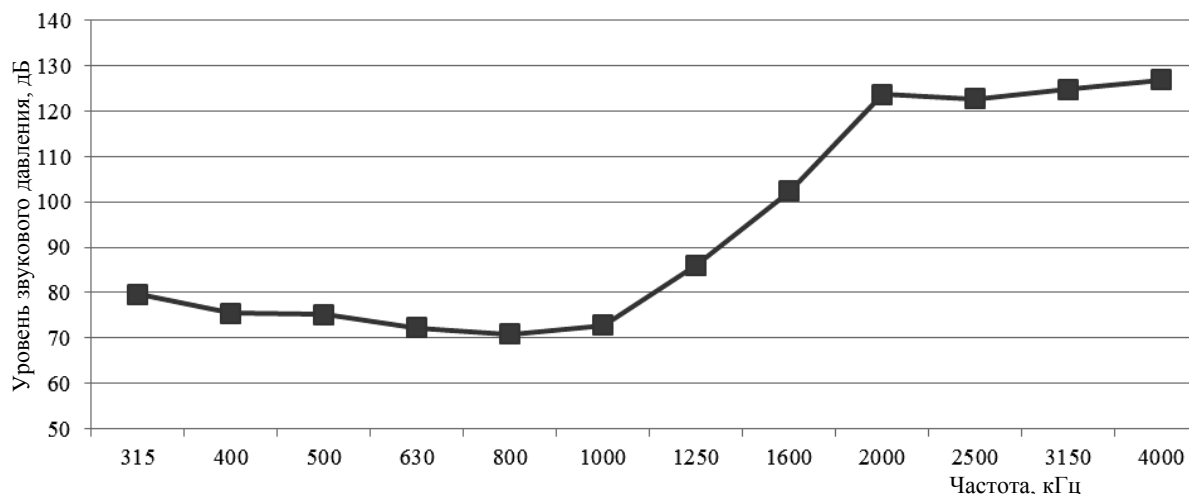


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика антенной решетки на расстоянии 20 м

Измерения и теоретические расчеты диаграммы направленности (ДН) решетки проводились для частот 2500 (рис. 4) и 5000 Гц.

Теоретический расчет ДН проводился следующим образом. Акустическая антенная решетка представляет собой матрицу из размещенных с определенным шагом единичных излучателей.

Для приемника расположенного в дальней зоне антенной решетки, разность хода лучей от центра излучения решетки и конкретного излучателя до точки наблюдения с угловыми координатами θ и φ будет равна

$$\Delta r = i \times d_x \sin(\theta) \cos(\varphi) + j \times d_y \sin(\theta) \sin(\varphi), \quad (1)$$

где d_x, d_y – шаг решетки по оси OX и OY соответственно, i, j – порядковый номер излучателя.

В дальней зоне акустическое поле антенной решетки представляет собой сумму полей каждого отдельного элемента, и его можно представить в виде произведения диаграммы направленности единичного элемента на множитель направленности антенной решетки:

$$A(R) = F_{\text{эл}}(\theta, \varphi) f_{\Sigma}(\theta, \varphi) \frac{e^{-jkR}}{R}, \quad (2)$$

где $F_{\text{эл}}(\theta, \varphi)$ – диаграмма направленности единичного элемента, $f_{\Sigma}(\theta, \varphi)$ – множитель решетки.

В рассматриваемой системе координат в дальней зоне диаграммы направленности единичных излучателей $F_{\text{эл}}(\theta, \varphi)$ различаются на величину Δr (1). В общем случае, делая предположение, что амплитуда возбуждения единичного элемента может различаться, множитель решетки можно записать следующим образом:

$$f_{\Sigma}(\theta, \varphi) = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} |P_{i,j}| e^{jk\Delta r_{i,j}}, \quad (3)$$

где i, j – порядковый номер излучателя; $P_{i,j}$ – амплитуда единичного элемента, которая в расчетах ниже принималась одинаковой.

Результаты анализа показывают, что в пределах главного лепестка ДН решетки, отмечается хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных. Уровень боковых лепестков в экспериментальных данных оказался более высоким, чем по теории, что можно объяснить неучитываемой в расчетах неидентичностью используемых единичных элементов решетки, а также наличием фонового окружающего шума, который с увеличением угла отклонения оси антенны становится все более значимым в результатах измерений.

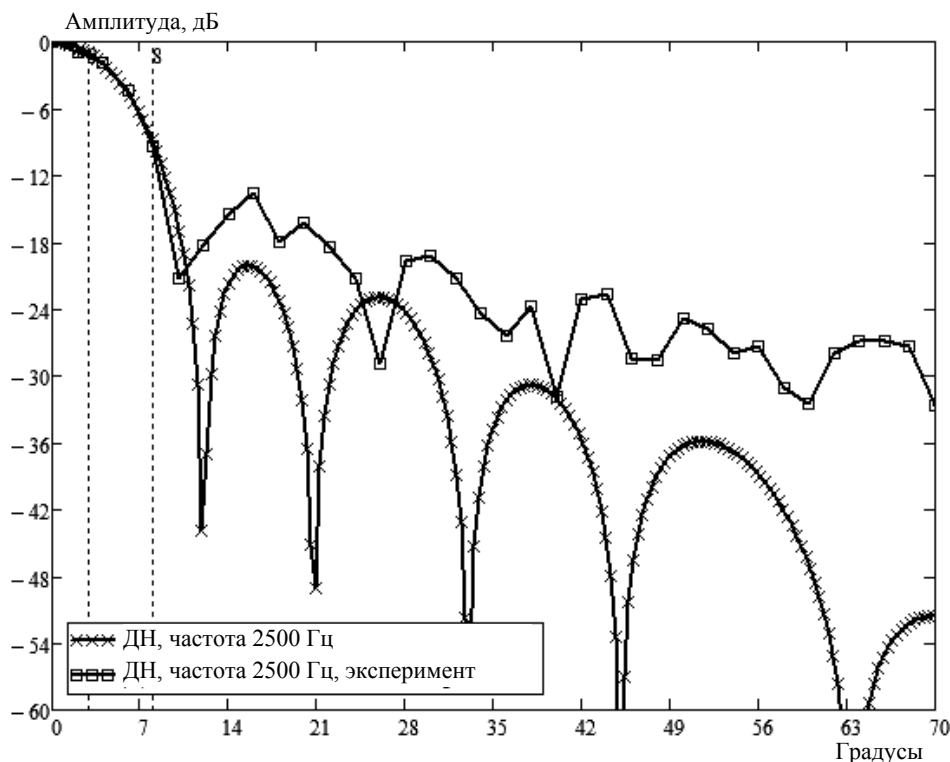


Рис. 4. Диаграмма направленности антенной решетки на частоте 2500 Гц

Исследование уровня звукового давления, развиваемого антенной решеткой, проводилось по следующему алгоритму. Шумомер располагается на выбранном расстоянии по оси антенной решетки.

ки. С выхода управляющего компьютера сигнал заданной частоты подавался на вход усилителя мощности и далее на элементы антенной решетки. С помощью регулятора громкости производилось изменение уровня сигнала, которое контролировалось с помощью осциллографа. Измерения проводились в диапазоне 10–100% подаваемой электрической мощности сигнала на антенную решетку. Для каждой выбранной частоты проводились измерения на различных расстояниях от антенной решетки.

Результаты измерений уровня звукового давления антенной решетки для частоты 2500 Гц и расстояний от 10 до 200 м приведены на рис. 5. Видно, что с увеличением подводимой мощности происходит насыщение создаваемого уровня звука. Это, вероятно, происходит из-за наличия нелинейных эффектов, возникающих при мощном звуке. Можно рассчитать ослабление звука на различных дистанциях при различной подаваемой мощности. В частности, из данного рисунка видно, что затухание звука при увеличении расстояния в 2 раза не спадает на 6 дБ, как было бы при распространении сферической волны в свободном пространстве. Возникающая разница в ослаблении как раз и говорит о величине дополнительного ослабления звука, вызванного влиянием нелинейных эффектов, подстилающей поверхности, а также метеорологических условий в момент проведения эксперимента.

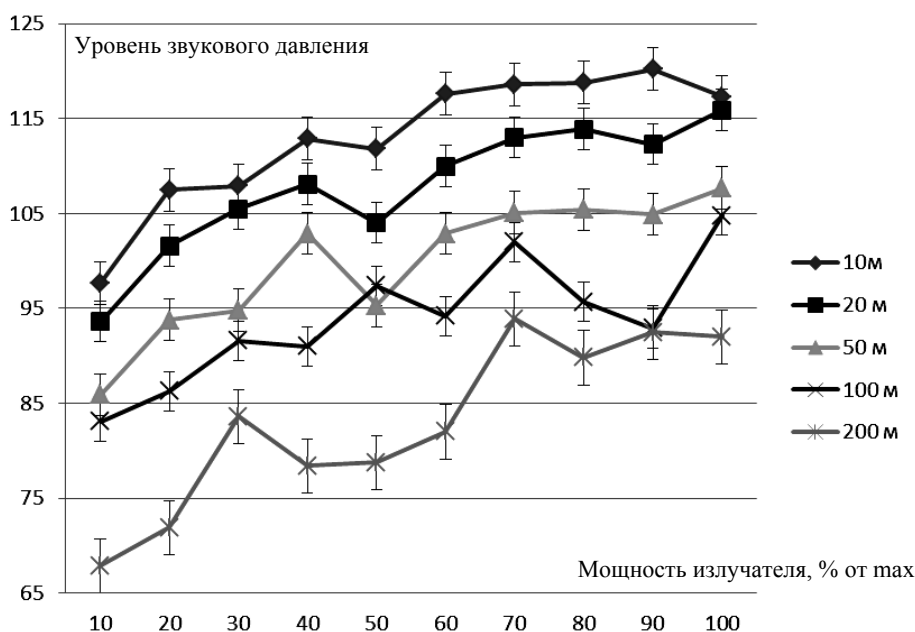


Рис. 5. Уровень звукового давления антенной решетки в зависимости от подаваемой мощности сигнала, для различных расстояний

Заключение. В статье представлены результаты разработки и исследований мощной излучающей акустической антенной решетки для атмосферных приложений. Приведены результаты измерений амплитудно-частотной характеристики, диаграммы направленности, а также зависимости уровня звукового давления антенной решетки на различных расстояниях. Методики, описанные в данной статье, можно использовать при разработке и исследованиях любых других акустических антенных решеток для атмосферных исследований. Характеристики решетки приведены в таблице.

Характеристики мощной излучающей 91-элементной акустической антенной решетки

| | |
|---|-------------------------------|
| Потребляемая электрическая мощность, Вт | 1000 |
| Максимальное акустическое давление, дБ/1м | 155 |
| Габариты, мм | 950×900×200 |
| Ширина ДН | 15° ... 7° (2000 ... 5000 Гц) |
| Резонансная частота, Гц | 2350 Гц |
| Диапазон рабочих температур, °С | -30 ... +40 °С |
| Дальность вещания | Не менее 1500 м |

Разработанная антенная решетка по своим характеристикам превосходит известный аналог LRAD1000 [7] компании LRAD Corporation и имеет примерно равные характеристики в сравнении с моделью излучателя HS-24 [8] компании Ultra Electronics USSI.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-02-31238/мол_а.

Литература

1. Bradley S.G. Atmospheric acoustic remote sensing: principles and applications. – Florida, USA: CRC Press / Taylor&Francis Group, 2007. – 296 p.
2. Atmospheric Systems Corporation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://minisodar.com>, свободный (дата обращения: 30.06.2015).
3. Красненко Н.П. Дальнее звуковое вещание: проблемы, итоги, возможности / Н.П. Красненко // Сверхширокополосные сигналы в радиолокационных и акустических системах: конспекты лекций / Науч. совет по распространению радиоволн. – Муром: Полиграф. центр МИ ВлГУ, 2006. – С. 96–115.
4. Мощные излучающие акустические антенные решетки / Н.П. Красненко, А.С. Раков, и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2012. – № 3. – С. 129–130.
5. Мощные акустические антенные решетки / Н.П. Красненко, А.Н. Кудрявцев, А.С. Раков и др. // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – № 4(30). – С. 86–90.
6. Model KSN 1165A Bullet Tweeter. Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bestgroupstechnologies.com/doc/KSN-1165A-Datasheet.pdf>, свободный (дата обращения: 30.06.2015).
7. LRAD1000 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.lradx.com/lrad_products/lrad-1000/, свободный (дата обращения: 30.06.2015).
8. Акустическая пушка HS-24 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hyperspike.ru/products/ahd/hs-24/>, свободный (дата обращения: 30.06.2015).

Красненко Николай Петрович

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. радиотехнических систем ТУСУРа,
гл. науч. сотрудник Института мониторинга климатических и экологических систем (ИМКЭС) СО РАН
Тел.: +7 (382-2) 49-24-18
Эл. почта: krasnenko@imces.ru

Кудрявцев Андрей Николаевич

Ведущий электроник Института оптики атмосферы СО РАН
Тел.: +7 (382-2) 49-20-24 (доб. 1031)
Эл. почта: zoxu1@yandex.ru

Раков Александр Сергеевич

Мл. науч. сотрудник ИМКЭС СО РАН
Тел.: +7 (382-2) 49-20-24 (доб. 1031)
Эл. почта: dipol@ngs.ru

Раков Денис Сергеевич

Канд. техн. наук, науч. сотрудник ИМКЭС СО РАН
Тел.: +7 (382-2) 49-20-24 (доб. 1031)
Эл. почта: rakov@imces.ru

Krasnenko N.P., Kudryavtsev A.N., Rakov A.S., Rakov D.S.

Investigation of the characteristics of a high-power transmitting acoustic antenna array

Results of experimental and theoretical investigations of the characteristics of a high-power transmitting acoustic antenna array intended for atmospheric applications are presented. The method of investigation and calculation is described. The validity of the calculated antenna directional pattern has been confirmed. The main parameters of the developed antenna array are given.

Keywords: antenna array, antenna directional pattern, sound pressure level, maximum sounding range, power.