

## **Оценка влияния неидентичности параметров элементов акустической антенной решетки на её диаграмму направленности**

Н.П. Красненко<sup>1,3</sup>, А.С. Раков<sup>3</sup>, Д.С. Раков<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, 634055, г. Томск, Академический пр., 10/3

e-mail: [krasnenko@imces.ru](mailto:krasnenko@imces.ru), [dipol@ngs.ru](mailto:dipol@ngs.ru), [rds@tpu.ru](mailto:rds@tpu.ru)

*В статье рассмотрены вопросы построения акустической антенной решетки и влияния разброса амплитудно-частотных характеристик единичных элементов на её диаграмму направленности. На примере 25 элементной антенной решетки рассмотрен процесс формирования оптимальной конфигурации расположения элементов в решетке. Описан метод расчета диаграммы направленности антенных решеток.*

*Problems of designing an acoustic antenna array and influencing of the spread in the amplitude-frequency characteristics of individual elements on the antenna directivity pattern are considered in the present paper. On the example of 25 element antenna array, the process of obtaining an optimal configuration of the arrangement of the array elements is considered. A method for calculating the directivity pattern of antenna arrays is described.*

### **Введение**

Акустические антенные решетки применяются в различных фундаментальных и прикладных задачах атмосферной акустики. Широкое применение они нашли в системах дистанционного акустического зондирования атмосферы [1-3], звукового вещания, информационного и психологического воздействия на биообъекты [4], средствах охраны периметра.

Акустическая антенная решетка (АР) представляет собой совокупность ориентированных дискретных излучателей, расположенных на определенном расстоянии друг от друга. Диаграмма направленности (ДН) АР формируется в результате интерференции волн, излучаемых отдельными элементами. Диаграмму направленности АР можно представить в виде произведения ДН элемента на множитель решетки. Достоинством антенной решетки является то, что она позволяет значительно увеличить мощность акустического излучения за счет сложения мощностей единичных излучателей, из которых она состоит. Эти особенности антенных решеток обеспечили их эффективное использование. Методы расчета акустических АР в основном совпадают с методами расчета электромагнитных АР СВЧ диапазона [5-7].

Синтез антенной решетки с заданным уровнем боковых лепестков диаграммы направленности является актуальной задачей. Он заключается в выборе конфигурации решетки, типа и числа элементов, амплитудного распределения по апертуре решетки. Численное моделирование различных вариантов амплитудного распределения по апертуре решетки, например, проведено в работах [8-9].

Особенностью применения электроакустических преобразователей в антенной решетке является разброс их параметров [10], в частности, пьезоэлектрических

преобразователей [11], который вызван в первую очередь технологией их производства. Поэтому на практике, при проектировании и продолжительном применении акустических антенных решеток (с учетом замены элементов) затруднительно использовать какие-то оптимальные фиксированные амплитудные распределения поля по апертуре. Возникает необходимость, с одной стороны, подбора излучателей по параметрам, с другой, исследовать влияние на диаграмму направленности АР неидентичности амплитудно-частотных характеристик единичных элементов.

### Метод расчета диаграммы направленности антенной решетки

Расчет диаграммы направленности антенной решетки основывается на расчете акустического давления, создаваемого АР в дальней зоне. В данном случае, каждый единичный излучатель рассматривается как точечный, обладающий заданной диаграммой направленности и расположенный в той точке реального излучателя, относительно которой определена его ДН. Соответственно, для приемника расположенного в дальней зоне антенной решетки, разность хода лучей от центра излучения решетки и конкретного излучателя до точки наблюдения с угловыми координатами  $\theta$  и  $\varphi$  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 ОХ и ОУ соответственно,

$i, j$  – порядковый номер излучателя.

В дальней зоне акустическое поле антенной решетки представляет собой сумму полей каждого отдельного элемента и определяется произведением диаграммы направленности единичного элемента на множитель антенной решетки:

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

где  $F_{ye}(\theta, \varphi)$  – диаграмма направленности единичного элемента,

$f_{\Sigma}(\theta, \varphi)$  – множитель решетки.

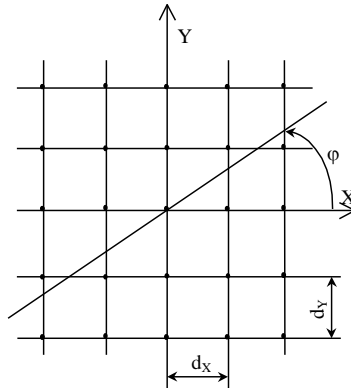
В рассматриваемой системе координат в дальней зоне диаграммы направленности единичных излучателей  $F_{ye}(\theta, \varphi)$  сдвигаются на величину  $\Delta r$  (1). В общем случае, делая предположение, что амплитуда возбуждения единичного элемента может различаться, множитель решетки определяется следующим 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.

Например, рассмотрим излучение плоской АР прямоугольной формы (рисунок 1) с расположением изотропных излучателей в узлах прямоугольной сетки. Данная решетка состоит из  $N_Y = 2M_Y + 1$  излучателей, параллельных оси  $Y$ , с расстоянием между рядами равным  $d_Y$ . Каждый ряд состоит из  $N_X = 2M_X + 1$  излучателей с шагом  $d_X$ . Координаты излучателей в плоскости решетки определяются как  $x_n = n_X d_X$  ( $-M_X \leq n_X \leq M_X$ ) и  $y_n = n_Y d_Y$  ( $-M_Y \leq n_Y \leq M_Y$ ).



**Рис. 1. Плоская антенная решетка прямоугольной формы.**

Для равномерной плоской АР прямоугольной формы (т.е. с равномерным амплитудным и фазовым распределением) множитель решетки определяется по формуле:

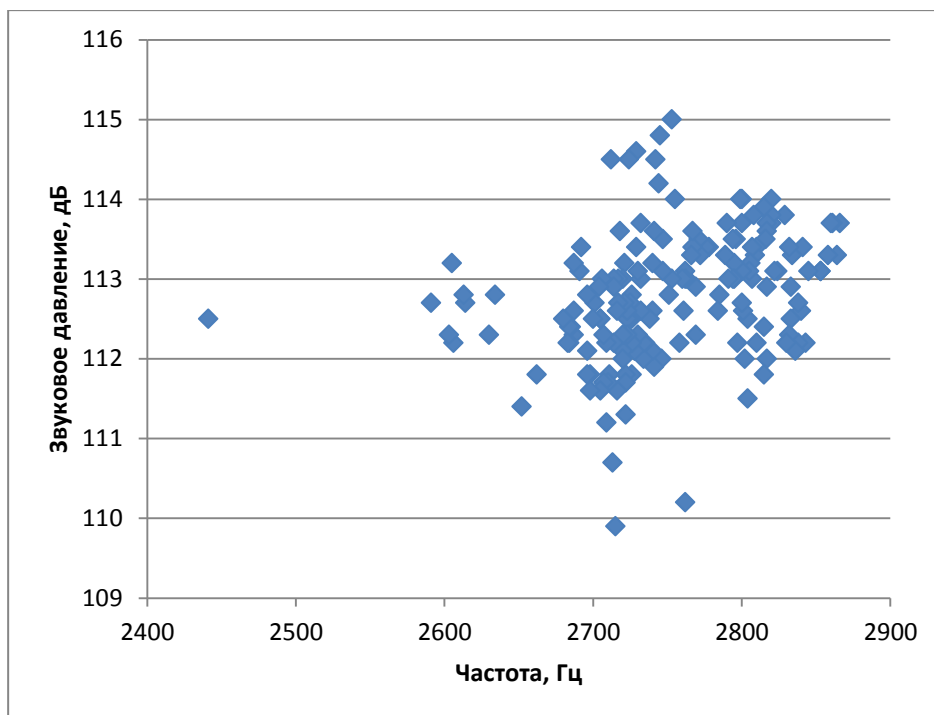
$$f_{\Sigma}(\theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{N_x}{2} \cdot [k \cdot d_x \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi - \varphi_x]\right)}{\sin\left(\frac{1}{2} \cdot [k \cdot d_x \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi - \varphi_x]\right)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{N_y}{2} \cdot [k \cdot d_y \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi - \varphi_y]\right)}{\sin\left(\frac{1}{2} \cdot [k \cdot d_y \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi - \varphi_y]\right)}.$$

Как было отмечено выше, на практике при создании АР приходится иметь дело с набором излучателей имеющих неидентичные амплитудно-частотные параметры. Поэтому при создании решетки предварительно проводится паспортизация всех имеющихся излучателей и выбираются наиболее близкие по своим параметрам.

### **Исследование акустической антенной решетки**

Рассмотрим процесс формирования диаграммы направленности АР на примере 25 элементной плоской решетки квадратной формы. Схема размещения элементов, как на рисунке 1. В качестве единичного элемента используется пьезокерамический излучатель ПЭП-1 [11]. Основными достоинствами применения пьезокерамических громкоговорителей, по сравнению с электродинамическими является высокий коэффициент преобразования электрической мощности в акустическую, малый вес и габаритные размеры. Недостатком данного типа излучателей является их частотная избирательность, по сути дела представляет собой резонансный контур в узком диапазоне частот.

Анализ партии из 170 излучателей выявил сильный разброс их параметров по уровню развиваемого звукового давления на резонансной частоте и разброс значений самой резонансной частоты. Это показано на рисунке 2. Видно, что большая часть излучателей имеет резонансную частоту в области 2700-2750 Гц (83 излучателя), и в то же время имеет разброс по уровню звукового давления от 110 до 115 дБ.



**Рис. 2. Разброс параметров амплитуды и резонансной частоты, рассматриваемой партии излучателей.**

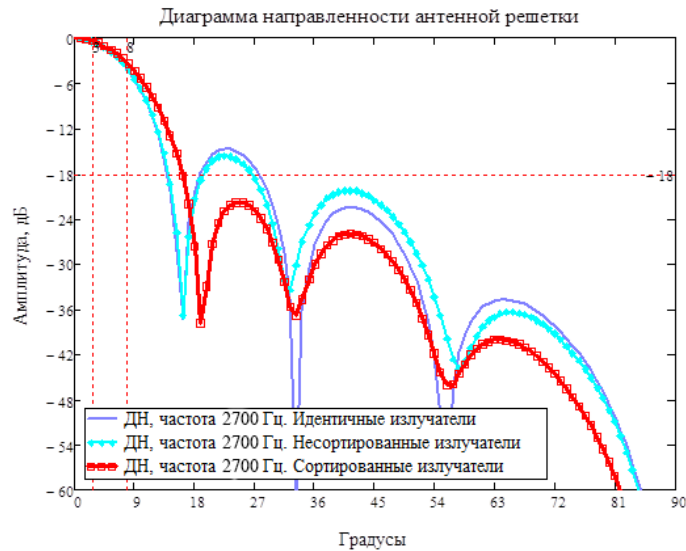
Рассмотрим три примера построения антенной решетки:

1. Единичные элементы антенной решетки подобраны с идентичными параметрами.
2. Элементы в антенной решетке взяты в случайном порядке.
3. Элементы в антенной решетке подобраны таким образом, чтобы амплитудное распределение АР имело спадающий характер к краям апертуры раскрыва.

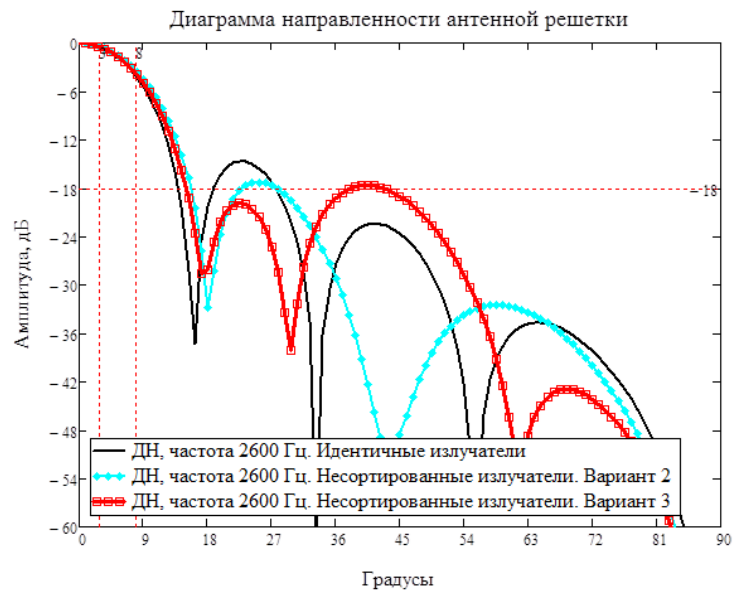
Таким образом, для первого примера были отобраны 25 излучателей из 83 имеющих приблизительно одинаковые параметры. Рассчитанная диаграмма направленности показана на рисунке 3 сплошной линией синего цвета.

Во втором примере были случайно взяты 25 излучателей и случайным образом расположены в антенной решетке. Рассчитанная диаграмма направленности АР для этого примера показана на рисунке 3 бирюзовой линией.

В третьем примере были использованы те же излучатели, что и для второго, но они были расположены таким образом, чтобы амплитудное распределение спадало к краям раскрыва АР. Диаграмма направленности АР для этого примера показана на рисунке 3 красной линией.



**Рис. 3. Диаграмма направленности 25 элементной антенной решетки.**



**Рис. 4. Диаграмма направленности 25 элементной антенной решетки.**

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Ширина диаграммы направленности минимальна для случая построения антенной решетки с равномерным амплитудным распределением.

2. Наименьший уровень боковых лепестков имеет решетка со спадающим к краям амплитудным распределением, при этом ширина главного лепестка ДН становится больше.

3. Расположение элементов случайным образом по апертуре АР делает непредсказуемым расположение и уровень боковых лепестков ДН. Если первый боковой лепесток располагается в секторе углов от  $20^\circ$  до  $25^\circ$ , что практически совпадает с положением первого бокового лепестка при равномерном амплитудном распределении поля, то расположение и уровень второго и третьего лепестков имеют большой разброс. На рисунке 4 представлены диаграммы направленности АР, что и в примере 2, но расположение элементов произвольно меняется для двух вариантов (вариант 2, вариант 3). Уровень амплитуды всех трех боковых лепестков, по сравнению с аналогичными боковыми лепестками ДН в решетке с равномерным амплитудным

распределением, как правило, отличался на 5-7 дБ, а иногда до 12-15 дБ, как в большую, так и в меньшую сторону.

Полученные в результате моделирования различные характеристики ДН 25-элементной антенной решетки указывают на необходимость проведения паспортизации единичных излучателей и их сортировки, с целью создания оптимального амплитудного распределения на раскрыве антенны.

### **Заключение**

В работе были рассмотрены вопросы построения акустической антенной решетки из 25 элементов. Показана необходимость подбора единичных элементов по параметрам.

*Результаты получены при финансовой поддержке по проекту задания Минобрнауки РФ № 5.3279.2017/4.6.*

### **Литература**

1. Н.П. Красненко. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. Томск, 2001, 278 с.
2. Н.П. Красненко, В.Н. Абрамочкин, Г.В. Бухлова и др. Звуковое вещание в приземной атмосфере и его прогнозирование // Акустические измерения и стандартизация. Ультразвук и ультразвуковые технологии. Атмосферная акустика. Акустика океана / Сб. тр. XV сессии Российского акустического общества. Т. II. – М.: ГЕОС, 2004. – С. 110-113.
3. Н.П. Красненко. Приземное распространение звуковых волн в атмосфере // Акустические измерения и стандартизация. Ультразвук и ультразвуковые технологии. Атмосферная акустика. Акустика океана / Сб. тр. XV сессии Российского акустического общества. Т. II. – М.: ГЕОС, 2004. – С. 97-102.
4. Н.П. Красненко, Дальнее звуковое вещание: проблемы, итоги, возможности, В сб. конспекта лекции Второй всероссийской научной конференции-семинара Сверхширокополосные сигналы в радиолокационных и акустических системах, Муром, 2006, с. 96-116
5. Pierce A.D. Acoustic. An introduction to its physical principle and application. – McGraw-Hill Book Company, 1981. – 520.
6. Г.Н. Кочержевский и др. Антенно-фидерные устройства./Учебник для высших учебных заведений. М.: «Радио и связь» 1989 г. – 359 с.
7. М.С. Жук, Ю.Б. Молочков. Проектирование антенно-фидерных устройств, М. – Л.: Энергия, 1966 – 648 с.
8. К. А. Лайко, Ю. О. Филимонова Амплитудный синтез диаграмм направленности антенных решеток с минимальным уровнем первого лепестка и контролируемым спадом последующих // Доклады ТУСУР. – 2013. – № 3(29). – С. 33–37.
9. Антенны : учебное пособие для бакалавров и магистрантов , обучающихся по направлениям 210200, 211000, 210700 / Ю . Т . Зырянов , П . А . Федюнин , О . А . Белоусов и др . – Тамбов : Изд - во ФГБОУ ВПО « ТГТУ », 2014. – 128 с.
10. Н.П. Красненко, А.А. Кушнер Влияние разброса параметров элементов на характеристики акустической фазированной антенной решетки // Акустические измерения и стандартизация. Ультразвук и ультразвуковые технологии. Атмосферная акустика. Акустика океана. Сборник трудов XVI сессии Российского акустического общества. Т. 11. – М.: ГЕОС, 2005, с. 117-119.
11. Преобразователь электроакустический пьезокерамический ПЭП- 1. [электронный ресурс] URL: <http://aerofon34.ru/index.php/produksiya> (дата обращения 25.02.2018 г.).