

УДК 534.864

В.С. Дидковский, д-р техн. наук, С.А. Лунева, канд. физ.-мат. наук, В.П. Заец

## Направленные свойства изогнутых линейных массивов излучателей звука

Получены аналитические соотношения для расчета диаграмм направленности изогнутых линейных массивов ненаправленных излучателей звука. Построены диаграммы направленности и даны рекомендации по конструктивным параметрам данных излучателей звука.

**Analytical correlations for the calculation of orientation diagrams of the bent linear arrays of nondirectional sound emitters are got. The orientation diagrams are built and recommendations on the structural parameters of these sound emitters are given.**

**Ключевые слова:** линейный массив излучателей, изогнутый пошаговый поворот конструкции, характеристика направленности, диаграмма направленности, частотный диапазон, акустическая система, громкоговоритель.

### Введение

Для озвучивания больших по площади помещений и открытых пространств, применяют современные системы линейных массивов с постоянным углом поворота конструкции. Такие излучатели представлены продукцией фирм JBL Pro, Meister, Electro-Voice, PCF и других.

Для правильной установки изогнутых массивов, в частности, выбора угла наклона на озвучиваемую плоскость, необходимо понимать закономерности формирования звукового поля такими излучателями. Исследования, проведенные фирмами-производителями, представляют коммерческую тайну, а паспортные данные на аппаратуру не содержат исчерпывающую информацию. В связи с этим, возникает потребность в разработке аналитического аппарата для расчета звукового поля, создаваемого многосекционными изогнутыми линейными массивами.

### 1. Принципы формирования звукового поля линейными массивами

Преимущество использования линейных массивов излучателей заключается в создании такой направленности излучения звука, при которой большая часть звуковой энергии попадает непосредственно на слушателей, в результа-

те чего увеличивается разность уровней прямого звука и реверберационного фона.

Это обстоятельство особенно существенно в помещениях больших объемов и является эффективным решением проблемы создания достаточной разборчивости и ясности звучания на слушательных местах.

Помимо формирования концентрированного излучения звука обращение к линейным массивам позволяет также значительно повысить акустическую мощность системы в целом.

Если в гидроакустике такие системы используются давно, то в электроакустике идея применения линейного массива излучателей известна с 40-50-х годов XX века и принадлежит Г. Олсону и Л. Баренеку [1]. Производство подобных систем начато фирмой JBL в 70-е годы. Системы, построенные по принципу линейного массива, помимо качественного звучания, обладают узкой диаграммой направленности в вертикальной плоскости и, при этом, обеспечивают значительное горизонтальное покрытие, в результате чего пригодны для озвучивания значительных по площади пространств [2].

Принцип направленного излучения линейного массива заключается в том, что если все излучатели создают одинаковые звуковые волны, то в направлении акустической оси системы ( $\theta = 0$ ) звуковые давления складываются синфазно, образуя максимальное излучение или, так называемую «конструктивную интерференцию». При отклонении от акустической оси под произвольным углом, вследствие различия расстояний до излучателей, появляется разность фаз звуковых сигналов. При этом эффективность суммирования уменьшается, вплоть до полного отсутствия излучения в определенных направлениях в результате взаимной компенсации звуковых давлений излучателей, находящихся в противофазе («деструктивная интерференция»).

Указанные характеристики еще более подчеркиваются при использовании двойных массивов излучателей [3].

Основным достоинством линейного массива излучателей является его компактность, поскольку большие размеры требуются только в одном направлении, перпендикулярном к направлению излучения. Однако, на практике

следует учитывать изменение характеристики направленности массива на различных частотах. Этот эффект увеличивается в силу того, что образующие систему громкоговорители обладают собственной направленностью зависящей от частоты излучения.

В последние годы ведущие фирмы по производству электроакустической аппаратуры обратились к выпуску изогнутых линейных массивов, что позволяет расширить диаграмму направленности системы в вертикальной плоскости, сохраняя ее неизменной в горизонтальной. Идея применения изогнутых массивов базируется на уменьшении эффекта интерференции звуковых волн отдельных излучателей, акустические оси которых не параллельны друг другу, а образуют некоторый угол, что неизбежно должно привести к расширению зоны покрытия.

Такие массивы представляют собой секционированные конструкции, общий каркас которых изогнут по секционно под постоянным углом. Каждая секция включает в себя до трех групп излучателей различного частотного диапазона и различно ориентированных в пространстве. По сути, использование в каждой секции трехполосной акустической системы позволяет создать требуемую характеристику направленности массива в различных частотных диапазонах.

## 2. Характеристика направленности изогнутого линейного массива точечных излучателей

Расчет характеристики направленности (ХН) изогнутой линейной группы излучателей представляет собой сложную аналитическую задачу.

Один из способов вычисления характеристики направленности излучающих электроакустических систем основан на представлении отдельных излучателей в виде точечных источников или монополей [4]. Этот метод известен в гидроакустике [5] и справедлив для излучателей малых волновых размеров.

Если рассматриваемый массив электроакустических излучателей состоит из громкоговорителей с одинаковой направленностью, то ХН одиночного источника следует учесть при выводе аналитического выражения результирующей ХН, сохраняя общий подход к представлению поля в виде суперпозиции полей отдельных источников.

Простейшей математической моделью систем является звукопрозрачная система, для которой предполагается, что взаимное возмущение поля отдельных ее элементов пренебрежимо мало [5]. Такая модель обычно используется для расчета поля дискретной систе-

мы с разреженной постановкой элементов, имеющих малые по сравнению с длиной волны размеры.

Рассмотрим формирование звукового поля массивом из  $N$  точечных источников.

Поскольку все излучатели синфазны, то суммарный потенциал колебательной скорости  $\varphi_{\Sigma}$  в точке наблюдения равен сумме потенциалов, создаваемых каждым из элементов массива.

$$\varphi_{\Sigma} = \sum_{n=1}^N \varphi_n \quad (1)$$

Потенциалы точечных источников равной производительности  $W$ , соответственно, равны [6]:

$$\varphi_n = \frac{W}{4\pi r_n} e^{-jkr_n}, \quad (2)$$

где  $r_n$  - расстояние от  $n$ -ого элемента массива до точки наблюдения;  $k$  - волновое число.

Геометрия линейного массива из  $N$  излучателей, расположенных в одной плоскости, с постоянным углом поворота конструкции  $\gamma$  и равным расстоянием между излучателями  $d$  представлена на рис.1. Ось  $\theta = 0$  соответствует направлению акустической оси аналогичной прямолинейной группы источников.

Выберем точку наблюдения А в плоскости системы на расстоянии  $r_1 \rightarrow \infty$  (или  $r_1 \gg \lambda$ ,  $\lambda$  - длина излучаемой волны) от первого элемента тогда расстояние от всех последующих элементов  $r_2, \dots, r_N$  до точки А можно представить параллельными прямыми. Причем, как следует из геометрии системы (рис.1),

$$\begin{aligned} r_2 &= r_1 + \Delta r_2; \\ r_3 &= r_2 + \Delta r_3 = r_1 + (\Delta r_2 + \Delta r_3); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\dots \dots \dots$$

$$r_N = r_{N-1} + \Delta r_N = r_1 + (\Delta r_2 + \dots + \Delta r_N);$$

где  $\Delta r_n$  - разности хода звуковых лучей, соответственно  $n$ -ого и предыдущего  $(n-1)$ -ого источников звука.

Углы  $\alpha_n$ , образованные перпендикуляром, восстановленным из  $(n-1)$ -ого источника на направление  $r_n$ , и отрезком, соединяющим  $(n-1)$ -ый и  $n$ -ый излучатели, соответственно равны:

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \theta + \gamma; \\ \alpha_3 &= \theta + 2\gamma; \\ \dots \dots \dots \\ \alpha_N &= \theta + (N-1)\gamma; \end{aligned} \quad (4)$$

Поскольку расстояние между элементами массива одинаковы и равны  $d$ , то величины  $\Delta r_n$  определяются следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} \Delta r_2 &= d \sin(\theta + \gamma) \\ \Delta r_2 &= d \sin(\theta + 2\gamma) \\ \dots\dots\dots \\ \Delta r_N &= d \sin[\theta + (N - 1)\gamma] \end{aligned} \quad (5)$$

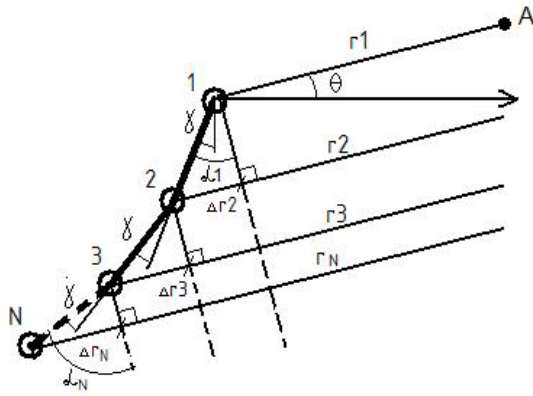


Рис. 1. Геометрия изогнутого эквидистантного линейного массива N излучателей с постоянным углом поворота конструкции  $\gamma$

На основании формул (1), (3) и (5) и с учетом того, что  $\Delta r_n \ll r_n$ , запишем выражение для суммарного потенциала скоростей:

$$\varphi_{\Sigma} = \varphi_1 \left\{ 1 + e^{-jkd \sin(\theta + \gamma)} + e^{-jkd[\sin(\theta + \gamma) + \sin(\theta + 2\gamma)]} + \dots \right. \\ \left. \dots + e^{-jkd[\sin(\theta + \gamma) + \dots + \sin(\theta + (N-1)\gamma)]} \right\} \quad (6)$$

Если совместить сферическую систему координат  $(r, \theta, \varphi)$  с центром массива и выбрать точку наблюдения на поверхности сферы достаточно большого радиуса  $r \gg \lambda$ , то ХН группы излучателей можно определить по формуле:

$$R(\theta, \varphi) = \frac{|\varphi_{\Sigma}(\theta, \varphi)|}{\max |\varphi_{\Sigma}(\theta, \varphi)|} \Big|_{r = const} \Big|_{r \gg \lambda} \quad (7)$$

где  $\max |\varphi_{\Sigma}(\theta, \varphi)|$  - максимальное значение суммарного потенциала на поверхности сферы.

Тогда в вертикальной плоскости ( $\varphi = const$ ), исходя из формулы (6) диаграмма направленности рассматриваемой системы будет иметь вид:

$$R(\theta) = \frac{\left| 1 + \sum_{n=1}^{N-1} e^{m-1} \sum_{n=1}^n (-jkd) \sin(\theta + m\gamma) \right|}{\max \left| 1 + \sum_{n=1}^{N-1} e^{m-1} \sum_{n=1}^n (-jkd) \sin(\theta + m\gamma) \right|} \quad (8)$$

Отметим, что достоверность выведенного соотношения (8) контролировалась сведением его при  $\gamma = 0$  к известному выражению для прямолинейной группы из  $N$  излучателей [2]:

$$R(\theta) = \frac{\sin(Nx)}{N \sin(x)}, \quad x = \frac{\pi d}{\lambda} \sin(\theta) \quad (9)$$

На рис.2 приведены графики ДН прямолинейного и изогнутого массивов, состоящих из 7 точечных элементов, соответственно, на частотах 500 и 2000 Гц при расстоянии между элементами  $d = 0,085$  м.

Как следует из графиков (рис. 2), в результате изогнутости конструкции акустическая ось системы смещается по отношению к аналогичной оси прямолинейного массива ( $\gamma = 0$ ) на угол, равный  $\frac{N-1}{2} \gamma$ .

В рассмотренных случаях этот угол составляет  $15^\circ$  ( $\gamma = 5^\circ$ ) и  $45^\circ$  ( $\gamma = 15^\circ$ ).

Если на низких и средних частотах изгиб массива практически, влияет только на угол поворота акустической оси и приводит к некоторому расширению ДН на средних частотах, то в высокочастотном диапазоне появляются нежелательные интерференционные минимумы излучения. Их наличие объясняется ослаблением взаимодействия элементов, в результате чего формирование направленного излучения создается не системой в целом, а отдельными ее частями. Этот эффект усиливается при увеличении угла поворота ( $\gamma = 15^\circ$ ).

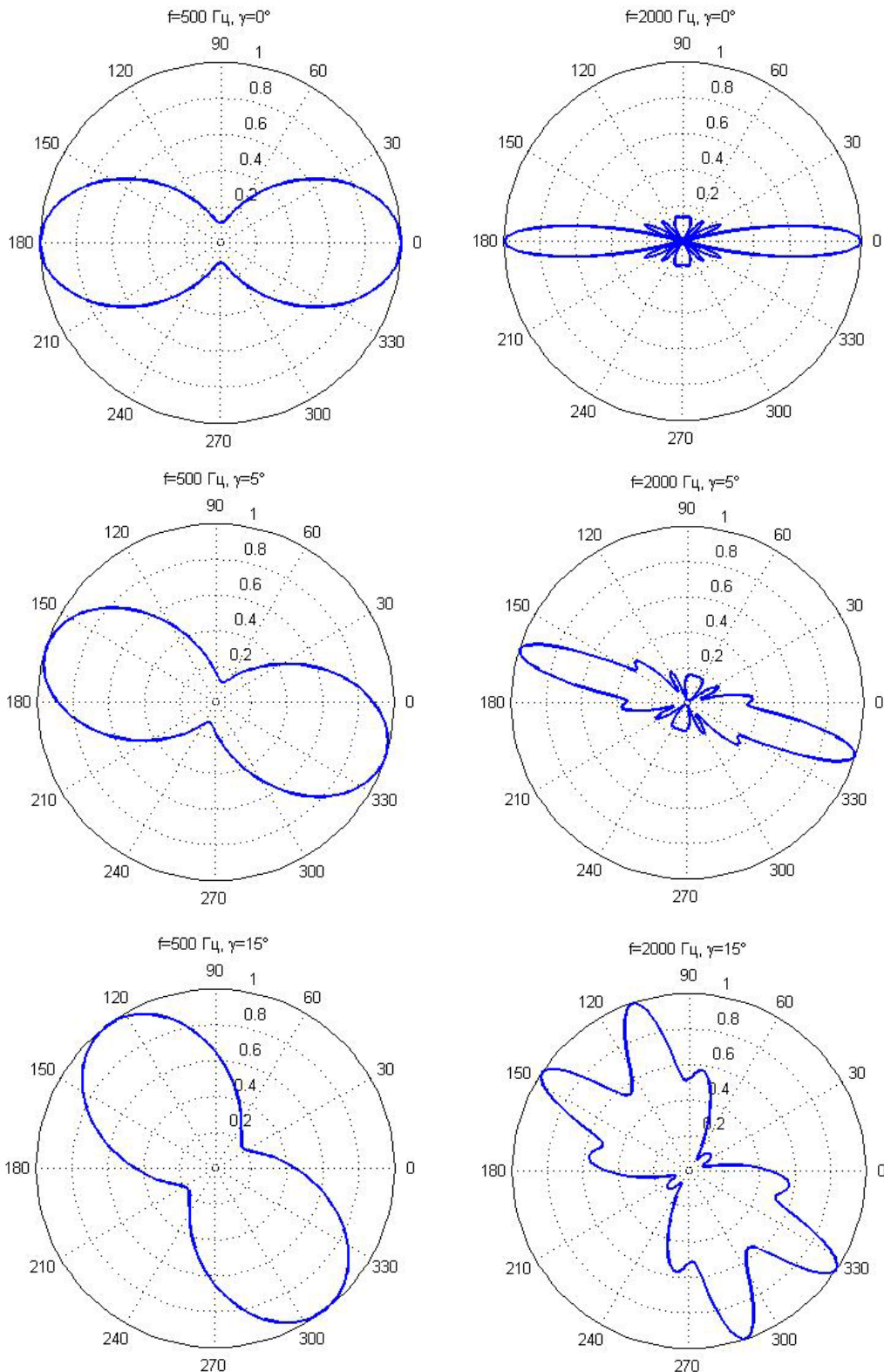
### Выводы

Для вычисления характеристики направленности линейных изогнутых массивов электроакустических излучателей применен метод представления отдельных излучателей в виде монополей.

Суммарное звуковое поле найдено в виде суперпозиции звуковых полей точечных источников звука, составляющих эквивалентную пространственную группу.

Взаимное влияние излучателей не учитывается, поскольку предполагается, что расстояния между излучателями больше их реальных размеров.

Анализ полученных диаграмм направленности показал, что для создания направленного излучения угол поворота конструкции для рассматриваемой системы не должен превышать  $10^\circ$  при относительно малых волновых расстояниях между элементами системы  $\frac{d}{\lambda} \ll 1$ .



**Рис.2.** Диаграммы направленности линейного массива из 7 точечных излучателей на частотах 500 Гц и 2000 Гц для различных углов поворота конструкции:  $\gamma = 0^\circ; 5^\circ; 15^\circ$

С увеличением количества элементов массива ДН линейной изогнутой группы, как и прямолинейной, в целом, обостряется. Однако если количество элементов таково, что суммарный угол поворота  $\gamma_\Sigma = (N - 1)\gamma$  приближается к

$90^\circ$ , то направленность системы на высоких частотах формируется направленным действием отдельных ее частей, и распределение звукового давления в пространстве имеет вид анало-

гичный характеристике, представленной на рис. 2 ( $f = 2000$  Гц;  $\gamma = 15^\circ$ ).

Полученные в работе аналитические соотношения рекомендуются к использованию при расчете конструкций линейных изогнутых массивов электроакустических излучателей.

### Литература

1. Olson H. Music, Physics and Engineering. – N.-J.: Dover Publ. Inc., 1967. – 467 p.
2. [www.install-pro.ru/archive/006/52-54.shtml](http://www.install-pro.ru/archive/006/52-54.shtml)  
Интернет ресурс.
3. Дидковский В.С., Лунева С.А., Яременко А.А. Методика расчета характеристики направленности массива электроакустических излучателей, путем представления их в виде монополей // Электроника и связь, № 4, 2007 – с. 74-77
4. Дидковский В.С., Лунева С.А., Вышемирская А.А. Исследование особенностей излучения звука двойным линейным массивом точечных источников // Электроника и связь, № 6 (41), 2007
5. Смарышев М.Д., Добровольский Ю.Ю. Гидроакустические антенны. – Л.: Судостроение, 1984. 304 с.
6. Вахитов Я.Ш. Теоретические основы электроакустики и электроакустическая аппаратура. – М: Исскуство, 1982.

*Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»*