

УДК 534.864

Направленность излучения криволинейными акустическими массивами

С.А. Лунева, канд. физ-мат. наук, В.П. Заец, А.В. Красников

Национальный технический университет Украины «КПИ»,
пр. Победы, 37, Киев-56, 03056, Украина

Получены аналитические выражения для расчета характеристик направленности криволинейных массивов направленных звуковых излучателей. Сравнение расчетных и экспериментальных данных подтверждает точность предложенных соотношений, что позволяет производить расчеты характеристик направленности излучения реальных криволинейных массивов произвольной конфигурации. Библ. 4, рис. 6.

Ключевые слова: криволинейный массив излучателей, характеристика направленности, громкоговоритель, акустическая система, пошаговый поворот конструкции.

Введение

Широкое использование изогнутых линейных массивов излучателей для озвучивания больших площадей и удаленных зон связано с возможностью концентрировать большую часть звуковой энергии непосредственно на уровне слушателей. Такой эффект достигается в результате сужения характеристики направленности в вертикальной плоскости, причем благодаря криволинейной форме конструкции становится возможным изменять угол наклона акустической оси системы.

Криволинейные массивы представляют собой секционированные конструкции, общий каркас которых изогнут по секционному под некоторым углом. На практике, наряду с линейными массивами, используют радиальные и J-образные массивы, а также линейные группы с постоянными и переменными углами поворота конструкции. Поскольку, кроме сложной конфигурации каркаса, каждая секция системы включает в себя до трех групп излучателей различного частотного диапазона и и различно ориентированных в пространстве, разработка аналитического аппарата для расчета направленных свойств таких акустических систем представляет собой сложную математическую задачу, решение которой обусловлено практическими потребностями.

Характеристика направленности криволинейной группы направленных излучателей

Вывод аналитического выражения для описания характеристики направленности (ХН) линейной группы излучателей с произвольным углом поворота конструкции базируется на результатах предыдущих исследований, изложенных в работах [3,4].

В работе [3], на основе представления отдельных излучателей в виде точечных источников, вычислена ХН линейного массива с постоянным пошаговым углом поворота.

Для случая, когда массив электроакустических излучателей состоит из громкоговорителей, обладающих собственной направленностью, при выводе аналитического выражения ХН системы сохраняется общий подход к представлению поля в виде суперпозиции полей отдельных источников. Поскольку в криволинейной группе акустические оси отдельных излучателей не параллельны друг другу, а образуют между собой некоторый угол, что приводит к уменьшению эффекта интерференции звуковых волн в дальнем поле, взаимное влияние излучателей не учитывается.

Геометрия криволинейного массива, состоящего из N излучателей, расположенных в одной плоскости, с произвольным углом поворота конструкции $\gamma_n (n=1, \dots, N-1)$ и равным расстоянием между излучателями d представлена на рис.1.

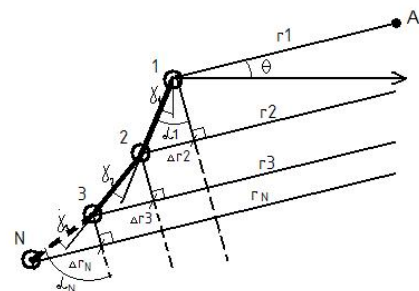


Рис. 1. Геометрия криволинейного эквидистантного линейного массива N излучателей с произвольным углом поворота конструкции γ_n

Ось $\theta = 0$ соответствует направлению акустической оси аналогичной прямолинейной группы источников. Точка наблюдения А выбирается в плоскости системы на расстоянии $r_1 \gg \lambda$ (λ – длина излучаемой волны) от первого элемента. Тогда расстояние от всех последующих элементов r_2, \dots, r_N до точки А можно представить параллельными прямыми. Как следует из геометрии системы (рис.1),

$$\begin{aligned} r_2 &= r_1 + \Delta r_2; \\ r_3 &= r_2 + \Delta r_3 = r_1 + (\Delta r_2 + \Delta r_3); \\ &\dots\dots\dots \\ r_N &= r_{N-1} + \Delta r_N = r_1 + (\Delta r_2 + \dots + \Delta r_N); \end{aligned} \quad (1)$$

где Δr_n – разности хода звуковых лучей, соответственно n -ого и предыдущего $(n-1)$ -ого источников звука.

Углы α_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:

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

С учетом расстояния d между элементами величины Δr_n определяются зависимостями:

$$\begin{aligned} \Delta r_2 &= d \sin(\theta + \gamma) \\ \Delta r_3 &= d \sin(\theta + 2\gamma) \\ &\dots\dots\dots \\ \Delta r_N &= d \sin \left[\theta + \sum_{n=1}^{N-1} \gamma_n \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Предположим, что все элементы массива обладают одинаковой направленностью $R_1(\theta)$, что соответствует системе, состоящей из идентичных громкоговорителей.

Тогда выражения для потенциала скоростей первого элемента в произвольном направлении θ можно записать как

$$\varphi_1(\theta) = R_1(\theta) \cdot \varphi_1(0) \quad (4)$$

где $\varphi_1(0)$ – значение потенциала скоростей первого элемента в направлении его акустической оси $\theta = 0$.

Поскольку, с учетом того, что $\Delta r_n \ll r_n$, потенциал скоростей второго источника отличается от первого только наличием фазового сдвига на величину $k\Delta r_1$, а акустическая ось его смещена на угол γ_1 , то на основе формулы (4) и представлений, изложенных в [5], можно записать

$$\varphi_2 = e^{-jkd \sin(\theta + \gamma_1)} \cdot R_1(\theta + \gamma_1) \cdot \varphi_1(0), \quad (5)$$

Где направление $\theta = -\varphi_1$ соответствует акустической оси второго источника.

Для элемента с номером N потенциал скоростей по аналогии определяется формулой:

$$\begin{aligned} \varphi_2 &= e^{-jkd[\sin(\theta + \gamma_1) + \dots + \sin(\theta + \sum_{n=1}^{N-1} \gamma_n)]} \times \\ &\times R_1(\theta + \sum_{n=1}^{N-1} \gamma_n) \cdot \varphi_1(0) \end{aligned} \quad (6)$$

На основании формул (4) - (6) запишем выражение для суммарного потенциала скоростей, создаваемого в точке наблюдения А группой из N источников.

$$\begin{aligned} \varphi_\Sigma &= \\ &= \varphi_1(0) \left\{ \begin{aligned} &R_1(\theta) + e^{-jkd \sin(\theta + \gamma_1)} \cdot R_1(\theta + \gamma_1) + \dots \\ &\dots + e^{-jkd[\sin(\theta + \gamma_1) + \dots + \sin(\theta + \sum_{n=1}^{N-1} \gamma_n)]} \cdot R_1(\theta + \sum_{n=1}^{N-1} \gamma_n) \end{aligned} \right\} \quad (7) \end{aligned}$$

Совместим центр сферической системы координат (r, θ, Ψ) с центром массива так, чтобы точка наблюдения находилась на поверхности сферы радиуса $r \geq \lambda$. Тогда ХН рассматриваемой группы излучателей можно определить по формуле:

$$R(\theta, \varphi) = \frac{|\varphi_\Sigma(\theta, \varphi)|}{\max |\varphi_\Sigma(\theta, \varphi)|} \Big|_{r = const} \Big|_{r \gg \lambda} \quad (8)$$

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

Тогда диаграмма направленности системы в вертикально плоскости ($\varphi = const$), на основании формулы (7) имеет вид:

$$R(\theta) = \frac{\left| \sum_{n=1}^{N-1} R_1(\theta + \sum_{m=0}^n \gamma_m) e^{-jkd \sum_{m=0}^n \sin(\theta + \sum_{l=0}^m \gamma_l)} \right|}{\max \left| \sum_{n=1}^{N-1} R_1(\theta + \sum_{m=0}^n \gamma_m) e^{-jkd \sum_{m=0}^n \sin(\theta + \sum_{l=0}^m \gamma_l)} \right|} \quad (9)$$

Отметим, что в случае различной направленности источников звука в системе, результирующая ХН будет иметь вид:

$$R(\theta) = \frac{\left| \sum_{n=0}^{N-1} R_{n+1}(\theta + \sum_{m=0}^n \gamma_m) e^{-jkd \sum_{m=0}^n \sin(\theta + \sum_{l=0}^m \gamma_l)} \right|}{\max \left| \sum_{n=0}^{N-1} R_{n+1}(\theta + \sum_{m=0}^n \gamma_m) e^{-jkd \sum_{m=0}^n \sin(\theta + \sum_{l=0}^m \gamma_l)} \right|} \quad (10)$$

В качестве примера рассмотрим направленность излучения линейной группы с постоянным углом поворота конструкции, составленной из идентичных диффузорных громкоговорителей круглой формы. Характеристику направленности такого излучателя радиуса a можно описать функцией [1]:

$$R_1(\theta) = \frac{2I_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad (11)$$

где $I_1(x)$ - функция Бесселя первого порядка аргумента x .

Для выполнения расчетов выбрана группа из 7 динамиков диаметром $2a = 0.075$ м с пошаговым углом поворота конструкции $\gamma = 10^\circ$, так что суммарный угол изгиба массива составляет 60° (причем первый излучатель группы повернут на 5° относительно оси $\theta = 0$). Расстояние между центрами излучателей $d=0.1$ м.

На рис.2 приведена диаграмма направленности одного элемента массива на частоте 1000 Гц, рассчитанная по формуле (11).

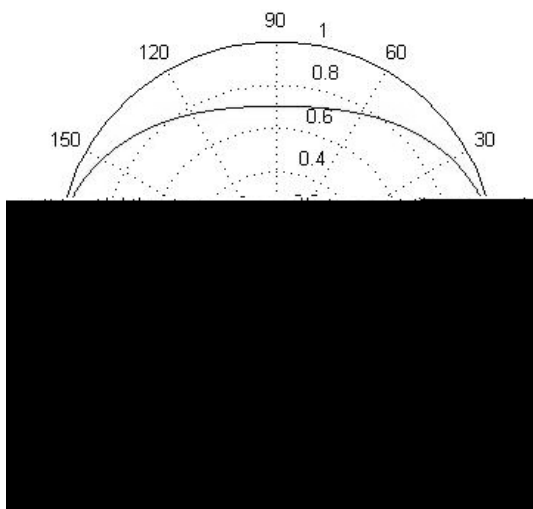


Рис.2. Диаграмма направленности кругового громкоговорителя, рассчитанная на частоте 1000 Гц

Диаграмма направленности в вертикальной плоскости изогнутого линейного массива из 7-ми направленных излучателей на частоте 1000 Гц представлена на рис.3.

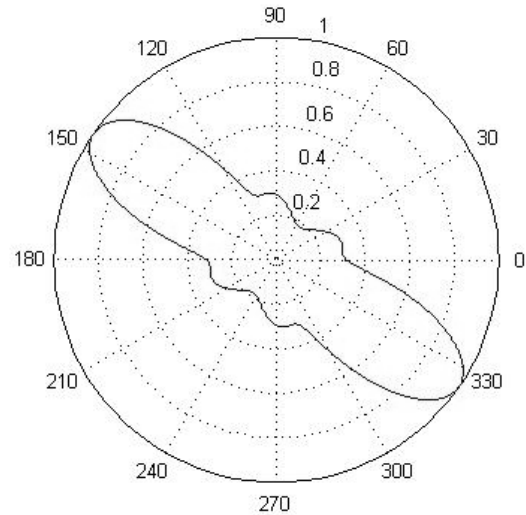


Рис.3. Диаграмма направленности изогнутого линейного массива, составленного из 7-ми направленных излучателей на частоте 1000 Гц

Расчеты диаграмм направленности, выполненные по формуле (9) для криволинейной группы направленных излучателей, подтверждают основные выводы, сделанные в [3] для аналогичной группы точечных источников звука.

Акустическая ось смещается на угол $\theta_1 = \frac{\gamma_{\Sigma}}{2}$.

Характеристика направленности обостряется по сравнению с аналогичной группой точечных источников. Если суммарный угол поворота каркаса конструкции приближается к 90° , то направленность системы формируется направленным действием отдельных ее частей и распределение звукового давления в пространстве имеет многолепестковый характер.

Экспериментальное исследование направленных свойств изогнутой линейной группы излучателей

Экспериментальные исследования направленности излучения изогнутого массива громкоговорителей выполнялись согласно требованиям стандарта [2] в заглушенной камере (с размерами 5,5*3,5*5м) Государственного научно-исследовательского института строительных конструкций. По паспортным данным отличие звукового поля камеры от поля прямого звука составляет не более 0,5 дБ (коэффициент поглощения звука в зависимости от частотного диапазона составляет 0,95-0,99).

Измерения ХН проводились на рабочих частотах, выбранных из предпочтительного ряда частот (ГОСТ 12090-80) с интервалом в 1 октаву.

Измерялась диаграмма направленности в вертикальной плоскости линейной группы, составленной из 7-ми одинаковых громкоговорителей (соединенных последовательно) диаметром 0,075м (мощность громкоговорителя 4 Вт) на расстоянии 0,15м. Угол поворота каждого последующего громкоговорителя 10° ; суммарный угол изгиба каркаса 60° (первый излучатель направлен под углом 30° против часовой стрелки)

Структурная схема установки представлена на рис.4.

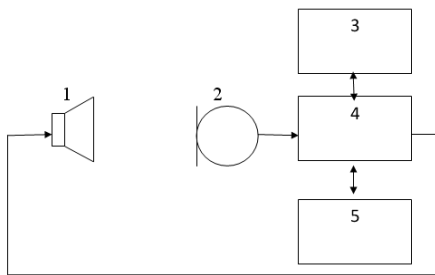


Рис. 4. Структурная схема установки для проведения исследований: 1 – группа излучателей; 2 – микрофон Behringer ECH-800; 3 – усилитель; 4 – звуковая карта M-Audio Fast Pro Trach ПЭВМ; 5 – ноутбук.

На рис. 5 и 6 представлены диаграммы направленности, соответственно, одиночного излучателя и группы излучателей, полученные путем теоретических и экспериментальных исследований на частоте 500 Гц.

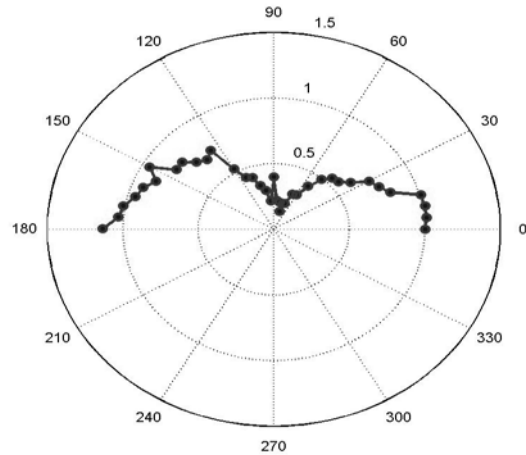


Рис.5. Диаграмма направленности экспериментального одиночного громкоговорителя на частоте 500 Гц

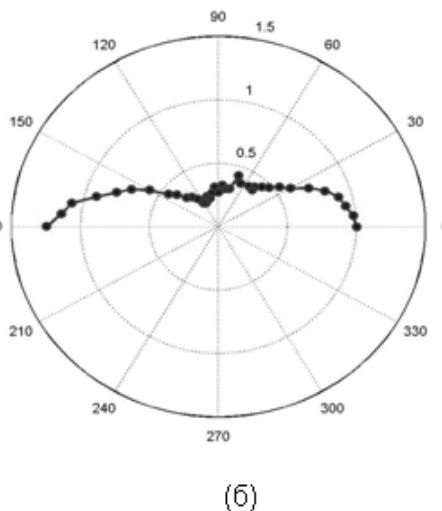
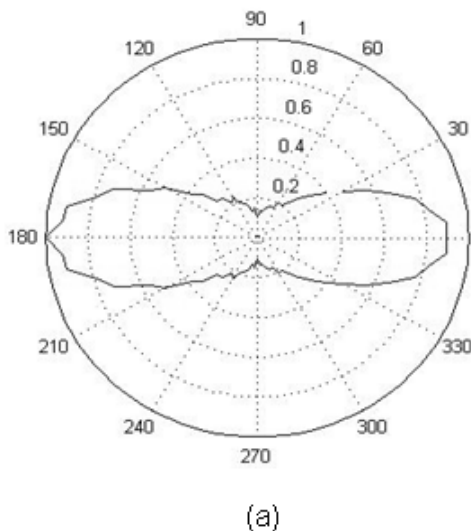


Рис.6. Диаграммы направленности теоретического (а) и экспериментального (б) изогнутых линейных массивов на частоте 500 Гц

Заметим, что на рис.6 акустическая ось массива излучателей совпадает с направлением акустической оси среднего излучателя группы.

Как видно из рис.6, совпадение теоретических и экспериментальных результатов довольно точное. На частотах выше 500 Гц это соот-

ветствие оказалось менее удовлетворительным, что по-видимому объясняется недостатками при конструировании линейного массива, а именно неточностью соблюдения углов при выполнении поворота каркаса между громкоговорителями. Поскольку с ростом частоты длина волны уменьшается, эта неточность начинает играть все более существенную роль.

Выводы

Разработан аналитический аппарат для расчета характеристик направленности криволинейных секционированных групп излучателей с произвольным пошаговым углом поворота конструкции. При этом учтена произвольная направленность излучателей отдельных секций.

Выполненные расчеты для системы одинаково направленных круговых громкоговорителей с постоянным углом поворота каркаса подтверждены экспериментальными измерениями.

Из проведенных теоретических и экспериментальных исследований следует, что, руководствуясь углом поворота конструкции, акустическую ось системы возможно сместить в требуемом направлении. При этом диаграмма направленности криволинейного массива в вертикальной плоскости несколько расширяется по сравнению с аналогичной характеристикой пря-

молинейного массива. Поэтому, рекомендуются пошаговые повороты каркаса на углы, не превышающие 10° , т.к. если суммарный угол поворота приближается к 90° , направленность системы формируется направленным действием отдельных излучателей, резко уменьшая эффект интерференции звуковых волн.

Предложенные аналитические соотношения рекомендуются для практического использования при конструировании линейных изогнутых массивов электроакустических излучателей.

Литература

1. *Вахитов Я.Ш.* Теоретические основы электроакустики и электроакустическая аппаратура. – М.: Искусство, 1982. – 415 с.
2. Громкоговорители. Методы измерения электроакустических параметров: ГОСТ 16122-87. – М.: Стандарты, 1987. – 94с.
3. *Дидковский В.С., Лунева С.А., Заец В.П.* Направленные свойства изогнутых линейных массивов излучателей звука // Электроника и связь, №4, 2011. – с. 159-163.
4. *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.

УДК 534.864

Направленність випромінювання криволінійними акустичними масивами

С.А. Луньова, канд. фіз-мат. наук, **Заєць В.П.**, **Красніков О.В.**

Національний технічний університет України «КПІ»,
пр. Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна

Отримано аналітичні вирази для розрахунку характеристик напрямленості криволінійних масивів напрямлених звукових випромінювачів. Порівняння розрахункових та експериментальних даних підтверджують точність запропонованих співвідношень, що дозволяє виконувати розрахунки характеристик напрямленості випромінювання реальних криволінійних масивів довільної конфігурації. Бібл. 4, рис. 6.

Ключові слова: криволінійний масив випромінювачів, характеристика напрямленості, гучномовець, акустична система, поступовий поворот конструкції.

The radiation direction of curvilinear ACOUSTIC ARRAYS

S.A. Lunyova, Zaets V.P., Krasnikov A.V.

National Technical University of Ukraine «KPI»,
37 Prospect Peremogy, Kiev 03056, Ukraine

The analytical expressions for the calculation of the directional characteristics of curvilinear arrays directed sound emitters. Comparison of the calculated and experimental data confirms the accuracy of the proposed relationship, which allows calculation of the radiation characteristics of real curvilinear arrays of arbitrary configuration. Reference 4, figures 6,

Key words: *curvilinear array of radiators, the directional characteristic, speaker, speaker system, turn-step design.*

1. *Vakhitov Ya. Sh.* Theoretical basis of electro and electro-acoustic instruments. – M.: Iscusstvo, 1982. – p. 415 (Rus)
2. *Speakers.* Methods of measuring the parameters of electro: GOST 16122-87. – M.: Standards, 1987. – p. 94. (Rus)
3. *Didkovskiy V.S., Luneva S.A., Zaets V.P.* Directional properties of curved line array sound radiators // Electronics and communication, № 4, 2011. – P. 159-163 (Rus)
4. *Didkovskiy V.S., Luneva S.A., Yaremenko A.A.* The method of calculation of the directivity of the array of electro-emitters by presenting them in the form of monopoly // Electronics and communication, № 4, 2007. – P. 74-77 (Rus)

Поступила в редакцию 03 октября 2012 г.