

УДК 534.864+537.872.32

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

## Направленные свойства акустической антенны в виде двух пространственно разнесенных фазированных антенных решеток

Приведены результаты разработки и исследования характеристик направленности акустических антенных систем (линейных массивов), состоящих из двух плоских антенных решеток. Их особенностью является большое межэлементное расстояние. Показано, что в ближней зоне характеристика направленности линейного массива близка к множителю решетки для данного массива. В дальней зоне диаграмма направленности помимо главного лепестка имеет и другие дифракционные (дополнительные) лепестки, зависящие от межэлементного расстояния и направленных свойств элементов массива. Определено общее количество лепестков характеристики направленности массива. Выбор межэлементного расстояния в массиве для получения приемлемой характеристики его направленности необходимо делать с учетом направленных свойств его элементов. Приведены технические характеристики разработанных линейных массивов.

**Ключевые слова:** антенная решетка, линейный массив, акустика, характеристика направленности, боковое излучение, звуковое давление.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2023-26-3-14-19

В практической акустике для озвучивания закрытого и открытого окружающего пространства широко применяются группы разнесенных в пространстве излучателей. Чаще всего это вертикальный или горизонтальный набор громкоговорителей, т.е. линейная антенная решетка, называемая в акустике линейным массивом (line array).

Представляет интерес анализ и синтез характеристики направленности таких акустических массивов, поскольку она у них бывает достаточно сложной. Отметим, что в рамках волновой теории и скалярного подхода методы расчета акустических антенн во многом аналогичны расчету радиоантенн диапазона СВЧ.

Разработка теории построения характеристики направленности для линейного массива громкоговорителей начинается с работы J. Wolff и L. Malter (1930) [1], где были описаны основы её расчета для дальней зоны. В дальнейшем теория была дополнена в работах Е. Скучика, Л. Беранека и др. [2–7]. Ближнее поле линейного массива точечных излучателей изучалось в работе Э. Виноградовой [8]. В статье [9] было показано, что коэффициент направленности для линейного массива из одинаковых, направленных и параллельно ориентированных излучателей определяется произведением числа элементов линейного массива на коэффициент направленности единичного излучателя.

В работах [10–13] авторами получены выражения для расчета характеристики направленности линейного массива громкоговорителей с коэффициентами возбуждения, заданными в соответствии со значениями набора функций Бесселя первого рода. Показаны расширение характеристики направленности по сравнению с линейным массивом излучателей с постоянным коэффициентом возбуждения, а также приближение ее к характеристике направленности одиночного громкоговорителя.

С практической точки зрения представляет интерес изучение свойств направленности и создание линейного массива из высоконаправленных излучате-

лей, каковыми являются отдельные рупорные излучатели или антенные решетки. Например, таким линейным массивом является акустическое устройство дальнего радиуса действия LRAD 2000X разработки компании GanesysInc (США) [14], состоящее из двух разнесенных в одной плоскости мощных акустических антенных решеток. Оно используется как для излучения мощных тональных сигналов при решении специальных задач, так и для передачи речевых сообщений.

Особенностью построения таких устройств является то, что в целом линейный массив представляет собой плоскую антенную решетку, состоящую из двух направленных элементов, при этом их межэлементное расстояние может значительно превышать длину излучаемой волны в каком-то диапазоне на высоких частотах. Такое построение устройства обусловлено большими массогабаритными характеристиками и не может быть выполнено в виде одной антенной решетки. Поэтому, с одной стороны, здесь увеличивается осевая направленность и мощность излучения, с другой стороны, появляется многолепестковая структура в диаграмме направленности и в целом ухудшается характеристика направленности массива, что необходимо учитывать.

Целью настоящей работы являются исследования характеристик направленности двухэлементных линейных массивов с большим межэлементным расстоянием. Проводятся теоретический анализ и экспериментальная проверка на основе двух разработанных массивов, каждый из которых состоит из двух акустических антенных решеток.

### Теория

Возьмем линейный массив, в качестве элементов которого используются акустические антенные решетки. Кратко рассмотрим процесс построения характеристики направленности плоской многоэлементной антенной решетки.

Для приемника, расположенного в дальней зоне антенной решетки (рис. 1), разность хода лучей от

центра излучения решетки и конкретного излучателя до точки наблюдения с угловыми координатами  $\theta$  и  $\phi$  будет равна (1):

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

где  $d_x, d_y$  – шаг решетки по оси  $ox$  и  $oy$  соответственно,  $i, j$  – порядковый номер излучателя в плоскости эквидистантной решетки.

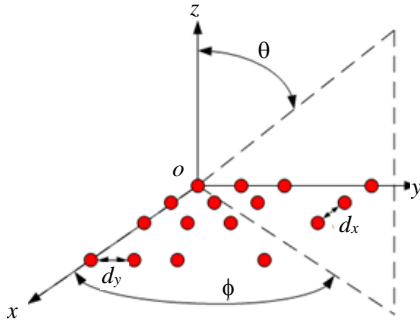


Рис. 1. К вопросу построения характеристики направленности антенной решетки

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

$$A(R) = F_{el}(\theta, \phi) f_{\Sigma}(\theta, \phi) \frac{e^{jkr}}{R}, \quad (2)$$

где  $F_{el}(\theta, \phi)$  – диаграмма направленности единичного элемента,  $f_{\Sigma}(\theta, \phi)$  – множитель решетки,  $R$  – расстояние до точки наблюдения,  $k$  – волновое число.

В общем случае, делая предположение, что амплитуда возбуждения единичного элемента может различаться, множитель решетки можно записать следующим образом:

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

где  $i, j$  – порядковый номер излучателя в плоскости решетки;  $P_{i,j}$  – амплитуда единичного элемента (звуковое давление), которая в расчетах ниже принимается одинаковой;  $\Delta r_{i,j}$  – разность хода лучей от излучателя с порядковым номером  $i, j$  до точки наблюдения;  $h, l$  – число элементов в антенной решетке по оси  $x, y$  соответственно.

Рассматриваемые в статье линейные массивы представляют собой антенную решетку, состоящую из двух излучающих элементов, разнесенных в одной плоскости. Множитель решетки для такого линейного массива определяется выражением

$$F(\theta) = \frac{\sin(kd \sin(\theta))}{2 \sin(\frac{1}{2} kd \sin(\theta))}, \quad (4)$$

где  $d$  – расстояние между двумя элементами (их центрами).

При построении линейного массива следует учитывать, что от его геометрических размеров, а также от соотношения расстояния между его элементами  $d$  и длиной волны  $\lambda$  зависит характеристика направленности данного массива. Особенность двух-

элементных массивов заключается в том, что их диаграмма направленности имеет многолепестковый характер. Множитель решетки (4) является периодической функцией угла  $\theta$ , и при определенных значениях отношений  $d/\lambda$  диаграмма направленности помимо главного лепестка будет иметь и другие дифракционные (дополнительные) лепестки. Если элементы массива ненаправленные, то они имеют такой же уровень, как и главный лепесток. С использованием направленных элементов дополнительные лепестки можно в какой-то степени подавить.

Для исключения возникновения дополнительных главных лепестков в характеристике направленности линейного массива необходимо выбирать межэлементное расстояние  $d < \lambda$ , что далеко не всегда возможно на практике, особенно при широкополосном излучении (приеме).

Для рассматриваемых в этой статье линейных массивов характерно то, что расстояние между элементами значительно больше длины волны.

Направление главных максимумов характеристики направленности линейного массива определяется выражением

$$\sin(\theta_{\text{глав}}) = \frac{2m\pi}{kd}, \quad (5)$$

где  $m = \pm 1, \pm 2, \dots$ . При этом  $m \neq 2n$ , где  $n$  – целое число длин волн, укладывающихся в расстояние  $d$ . Следует учитывать, что  $m$  может принимать конечное число значений, которое определяется условием  $\sin(\theta) \leq 1$ . Исходя из того, что  $d > \lambda$ , количество главных максимумов будет равно  $n + 1$  на интервале от 0 до  $\pi/2$ .

На рис. 2 показаны рассчитанные характеристики направленности линейного массива, состоящего из двух ненаправленных элементов для различных отношений  $d/\lambda$ .

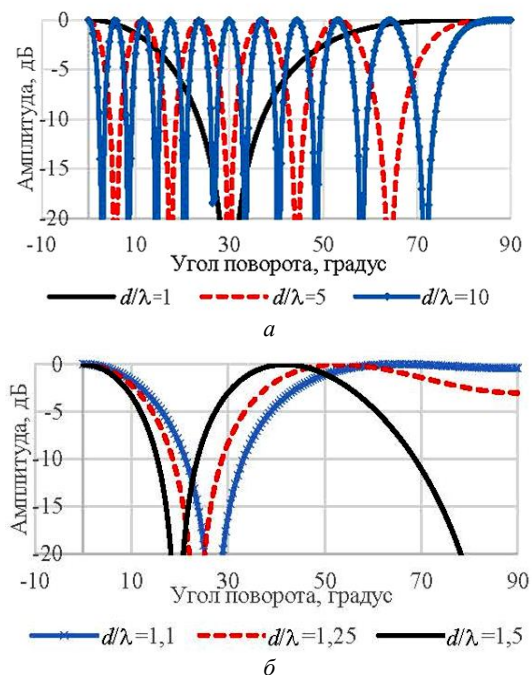


Рис. 2. Характеристика направленности линейного массива из двух ненаправленных элементов для различных отношений  $d/\lambda$

Для уменьшения бокового излучения в секторе углов, близких к  $90^\circ$ , необходимо выбирать межэлементное расстояние, кратное половине длины волны  $m\lambda/2$ , при этом  $m = \pm 1, \pm 2 \dots$  и  $m \neq 2n$ .

В случае если в линейном массиве каждый из элементов обладает направленностью, то итоговая характеристика направленности будет определяться выражением (2).

#### Линейные массивы и методика измерений

Были изготовлены два линейных массива. Первый АИ7х2 (рис. 3) состоял из двух 7-элементных антенных решеток с использованием пьезокерамических электроакустических преобразователей ПЭП-3-01 [15]. Расстояние между ними можно было изменять. Габаритные размеры одного элемента линейного массива  $250 \times 210 \times 15$  мм.



Рис. 3. Внешний вид экспериментального макета линейного массива АИ7х2. В центре показан шумомер 1-го класса точности, внизу – усилитель мощности

Второй линейный массив АИ91Мх2 (рис. 4) состоял из двух 91-элементных антенных решеток с использованием пьезокерамических электроакустических преобразователей KSN-1165А [16], размещенных по гексагональной схеме.



Рис. 4. Внешний вид линейного массива АИ91Мх2, установленного на экспериментальной площадке

Данные преобразователи эффективно работают на частотах выше 2000 Гц. Габаритные размеры одного элемента линейного массива  $780 \times 900 \times 190$  мм. Расстояние между элементами линейного массива было фиксированным и составляло 1 м между их центрами. В целом параметры разработанных массивов приведены в таблице.

Экспериментальная площадка, над которой снимались характеристики направленности, представляла собой ровную поверхность земли с травяной растительностью высотой до 30–40 см. Измерение характеристики направленности проводилось следующим образом: линейный массив располагался на поворотном устройстве на высоте 3 м от центра излучателя до поверхности земли. Впереди на заданном расстоянии устанавливалась мачта с закрепленным на высоте 3 м измерительным микрофоном. Расстояние до микрофона выбиралось таким образом, чтобы оно соответствовало дальней зоне для исследуемого линейного массива на частоте излучения.

Параметры разработанных линейных массивов

Параметр	АИ7х2	АИ91Мх2
Габаритные размеры линейного массива, мм	450×210×15 (мин.), 950×210×15 (макс.)	1780×900×190
Общее количество электроакустических преобразователей в линейном массиве	14	182
Тип используемого электроакустического преобразователя	ПЭП-3-01	KSN-1165А
Габаритные размеры одного элемента линейного массива, мм	250×210×15	780×900×190
Максимум излучения в диапазоне частот, Гц	3000–3300	2000–3300
Расстояние между центрами элементов линейного массива	Изменяемое, от 20 до 70 см	Фиксированное, 1 м

Управление элементами массива осуществлялось с помощью ноутбука с установленным программным обеспечением для генерирования различного вида звуковых сигналов. Уровень звукового давления фиксировался с помощью шумомера 1-го класса точности. Эксперименты проводились в ясную погоду, в условиях штиля и минимума фонового окружающего шума. Эксперимент проводился последовательно: при излучении только левого элемента линейного массива, при излучении только правого элемента линейного массива, при излучении двух элементов одновременно. Шаг измерения характеристики направленности по углу составлял  $2^\circ$ .

#### Результаты исследований

На рис. 5 и 6 приведены результаты измерения характеристики направленности линейного массива

АИ7х2 для различных межэлементных расстояний. Измерения проводились на частоте 3150 Гц, являющейся частотой резонанса пьезокерамических электроакустических преобразователей, из которых изготовлены элементы линейного массива. Максимальное количество боковых лепестков характеристики направленности определяется величиной межэлементного расстояния. С увеличением отношения  $d/\lambda$  количество лепестков растет и стремится к  $n+1$ , где  $n$  – целое число длин волн  $\lambda$ , укладывающихся в расстояние  $d$ . При этом если отношение  $d/\lambda$  не является целым числом, то итоговая характеристика направленности линейного массива имеет провал в направлении  $90^\circ$ . Величина этого провала максимальна, когда  $d/\lambda$  кратно половине длины волны.

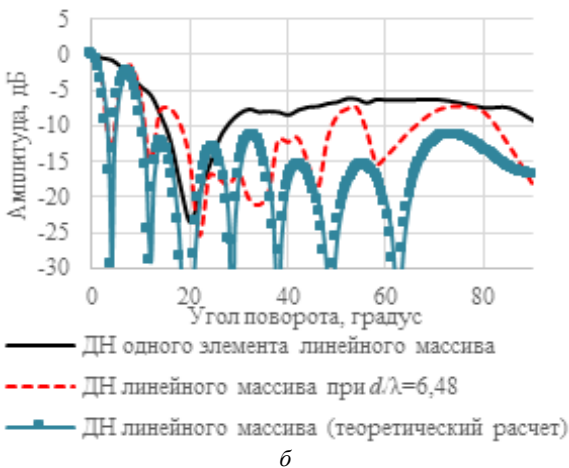
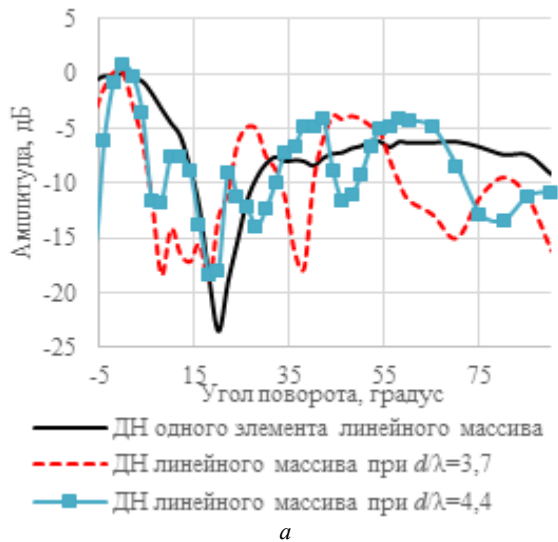


Рис. 5. Характеристики направленности линейного массива на частоте 3150 Гц ( $\lambda = 10,8$  см) при различных отношениях  $d/\lambda$ : при  $d/\lambda = 3,7$ ;  $d/\lambda = 4,4$  (а);  $d/\lambda = 6,48$  (б)

При увеличении расстояния между элементами линейного массива и, соответственно, увеличении его размера увеличивается и граница дальней зоны. Так, для частоты 3150 Гц граница дальней зоны составляет 1,05 м для одного 7-элементного излучателя. Для линейного массива АИ7х2, когда элементы расположены максимально близко друг к другу, для частоты 3150 Гц граница дальней зоны составляет 1,85 м.

На рис. 6 показан процесс формирования характеристики направленности линейного массива АИ7х2 при переходе из ближней в дальнюю зону для частоты 3150 Гц и расстояния между элементами 70 см.

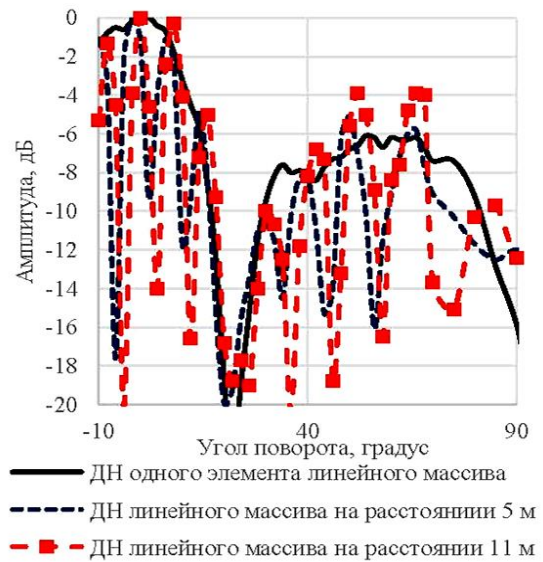


Рис. 6. Характеристика направленности линейного массива для межэлементного расстояния 70 см ( $d/\lambda = 6,48$ ) в зависимости от расстояния по оси излучения до точки наблюдения

На рис. 7 приведены результаты теоретических расчетов и измерений характеристики направленности линейного массива АИ91Мх2 при  $d/\lambda = 7,2$  на частоте 2500 Гц ( $\lambda = 13,6$  см), которая является резонансной для пьезокерамических электроакустических преобразователей, из которых изготовлен линейный массив.

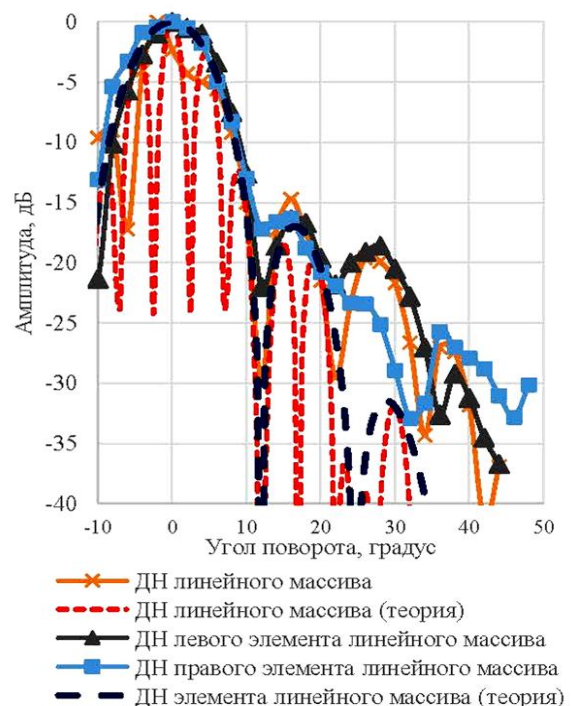


Рис. 7. Характеристики направленности линейного массива на частоте 2500 Гц при  $d/\lambda = 7,2$

Из представленных результатов видно, что характеристика направленности массива содержит очень узкий центральный лепесток и узкие боковые лепестки, при этом ширина этих лепестков не превышает  $5^\circ$  по уровню  $-3$  дБ от его максимального значения. Экспериментальная диаграмма направленности массива в районе максимума немного отличается от теоретической, она несимметрична и сдвинута влево от оси на  $2,5^\circ$ . Это может быть обусловлено погрешностями измерений по углу с шагом в  $2^\circ$  и наличием небольшого фазового сдвига между элементами при запуске излучения. В пределах ширины главного лепестка диаграммы направленности единичного элемента по уровню  $-3$  дБ укладываются три лепестка линейного массива. Контур характеристики единичного элемента массива представляет собой огибающую максимумов лепестков характеристики направленности всего линейного массива. Узость главного лепестка диаграммы направленности обусловлена размером линейного массива, а низкий уровень боковых лепестков – применением направленных элементов в виде антенных решеток.

Из графиков видно, что в пределах главного лепестка элемента массива структура характеристики направленности в ближней зоне сохраняет направление максимумов и минимумов, характерных для характеристики направленности, измеренной в дальней зоне. В него укладываются пять лепестков массива, причем три – в пределах уровня  $-3$  дБ.

#### Заключение

Проведенные теоретические расчеты и экспериментальные исследования разработанных двухэлементных массивов акустических излучателей разъясняют процесс формирования характеристики направленности линейного массива.

1. В ближней зоне массива, структура характеристики направленности сохраняет направления максимумов и минимумов излучения, характерных для характеристики направленности, измеренной в дальней зоне.

2. Общее число максимумов в характеристике направленности массива на интервале от 0 до  $\pi/2$  составляет  $n + 1$ , где  $n$  – число длин волн, укладываемых на межэлементном интервале  $d$  массива. При этом если отношение  $d/\lambda$  не является целым числом, то итоговая характеристика направленности линейного массива имеет провал в направлении  $90^\circ$ . Величина этого провала максимальна, когда  $d/\lambda$  кратно половине длины волны.

3. При поиске оптимального отношения  $d/\lambda$  (когда  $d > \lambda$ ) необходимо учитывать характеристику направленности его элементов. При использовании широкополосного излучения, это особенно актуально для высоких частот.

Результаты данной работы можно использовать при построении систем звукового воздействия и вещания, где одними из главных параметров, наряду с частотным диапазоном, являются создаваемое зву-

ковое давление и характеристика направленности (зона озвучивания), а также при построении линейных антенных решеток электромагнитных волн диапазона СВЧ.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН по проекту № 121031300155-8 и за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00750, <https://rscf.ru/project/22-29-00750/>, на ИМКЭС СО РАН.

#### Литература

1. Wolff I. Directional radiation of sound / I. Wolff, L. Malter // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1930. – Vol. 2. – P. 201–241. <https://doi.org/10.1121/1.1915251>.
2. Skudrzyk E. The Foundations of Acoustics. – New York: Springer-Verlag, 1971. – 790 p.
3. Beranek L.L. Acoustics. – American Institute of Physics for the Acoustical Society of America, 1986. – 491 p.
4. Beranek L.L. Acoustics: Sound Fields and Transducers / L.L. Beranek, T.J. Mellow. – Kidlington, Oxford; Waltham, Ma.: Academic Press, 2012. – 720 p.
5. Wood A.B. A text book of sound. – London: G. Bell and Sons, 1941. – 361 p.
6. Rossi M. Acoustics and Electroacoustics. – Norwood, MA: Artech House, 1988. – 258 p.
7. Ureda M.S. Analysis of Loudspeaker Line Arrays // J. Audio Eng. Soc. – 2004. – Vol. 52, No. 5. – P. 467–495.
8. Виноградова Э.Л. Ближнее поле линейной излучающей группы // Акустический журнал. – 1966. – Т. 12, № 1. – С. 7–11.
9. Виноградова Э.Л. Коэффициент направленности линейной группы направленных излучателей / Э.Л. Виноградова, В.В. Фурдуй // Акустический журнал. – 1966. – Т. 12, № 2. – С. 181–184.
10. Лунева С.А. Направленность излучения звука линейными массивами Бесселя: ч. 1 / С.А. Лунева, А.С. Ревенко, И.Н. Санжара // Электроника и связь. – 2015. – Т. 20, № 2. – С. 79–89.
11. Лунева С.А. Направленность излучения звука линейными массивами Бесселя: ч. 2 / С.А. Лунева, А.С. Ревенко, И.Н. Санжара // Электроника и связь. – 2015. – Т. 20, № 4. – С. 53–60.
12. Bessel panels – high-power speaker systems with radial sound distribution // Literature given out by Philips at the European AES. Technical publication 091. – 1983. – 4 p. – URL: [https://www.academia.edu/25398111/Bessel\\_Panels\\_Philips\\_Technical\\_Publication\\_091](https://www.academia.edu/25398111/Bessel_Panels_Philips_Technical_Publication_091) (дата обращения: 20.06.2023).
13. Aarts R.M. On analytic design of loudspeaker arrays with uniform radiation characteristics / R.M. Aarts, A.J. Janssen // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2000. – Vol. 107 (1). – P. 287–292. DOI:10.1121/1.428305.
14. LRAD Defense Brochure. – URL [https://genasys.com/wp-content/uploads/2019/10/Brochure\\_Defense.pdf](https://genasys.com/wp-content/uploads/2019/10/Brochure_Defense.pdf) (дата обращения: 20.06.2023).
15. Звуковой излучатель ПЭП-3-01, 120 дБ, 125 дБ, 3000–3300 Гц. – URL: [http://aerofon34.ru/?page\\_id=306](http://aerofon34.ru/?page_id=306) (дата обращения: 20.06.2023).
16. Красненко Н.П. Мощные акустические антенные решетки для атмосферных приложений / Н.П. Красненко, А.С. Раков, Д.С. Раков // Научное приборостроение. – 2018. – Т. 28, № 4. – С. 90–97. DOI: 10.18358/np-28-4-i9097.

**Красненко Николай Петрович**

Д-р физ.-мат. наук, проф., гл. н.с. лаб. акустических исследований Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ИМКЭС СО РАН) Академический пр-т, 10/3, г. Томск, Россия, 634055; Проф. каф. радиотехнических систем (РТС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050.  
ORCID: 0000-0002-7499-6635  
Тел.: +7 (382-2) 49-24-18  
Эл. почта: krasnenko@imces.ru

**Раков Денис Сергеевич**

Канд. техн. наук, н.с. лаб. акустических исследований ИМКЭС СО РАН  
Академический пр-т, 10/3, г. Томск, Россия, 634055  
ORCID: 0000-0001-8404-7882  
Тел.: +7 (382-2) 49-24-18  
Эл. почта: rds@tpu.ru

**Раков Александр Сергеевич**

Мл. н.с., лаб. акустических исследований ИМКЭС СО РАН  
Академический пр-т, 10/3, г. Томск, Россия, 634055  
Тел.: +7 (382-2) 49-24-18  
Эл. почта: alexanderrakov1985@gmail.com

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

**Directional patterns of the acoustic antenna based on two spatially separated phased antenna arrays**

The article presents the results of research and development of the characteristics of the radiation patterns of acoustic antenna systems (linear arrays), consisting of two flat antenna arrays. Their special feature is a large distance between the elements. It is shown that in the near field zone, the directional pattern of the linear system is close to the array factor for the given system. In the far field zone, the directional pattern, in addition to the main lobe, has other (additional) diffraction lobes that depend on the distance and directional characteristics of the system elements. The total number of lobes in the directional pattern of the system has been found. To obtain an acceptable directivity pattern, it is necessary to choose the distance between the elements taking into account the directivity patterns of its elements. The technical characteristics of the developed linear systems are given.

**Keywords:** antenna array, linear system, acoustics, directional characteristic, lateral radiation, sound pressure.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2023-26-3-14-19

**References**

1. Wolff I., Malter L. Directional radiation of sound. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1930, vol. 2, pp. 201–241. <https://doi.org/10.1121/1.1915251>.
2. Skudrzyk, E. *The Foundations of Acoustics*. New York, Springer-Verlag, 1971, 790 p.
3. Beranek L.L. *Acoustics*. American Institute of Physics for the Acoustical Society of America, 1986, 491 p.
4. Beranek L.L., Mellow T.J. *Acoustics: Sound Fields and Transducers*. Kidlington, Oxford; Waltham, MA, Academic Press, 2012, 720 p.
5. Wood A.B. *A text book of sound*. London: G. Bell and Sons. 1941, 361 p.
6. Rossi M. *Acoustics and Electroacoustics*. Norwood, MA, Artech House, 1988, 258 p.
7. Ureda M.S. Analysis of Loudspeaker Line Arrays. *J. Audio Eng. Soc.*, 2004, vol. 52, no. 5, pp. 467–495.

8. Vinogradova E.L. The near field of a linear group of radiators. *Akusticheskij Zhurnal*, 1966, vol. 12, no. 1, pp. 7–11 (in Russ.).

9. Vinogradova E.L., Furduev V.V. Directivity coefficient of a linear group of directional transducers. *Akusticheskij Zhurnal*, 1966, vol. 12, no. 2, pp. 181–184 (in Russ.).

10. Luniova S.A., Revenko A.S., Sanzhara I.M. The Directivity of sound radiation by linear Bessel array. Part 1. *Electronics and communications*, 2015, vol. 20, no. 2, pp. 79–89 (in Russ.).

11. Luniova S.A., Sanzhara I.M. Directivity of sound radiation by linear Bessel array. Part 2. *Electronics and communications*. 2015, vol. 20, no. 4, pp. 53–60 (in Russ.).

12. *Bessel panels – high-power speaker systems with radial sound distribution*. Literature given out by Philips at the European AES, Technical publication 091, 1983. 4 p. Available at [https://www.academia.edu/25398111/Bessel\\_Panels\\_Philips\\_Technical\\_Publication\\_091](https://www.academia.edu/25398111/Bessel_Panels_Philips_Technical_Publication_091), free (Accessed: June 20, 2023).

13. Aarts R. M., Janssen A. J. On analytic design of loudspeaker arrays with uniform radiation characteristics. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2000, vol. 107, no. 1, pp.287–292. DOI:10.1121/1.428305.

14. *LRAD Defense Brochure*. Available at [https://genasys.com/wp-content/uploads/2019/10/Brochure\\_Defense.pdf](https://genasys.com/wp-content/uploads/2019/10/Brochure_Defense.pdf), free (Accessed: June 20, 2023).

15. *Sound transducer PEP-3-01, 120 dB, 125 dB, 3000–3300 Hz*. Available at: [http://aerofon34.ru/?page\\_id=306](http://aerofon34.ru/?page_id=306) (Accessed: June 20, 2023).

16. Krasnenko N.P., Rakov A.S., Rakov D.S. Powerful acoustic antenna arrays for atmospheric applications. *Scientific instrument making*, 2018, vol. 28, no. 4, pp. 90–97 (in Russ.). DOI: 10.18358/np-28-4-i9097.

**Nikolay P. Krasnenko**

Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor, Chief Researcher, Laboratory of Acoustic Researches, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences 10/3, Akademicheskii pr., Tomsk, 634055, Russia; Professor of Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050.  
ORCID: 0000-0002-7499-6635  
Phone.: +7 (382-2) 49-24-18  
Email: krasnenko@imces.ru

**Denis S. Rakov**

Candidate of Science in Engineering, Researcher, Laboratory of Acoustic Researches, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences 10, Akademicheskii pr., Bldg. 3, Tomsk, Russia, 634055.  
ORCID: 0000-0001-8404-7882  
Phone.: +7 (382-2) 49-24-18  
Email: rds@tpu.ru

**Alexander S. Rakov**

Junior Researcher, Laboratory of Acoustic Researches, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences 10, Akademicheskii pr., Bldg. 3, Tomsk, Russia, 634055.  
Phone.: +7 (382-2) 49-24-18  
Email: alexanderrakov1985@gmail.com