

Акустические приборы и системы

УДК 534.864

С.А. Лунева, канд. физ.-мат. наук, **И.Н.Санжара**

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, ул. Политехническая, 16, г. Киев-56, 03056, Украина.

Направленность излучения звука линейными массивами Бесселя. Часть 2

Проанализирована зависимость направленных свойств массива Бесселя в плоскости осей громкоговорителей от соотношения коэффициентов возбуждения, определяемых значениями функций Бесселя. На основе полученных расчетных и экспериментальных данных сделаны рекомендации, уточняющие выбор значения аргумента функций Бесселя с целью расширения диаграммы направленности массива. Библ. 6, рис. 4.

Ключевые слова: линейный массив Бесселя; коэффициенты возбуждения громкоговорителей; диаграмма направленности массива; функции Бесселя первого рода.

Введение

Практическое применение массивов акустических излучателей, в частности, линейных, связано с потребностью увеличения мощности излучения, если мощности одного громкоговорителя оказывается недостаточно для озвучивания больших по объему и площади пространств.

Поскольку, желательно, чтобы восприятие звука слушателями не зависело от их расположения по отношению к массиву источников звука, на направленность излучения накладываются определенные требования. В итоге возникает практическая потребность создания направленной системы как в плоскости слушателей, так и в вертикальной плоскости [1].

Такая задача решается путем выбора коэффициентов возбуждения отдельных громкоговорителей в соответствии с коэффициентами функций Бесселя первого рода порядка m [2-4].

Результатом указанного подхода является выражение звукового давления, создаваемого массивом излучателей, с точностью до фазы, через звуковое давление одиночного громкоговорителя [1]. Пренебрегая фазовыми искажениями [4], предполагается получить направленность излучения, аналогичную одиночному громкоговорителю.

Однако, сохраняются вопросы, связанные с конкретным выбором коэффициентов возбуждения отдельных громкоговорителей. Соотношение коэффициентов возбуждения, согласно [4], определяется выбором величины нормали-

зующего фактора, который используется при усечении бесконечного ряда, содержащего функции Бесселя порядка m аргумента z .

Результаты расчетов и экспериментальных измерений, приведенные в работе [1], свидетельствуют о том, что при выборе соотношения коэффициентов возбуждения источников в соответствии с рекомендациями авторов [3, 4], диаграмма направленности (ДН) Бесселева массива практически не соответствует ДН одиночного громкоговорителя в диапазоне частот 250-1000 Гц, а в области высоких частот (2-4 кГц), хотя и повторяет общую конфигурацию, остается лепестковой.

В связи с этим, возникает необходимость обсудить критерии выбора соотношения коэффициентов возбуждения громкоговорителей, исходя из соображений создания максимально возможного равномерного распределения звукового давления в пространстве.

Управление диаграммой направленности соотношением коэффициентов возбуждения излучателей

В работе [1] показано, что значение нормализующего фактора σ напрямую связано с выбором аргумента z функции Бесселя. Если руководствоваться соображениями авторов [5, 6]

и полагать $z \approx M \left(M = \frac{N-1}{2} \right)$, N – количество

источников), то из возможных соотношений коэффициентов возбуждения для пятиэлементного массива:

$$A : B : C : D : E = 1 : 2n : 2n^2 : -2n : 1. \quad (1)$$

следует выбрать значение нормализующего коэффициента $n=1$ [1].

Это условие накладывалось на основе компромисса между ошибкой разложения в конечный ряд по функциям Бесселя и эффективностью излучения массивом. Однако, поскольку по поводу выбора значения аргумента функции Бесселя существуют различные мнения [4], предлагается проанализировать как изменятся направленные свойства системы при увеличении нормализующего коэффициента n .

Диаграмма направленности системы в плоскости сей громкоговорителей находится в соответствии с формулой, приведенной в работе [1]:

$$R_B(\theta) = R_1(\theta) \cdot R_{\Gamma 5}(\theta), \quad (2)$$

где $R_1(\theta) = \frac{2J_1(\frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta)}{\frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta}$ - ДН одиночного экранированного громкоговорителя (J_1 - функция Бесселя первого рода первого порядка, D - диаметр излучателя, λ - длина звуковой волны при соответствующей частоте излучения);

$$R_{\Gamma 5}(\theta) = \frac{|P_{\Sigma}(\theta)|}{\max |P_{\Sigma}(\theta)|} - \text{ДН эквивалентной группы}$$

пяти точечных излучателей, определяемая через суммарное звуковое давление $P_{\Sigma}(\theta)$, которое создается аналогичной группой точечных преобразователей на расстоянии $r \gg \lambda$ ($r = \text{const}$).

Исходя из выражения (1), при значениях $n=2, 3$ соотношение коэффициентов возбуждения в конфигурации пяти источников определя-

ется следующим образом:

$$A : B : C : D : E = 1 : 4 : 8 : -4 : 1 \quad (\text{при } n=2), \quad (3)$$

$$A : B : C : D : E = 1 : 6 : 18 : -6 : 1 \quad (\text{при } n=3). \quad (4)$$

Тогда ДН эквивалентной систем точечных источников находится в соответствии с формулой (2), где $R_{\tilde{A}5}(\theta)$ при нормирующем коэффициенте $n=2$ принимает значение:

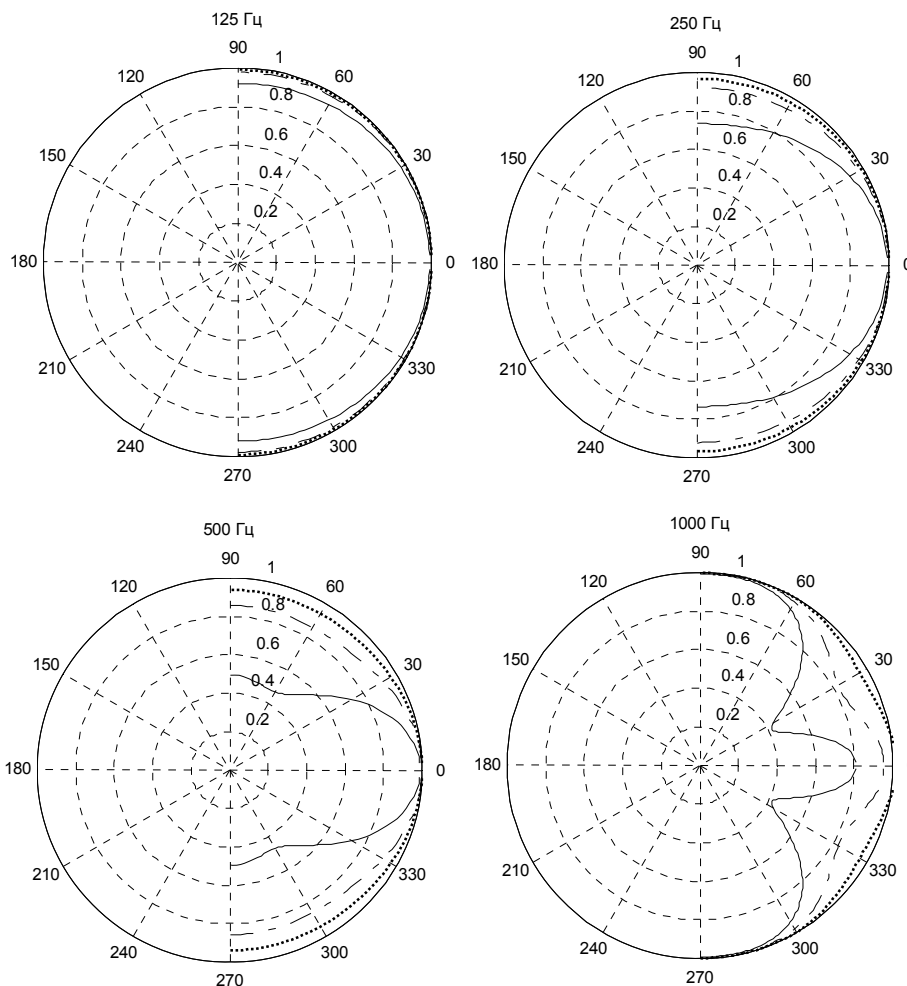
$$R_{\Gamma 52}(\theta) = \frac{|2 + 4e^{-jk\Delta r} - 2e^{-jk2\Delta r} + e^{-jk3\Delta r}|}{\max |2 + 4e^{-jk\Delta r} - 2e^{-jk2\Delta r} + e^{-jk3\Delta r}|}, \quad (5)$$

а при $n=3$:

$$R_{\Gamma 53}(\theta) = \frac{|3 + 9e^{-jk\Delta r} - 3e^{-jk2\Delta r} + e^{-jk3\Delta r}|}{\max |3 + 9e^{-jk\Delta r} - 3e^{-jk2\Delta r} + e^{-jk3\Delta r}|}. \quad (6)$$

(выражение для расчета ДН $R_{\tilde{A}51}(\theta)$ при $n=1$ приведены в работе [2]).

Результаты вычислений для значений параметров системы диаметром громкоговорителя $D=0,077$ м, расстояние между источниками $d=0,1155$ м представлены на рис. 1:



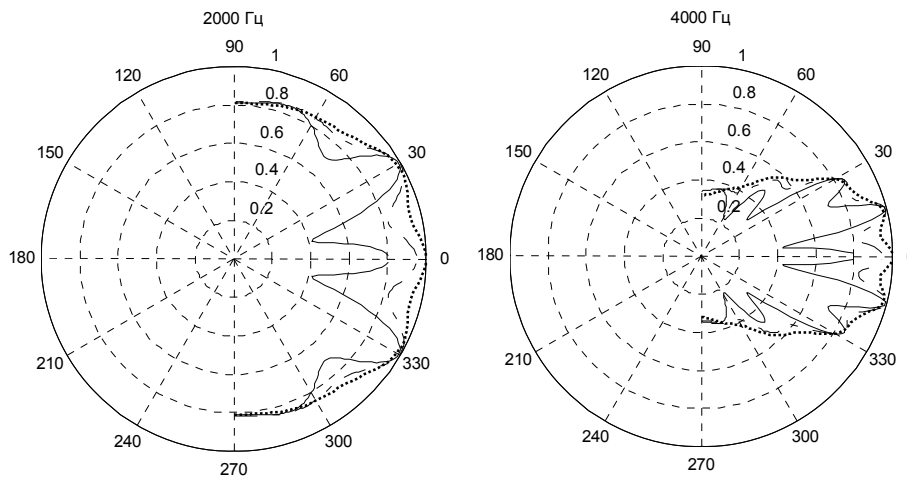


Рис.1. Графическое изображение расчетных значений ДН массива Бесселя при изменении соотношений коэффициентов возбуждения:

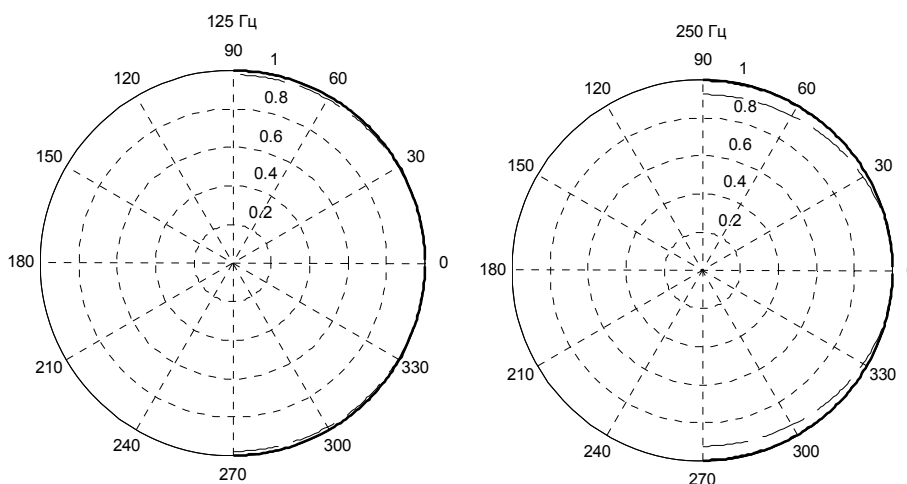
- $n=1$
- - - $n=2$
- $n=3$

Как следует из расчетных данных, с увеличением нормализующего коэффициента n диаграмма направленности расширяется, что заметно уже с частоты $f=250$ Гц (под углом наблюдения $\theta = 90^\circ$ значение $R(\theta)$ при $n=3$ почти на 3 дБ выше, чем при $n=1$).

Различие в диаграммах направленности оказывается особенно существенным на частоте $f=500$ Гц. С повышением частоты графики, по -

лученные при разных n , постепенно сближаются и на высоких частотах (2-4 кГц) для $n=2$ и $n=3$ ДН приобретают более сглаженный, менее лепестковый характер.

На рис. 2 представлены графики, позволяющие сравнить значения ДН массива Бесселя с коэффициентами возбуждения, выбранными по формуле (3), с направленностью одиночного громкоговорителя.



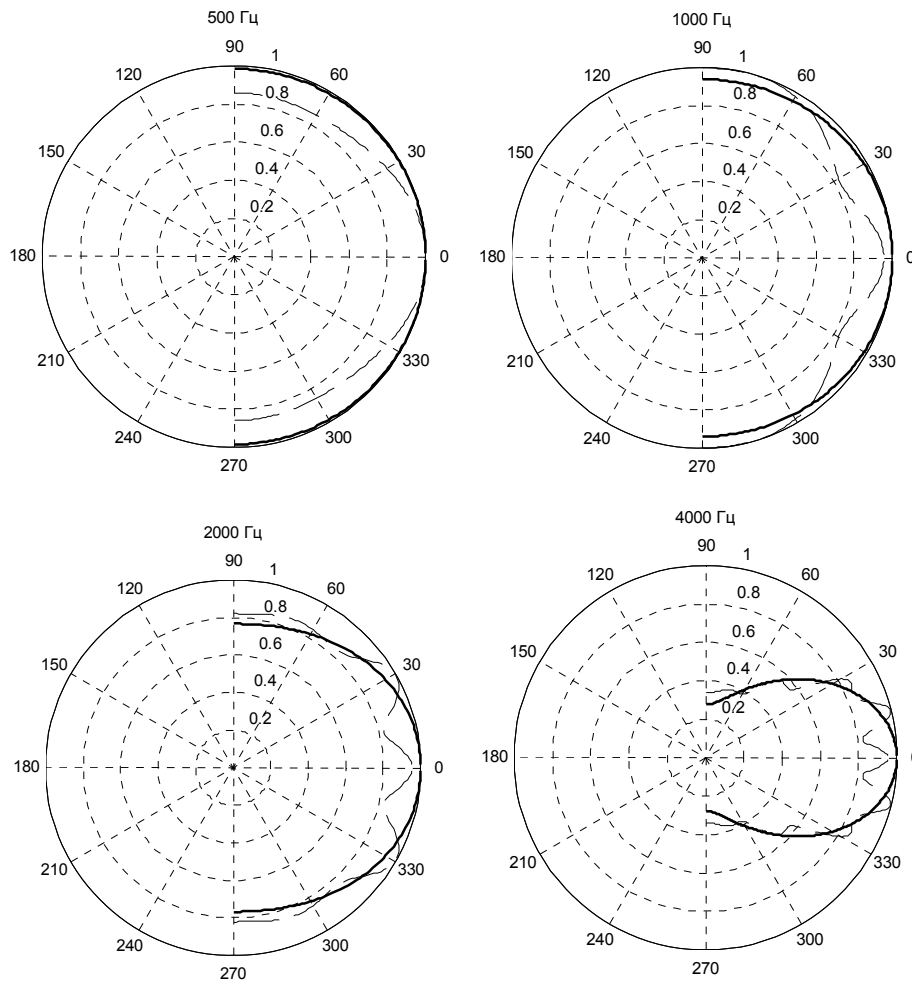


Рис. 2. Сравнение ДН массива Бесселя ($n=2$) и одиночного громкоговорителя:

— — массив Бесселя
 — — одиночный громкоговоритель

Как следует из расчетных данных (рис.2), диаграмма направленности Бесселева массива гораздо точнее приближается к ДН одиночного излучателя, чем при выборе нормализующего коэффициента $n=1$ [1]. Наилучшее совпадение указанных диаграмм наблюдается в диапазоне низких (до $f=125$ Гц) и высоких частот ($f>2$ кГц).

Экспериментальные исследования направленности излучения при изменении коэффициентов возбуждения

Экспериментальные исследования выполнялись согласно требованиям стандарта [5]. Детально условия и схема проведения эксперимента приведены в работе [2].

Поскольку измерения проводились для группы динамиков без внешнего оформления, диаграмма направленности одиночного громкоговорителя рассчитывалась по формуле [6]:

$$R_{01}(\theta) = R_1(\theta) \cos \theta,$$

которая учитывает осциллирующий характер движения излучателя ($R_1(\theta)$ определяется формулой (2)).

Эта коррекция учтена при расчете ДН массива Бесселя.

На рис. 3 представлены в сравнении данные расчетов и измерений диаграммы направленности массива Бесселя при соотношении коэффициентов возбуждения 1:4:8:(-4):1, что соответствует выбору $n=2$ в формуле (1).

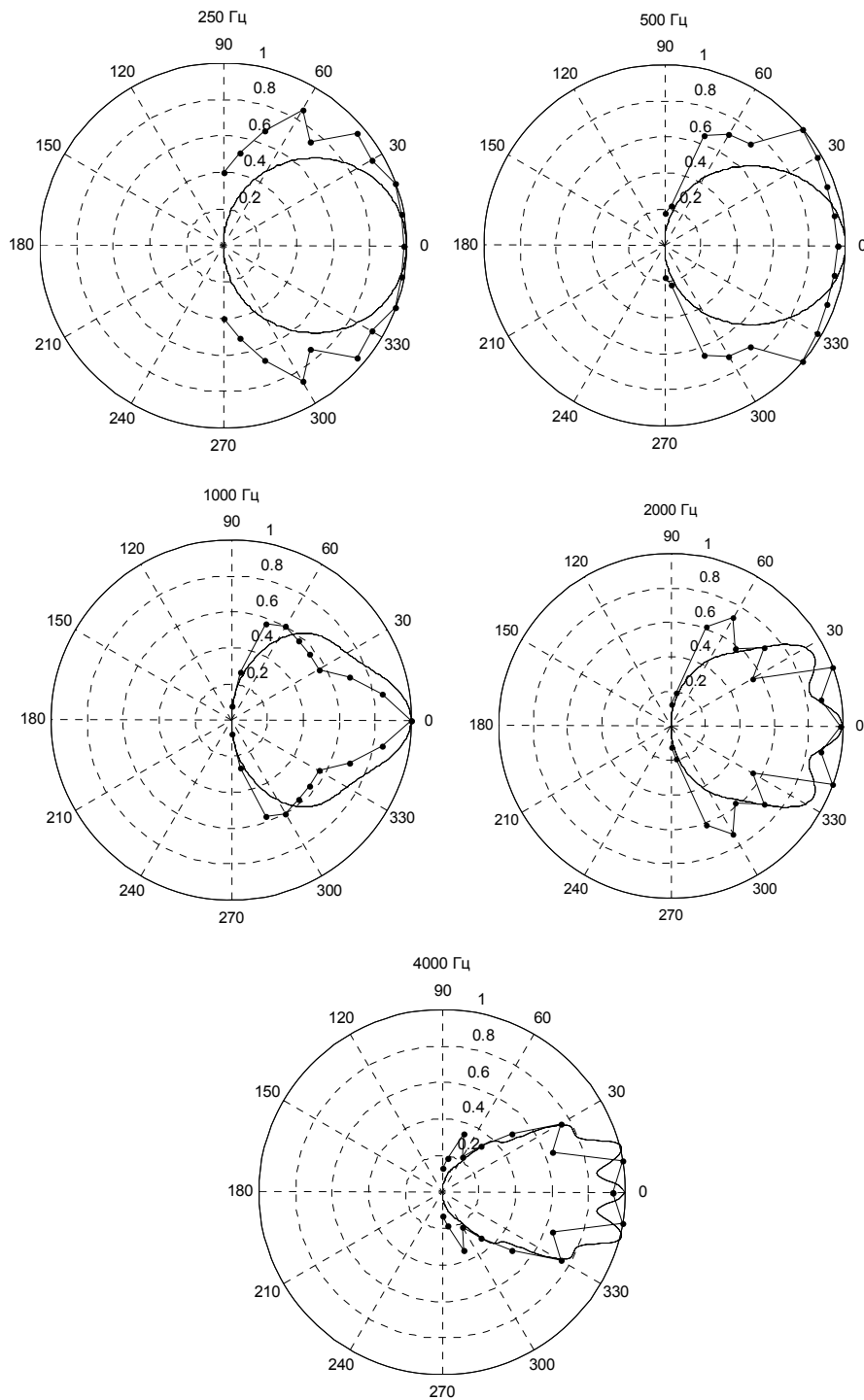


Рис. 3. Изображение расчетных и экспериментальных значений ДН массива Бесселя при нормализующем коэффициенте $n=2$:

—●— эксперимент
 — расчет

Анализ приведенных данных измерений и расчетов указывают на их соответствие практически во всем исследуемом диапазоне частот (несколько хуже идентичность графиков в интервале 1-2 кГц).

В связи с этим, с целью расширения диаграммы направленности массива предлагается

значение n выбирать порядка $n=2$, что предполагает выбор аргумента функции Бесселя несколько меньшим указанного в работе [4] значения $z=M$. Рекомендуется значения аргумента z выбрать в пределах $z \in [\frac{M}{2}; M]$, при этом зна-

чение нормализующего фактора σ окажется в диапазоне $\sigma \approx (0,2 - 0,8)N^{-\frac{1}{3}}$.

На рис. 4 представлены в сравнении экспериментальные значения ДН массива Бесселя с

соотношениями коэффициентов возбуждения, выбранными по формуле (2) и (3), т.е. при значениях нормализующего коэффициента $n=1$ и $n=2$, соответственно. Экспериментальные данные при $n=1$ приведены в работе [1].

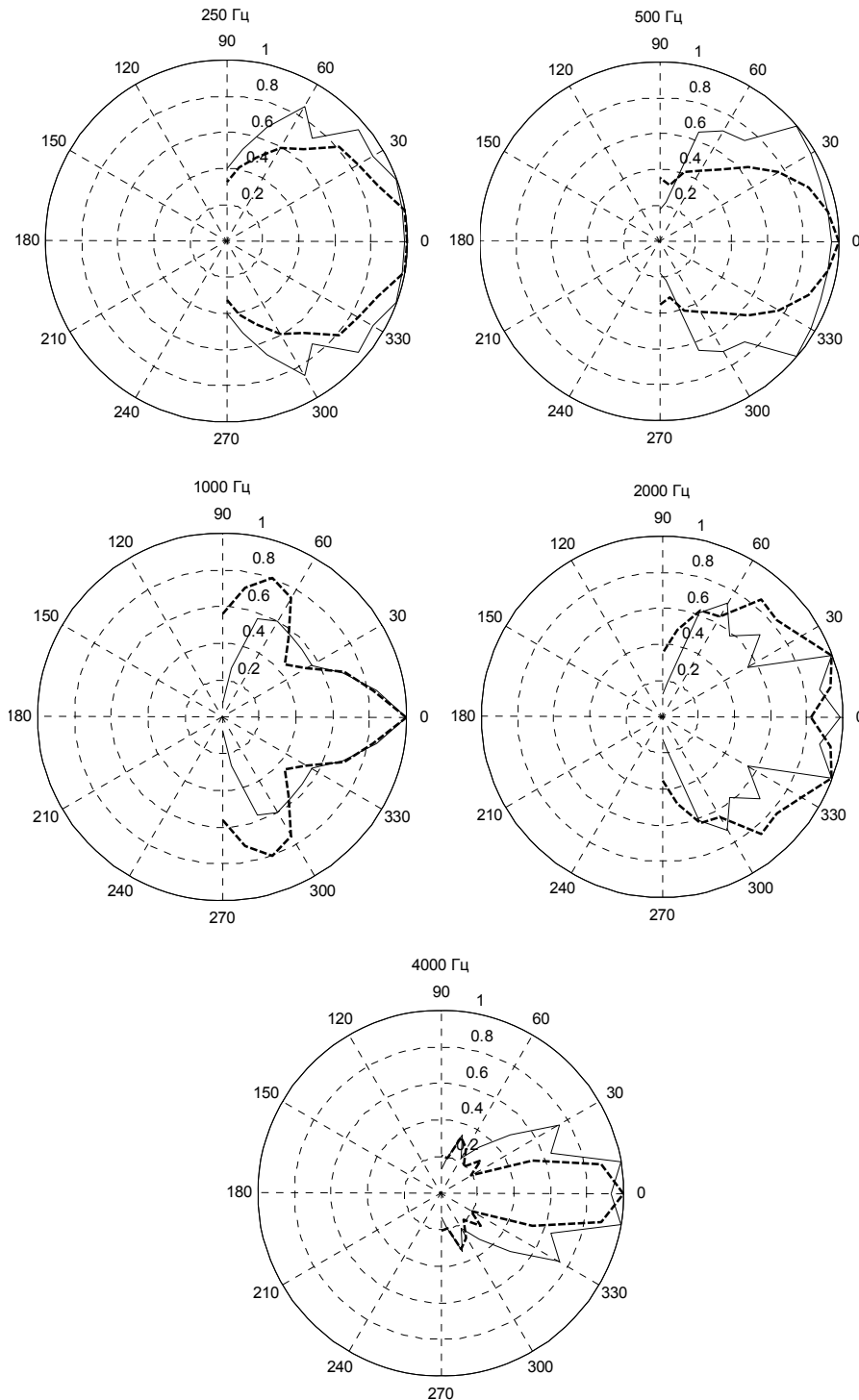


Рис. 4. Графики экспериментальных значений ДН массива Бесселя с соотношениями коэффициентов возбуждения, выбранными при $n=1$ и $n=2$:

----- $n=1$
 ————— $n=2$

Хотя, расчетные данные для экранированных громкоговорителей свидетельствует о расширении ДН массива при переходе от $n=1$ к $n=2$ во всем диапазоне частот, экспериментальным путем (для осциллирующих излучателей) удалось подтвердить этот вывод за исключением области $f=(1-2)$ кГц. По-видимому, это объясняется тем, что в этом частотном диапазоне хуже выполняется соответствие расчетных и экспериментальных значений.

Таким образом, исходя из проведенных расчетов и измерений для расширения ДН массива Бесселя, особенно в области средних частот, целесообразно рекомендовать увеличение коэффициента n в 2-3 раза по сравнению со значением, которое вытекает из рекомендаций [4], а именно выбора нормализующего фактора $\sigma \approx 0,85N^{-\frac{1}{3}}$ (N – количество излучателей).

Поскольку выбор n связан с выбором значения аргумента функций Бесселя z , которые используются при задании коэффициентов возбуждения громкоговорителей, то увеличение n приведет к уменьшению z и, соответственно, к уменьшению нормализующего фактора σ [1].

Выводы

Линейным массивом излучателей звука возможно создать одинаковую направленность излучения в двух взаимно перпендикулярных плоскостях подобную направленности одиночного громкоговорителя. Реализация такого требования осуществляется заданием коэффициентов возбуждения громкоговорителей в соответствии со значением набора функций Бесселя.

Ширина ДН массива, а также степень ее приближения к соответствующей диаграмме одиночного громкоговорителя, зависит от соотношения коэффициентов возбуждения, которое можно регулировать путем выбора аргумента функций Бесселя.

Для расширения ДН предлагается значения аргумента выбрать в пределах $[\frac{M}{2}; M]$

($M = \frac{N-1}{2}$, N – количество излучателей), что приведет к повышению нормализующего коэффициента при расчете соотношения коэффициентов возбуждения громкоговорителей.

Полученные результаты рекомендуется использовать при проектировании линейных массивов «ненаправленного» излучения.

Список использованных источников

1. Лунева С.А., Ревенко А.С., Санжара И.Н. Направленность излучения звука линейными массивами Бесселя. Часть 1 // Электроника и связь, №2, 2015.
2. W.J.W. Kitzen. Multiply loudspeaker arrays using Bessel coefficients // Philips Electronic Components and Application, №5, 1983.
3. 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.
4. R.M. Aarts, A.J.E.M. Janssen. On analytic design of loudspeaker arrays with uniform radiation characteristics // J. Acoust. Soc. Am., №107(1), January, 2000. – 6 p.
5. Громкоговорители. Методы измерения электроакустических параметров: ГОСТ 16122-87. - М.: Стандарты, 1987.-94 с.
6. Санжара И.Н. Направленность излучения диффузорного громкоговорителя // VI Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2013»: Збірник статей. – К.: 2013. – с. 125-128.

Поступила в редакцию 20 апреля 2015 г.

УДК 534.864

С.А. Луньова, канд. фіз.-мат. наук, **І.М. Санжара**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
ул. Політехнічна, 16, м. Київ-56, 03056, Україна.

Спрямованість випромінювання звуку лінійними масивами Бесселя. Частина 2

Проаналізовано залежність спрямованих властивостей масиву Бесселя в площині осей гучномовців від співвідношення коефіцієнтів збудження, що визначаються значеннями функцій

Бесселя. На основі отриманих розрахункових і експериментальних даних зроблено рекомендації, уточнюючі вибір значення аргументу функцій Бесселя з метою розширення діаграми спрямованості масиву. Бібл. 6, рис. 4.

Ключові слова: лінійний масив Бесселя; коефіцієнти збудження гучномовців; діаграма спрямованості масиву; функції Бесселя першого роду.

UDC 534.864

S. Luniova, Ph.D., I. Sanzhara

National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute",
st. Polytechnique, 16, Kiev-56, 03056, Ukraine.

Directivity of sound radiation by linear Bessel array. Part 2

The dependence of the directional properties of the Bessel array in the plane of the loudspeakers' axes on the ration of the excitation coefficients determined by the values of the Bessel functions was analyzed. On the basis of the calculated and experimental data the recommendations, which are specifying the choice of the argument's value of the Bessel functions in order to increase the radiation pattern of the array were made. References 6, figures 4.

Keywords: linear Bessel array; excitation coefficients of the loudspeakers; radiation pattern of the array; the Bessel functions of the first kind.

References

1. Luniova, S. A., Revenko, A. S., Sanzhara, I. N. (2015). Directivity of sound radiation by linear Bessel array. Part 1. Electronics and Communications, Vol. 20, No. 2, Pp. 79-89. (Rus)
2. Kitzen, W. J. W. (1983). Multiply loudspeaker arrays using Bessel coefficients. Philips Electronic Components and Application, №5.
3. (1983). Bessel panels – high-power speaker systems with radial sound distribution. Literature given out by Philips at the European AES. Technical publication 091, P. 4.
4. Aarts, R. M., Janssen, A. J.E. M. (2000). On analytic design of loudspeaker arrays with uniform radiation characteristics. J. Acoust. Soc. Am., №107(1), January, P.6.
5. (1987). Loudspeakers. Methods for measuring the electroacoustic parameters: GOST 16122-87. Moskva.: Standarti, P. 94. (Rus)
6. Sanzhara, I. N. (2013). Cone loudspeaker's radiation directivity. VI International Scientific Conference of Young Scientists «Electronics-2013»: Collection of articles. Kyiv.: 2013. Pp. 125-128. (Rus)