

УДК 534.843.26

ОМАРОВ М. А., доктор технических наук, профессор,
 ЦЕХМИСТРО Р. И., кандидат физико-математических наук, доцент,
 ЛУКЬЯНОВА В. А., кандидат педагогических наук, доцент,
 ГРЕЧКО А. В., студентка
 (Харьковский национальный университет радиоэлектроники)

Анализ пространственного распределения акустического излучения в раскрыве кольцевых микрофонных решеток в свободном пространстве

Авторами в статье описан анализ пространственного распределения амплитуды акустического поля кольцевой микрофонной решетки. Каждый микрофон был представлен моделью – излучателем сферической волны. Проведен анализ влияния числа излучателей, радиуса решетки на концентрацию акустического поля в центре решетки. Составлен алгоритм, позволяющий учитывать произвольное четное и нечетное число излучателей, расположенных по длине дуги.

Ключевые слова: микрофонная решетка, излучатель сферической волны, суперпозиция, радиус решетки.

Постановка задачи

Экспериментальные микрофонные массивы могут достигать больших размеров. Так, в Массачусетском технологическом институте исследовался массив из 1020 микрофонов. В одном из экспериментов данная решётка позволила выделить речь любого из 5 человек, которые одновременно зачитывали разные тексты. Операционные системы семейства Windows, начиная с Vista, имеют поддержку встроенных и создаваемых пользователем микрофонных решёток.

Фазированные микрофонные решетки нашли широкое применение в устройствах обработки акустических сигналов с целью увеличения соотношения сигнал/шум в заданном направлении [1-3]. Например, в сотовом телефоне простейшая микрофонная решетка состоит всего из двух микрофонов и служит для увеличения соотношения сигнал/шум говорящего.

Более сложные фазированные микрофонные решетки обычно состоят из четырех и более микрофонов. Их число может достигать 64 и даже 512 штук. Как уже говорилось выше, главное назначение фазированной микрофонной решетки — создать нужную диаграмму направленности в заданном направлении, оперативно менять это направление в пространстве и тем самым увеличить соотношение сигнал/шум от выбранного акустического источника, на который направлена фазированная антенная решетка. Самая распространенная технология построения фазированной микрофонной решетки приведена на блок-схеме рис. 1.

Сигнал с микрофона поступает на предусилитель, далее идет на аналоговый корректор фазы, который построен на операционном усилителе, со сдвигающей фазу RC цепочкой (рис. 2). Причем используется не обычный резистор, а I2C управляемый.

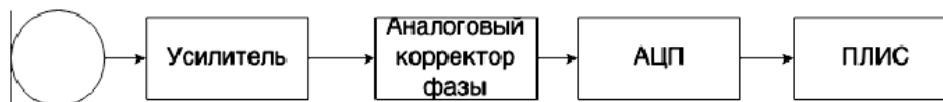


Рис. 1. Блок-схема получения данных и управления фазой микрофонных решеток

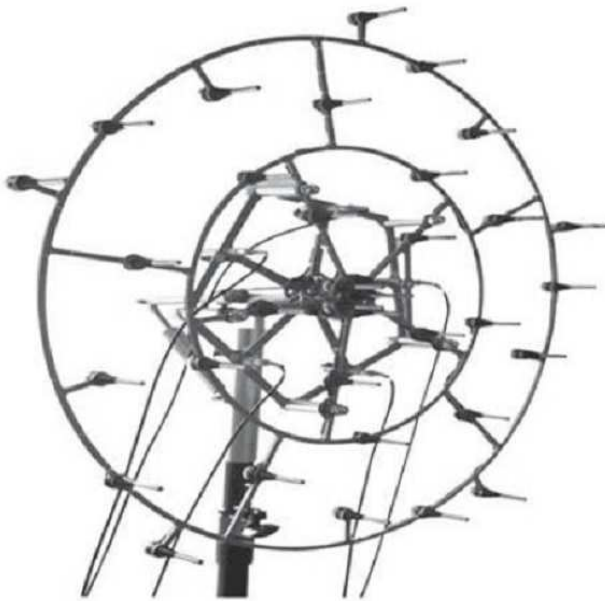


Рис 2. Микрофонная решетка BSWA-TECH SPS-980 [2]

Далее сигнал уходит на аналого-цифровой преобразователь АЦП, где оцифровывается и поступает в программируемую логическую интегральную схему ПЛИС по параллельной шине либо, в лучшем случае, по последовательному периферийному интерфейсу ППИ. В первом случае требуется минимум 17 линий связи, во втором – 5.

Основная часть

Особенности ближней зоны проявляются прежде всего в том [4], что пространственное распределение амплитуд и мощности звукового поля не имеет характера сформированной диаграммы направленности с главным и боковыми лепестками. В области направлений нулей диаграммы направленности решетки амплитуда поля достаточно высокая. Кроме того, в этой области имеет место осциллирующий характер зависимости комплексной мощности поля от расстояния до точки наблюдения.

В работе [4] рассмотрено распределение комплексной мощности электромагнитного поля линейной решетки излучателей в предположении, что каждый излучатель излучает сферическую волну.

Из-за малых расстояний между излучателями решетки и точками наблюдения последние могут находиться как в ближней, так и дальней зоне непосредственно каждого излучателя.

С другой стороны, точки наблюдения находятся также в ближней зоне решетки излучателей. Таким образом, необходимо учитывать оба проявления особенностей ближней зоны – и одиночного излучателя, и решетки, в частности при разработке

алгоритмов расчетов распределения мощности в микроволновых технологических установках.

Ограничимся рассмотрением задачи, которая состоит в анализе физических закономерностей формирования распределения амплитуды вблизи решеток излучателей. Это позволяет учесть особенности ближней зоны не только решетки излучателей, но и каждого излучателя в отдельности. Возьмем решение для акустического излучателя в виде сферической волны [1-3]:

$$U_n = \sum_{n=-N/2}^{N/2} U_0 \frac{\cos(\omega t - kR_n)}{R_n} \quad (1)$$

где R_n – расстояние от центра излучателя до точки наблюдения;

N – число излучателей, симметрично расположенных от центра решетки.

Рассмотрим далее линейную эквидистантную решетку N излучателей. Введем декартову систему координат, как показано на рис. 3. Для нахождения амплитуд, фаз и мощности поля вблизи решетки расположим их вдоль оси Ox , и расстояния R_n до точки наблюдения будем определять в декартовых координатах. Проведем анализ пространственного распределения амплитуды излучения решетки на малых расстояниях при отсутствии взаимодействия между элементами решетки. Суммарные компоненты составляющих полей в каждой точке наблюдения находим согласно принципу суперпозиции:

$$U = \sum_{n=-N/2}^{N/2} U_n \quad \text{– для четного числа излучателей;} \quad (2)$$

$$U = U_0 + \sum_{n=(-N+1)/2}^{(N-1)/2} U_n \quad \text{– для нечетного числа излучателей,} \quad (3)$$

где n – номер излучателя;

N – число излучателей, расположенных вдоль полуоси Ox .

Для конкретности будем рассматривать близкую к практике систему [2-6], когда излучатели располагаются эквидистантно на окружности радиуса R (рис. 3). Для анализа исследуемых физических закономерностей необходимо учитывать, что область фокусировки акустического поля находится в ближней зоне как одного излучателя, так и решетки излучателей. Суммарные компоненты амплитуд акустических излучателей в каждой точке пространства находим согласно принципу суперпозиции.

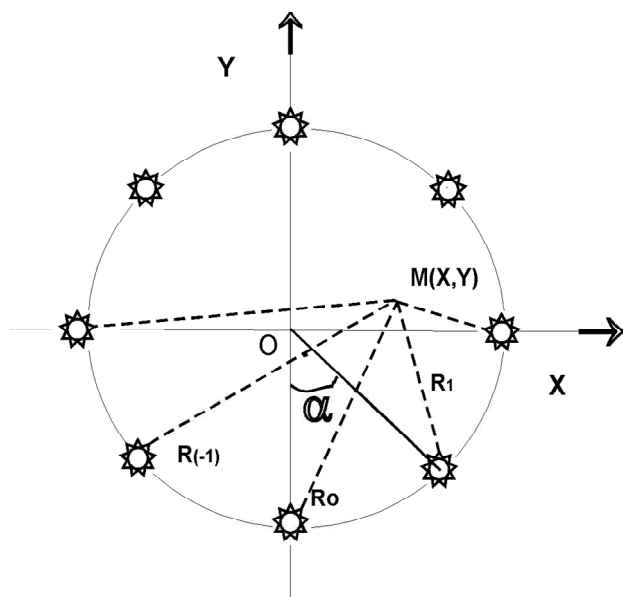


Рис. 3. Схема расположения излучателей в кольцевой решетке

При этом расстояния R_n от n -го излучателя до точки наблюдения $M(X, Y)$, определяющие фазы составляющих полей каждого излучателя в точке наблюдения (рис. 3), находим аналогично изложенному выше алгоритму для линейных решеток.

$$R_n = \sqrt{(X - R \sin(n\alpha))^2 + (Y - R(\cos(\pi - n\alpha)))^2}, \quad (4)$$

$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, N/2$ – для нечетного N ;

$$R_n = \sqrt{(X - R \sin((2n - 1)\alpha/2))^2 + (Y - R(\cos(\pi - (2n - 1)\alpha/2)))^2}, \quad (5)$$

$n = \pm 1, \pm 2, \dots, N/2$ – для четного N .

Используя выражения (1) – (6), были разработаны алгоритм и программа компьютерного анализа, позволяющие исследовать пространственное распределение мощности поля внутри решетки с учетом и без учета особенностей полей ближней зоны излучателя - элемента решетки.

Таким образом, задавая радиус кольца R , угол α , который определяет расстояние между излучателями и их число, будем анализировать влияние этих параметров на пространственное распределение мощности электромагнитного поля внутри и вне решетки, а также и вдоль какой-либо из осей.

Формула для расчета расстояний R_n зависит от взаимного расположения точки излучения и точки наблюдения. В общем случае

$$R_n = \sqrt{(Y_n \pm Y)^2 + (X_n \pm X)^2}, \quad (4)$$

где X_n, Y_n – координаты n -го излучателя; X, Y – координаты точки наблюдения в декартовых координатах, связанных с решеткой, как показано на рис. 3.

Знак «+» в выражении (4) берется в случае, если точка наблюдения $M(X, Y)$ находится в первом квадранте, знак «-» берется в случае, если она находится в третьем квадранте, знаки «+,-» чередуются, если точка наблюдения и источник находятся во втором и четвертом квадрантах.

На практике в рассматриваемых решетках удобно располагать излучатели на одинаковых расстояниях друг от друга, выбирая соответствующим образом радиус R решетки. Тогда выражение для R_n может быть записано через радиус решетки и угол α между лучами, направленными из начала координат на два соседних источника. Для точки наблюдения внутри кольца радиуса R

Анализ результатов

Расчеты проводились для двух вариантов: в первом задавалось расстояние по дуге окружности между излучателями $d = 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2$ длин волн, что исключало симметрию решетки, а также для целых значений угла α , например $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, \dots, 60^\circ$. Второй вариант позволял расположить излучатели симметрично не только относительно оси OY , но и относительно оси OX .

На рис. 4 представлено пространственное распределение суммарной амплитуды поля излучения кольцевой решетки восьми акустических излучателей с радиусом 2λ . Расчетные значения нормированы на максимальное значение.

Видны отчетливые концентрации акустического поля в центре решетки, которые волнообразно

впадають на відстані λ від центра решітки. Отчетливо спостерігається концентрація поля в точках розташування излучателей. Четко видні інтерференційні максимуми на відстанях $1,5\lambda$.

На відстанях приблизно чверть довжини хвилі прослідковується інтерференційний всплеск амплітуди акустичного поля поблизу кожного излучателя.

На рис. 5 представлено просторове розподілення сумарної амплітуди поля излучения кільцевої решітки восьми акустичних излучателей з радіусом 3λ .

Розрахункові значення нормовані на максимальне значення. На ньому видні отчетливі концентрації акустичного поля в центрі решітки, з відносними значеннями поля більшими, ніж у решітки з радіусом 2λ .

Отчетливо спостерігається концентрація поля в точках розташування излучателей.

В ньому спостерігається більше кількість інтерференційних максимумів поля, ніж у решітки, показаної на рис. 4. Поблизу кожного излучателя спостерігається три максимуми і один між излучателями на відстані довжини хвилі.

На рис. 6 представлені дані розподілення ліній рівного рівня акустичного поля решітки з 10 излучателями з радіусом дві довжини хвилі. Кут між излучателями і центром решітки становить 36 градусів.

З порівняння з даними на рис. 4 видно, що збільшення кількості излучателей при фіксованому радіусі приводить до більш рівномірного розподілення звукового излучения в центрі решітки на відстані довжини хвилі.

Абсолютна концентрація амплітуди акустичного поля між излучателями більш рівномірна, ніж при восьми излучателях.

На рис. 7 представлені дані розподілення ліній рівного рівня акустичного поля решітки з 10 излучателями з радіусом дві довжини хвилі. Кут між излучателями і центром решітки становить 36 градусів. З порівняння з даними на рис. 4 видно, що збільшення кількості излучателей при фіксованому радіусі приводить до більш рівномірного розподілення звукового излучения в центрі решітки на відстані довжини хвилі.

Выводы

Исследованы волновые процессы излучения линейных решеток акустических излучателей на малых расстояниях. Показано, что учет особенностей интерференции и акустического поля, число излучателей, расстояние между ними приводят к разному характеру равномерности распределения амплитуды акустического поля. Продемонстрировано, что увеличение числа излучателей приводит к более равномерному характеру изменения амплитуды поля в центре решетки при фиксированном радиусе. Увеличение радиуса решетки при фиксированном числе излучателей приводит к образованию дополнительных интерференционных лепестков (максимумов) между соседними излучателями на расстояниях $d = 0,75 \div 0,9$ радиуса решетки.

Показаны возможности управления концентрацией амплитуды акустического поля внутри решетки изменением ее параметров.

Проведенные в работе исследования могут быть полезны в задаче определения распознавания конкретного источника звука конкретным микрофоном решетки без использования аппаратной части микрофонного локализатора, аналогично работе [1].

Список использованных источников

1. Мью Ти Ха. Аппаратные и программные средства реального времени для одно- и двумерных микрофонных решеток : дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2007. 169 с.
2. BSWA Technology: product Catalogue. China, BSWA Technology Co., Ltd, 2008. URL : <http://www.bswa-tech.com> (дата обращения : 01.09.2014).
3. Tutorialfor MEMS microphones. URL : http://www.st.com/st-web-ui/static/active/jp/resource/technical/document/application_note/DM00103199.pdf.
4. Цехмистро Р. И. Особенности излучения телекоммуникационных импедансных проволочных антенн. *Радиотехника*. Всеукр. межвед. науч.-тех. сб. 2004. № 139. С. 28-32.
5. Gorobets N. N., Gorobets Yu. N., Tsekhmistro R. I. Near-Field Effects in the Electromagnetic Power Distribution in the Vicinity of an Array of Hertzian Dipoles. *Telecommunications and radio engineering*. 1999. Vol. 53, № 3. P.24- 29.
6. Горобец Н. Н., Горобец Ю. Н., Цехмистро Р. И. Влияние эффектов ближней зоны на распределение мощности электромагнитного поля вблизи решеток диполей Герца. *Вісник Харк. нац. ун-ту. Радіофізика та електроніка*. 1998. № 405. С. 20-27.

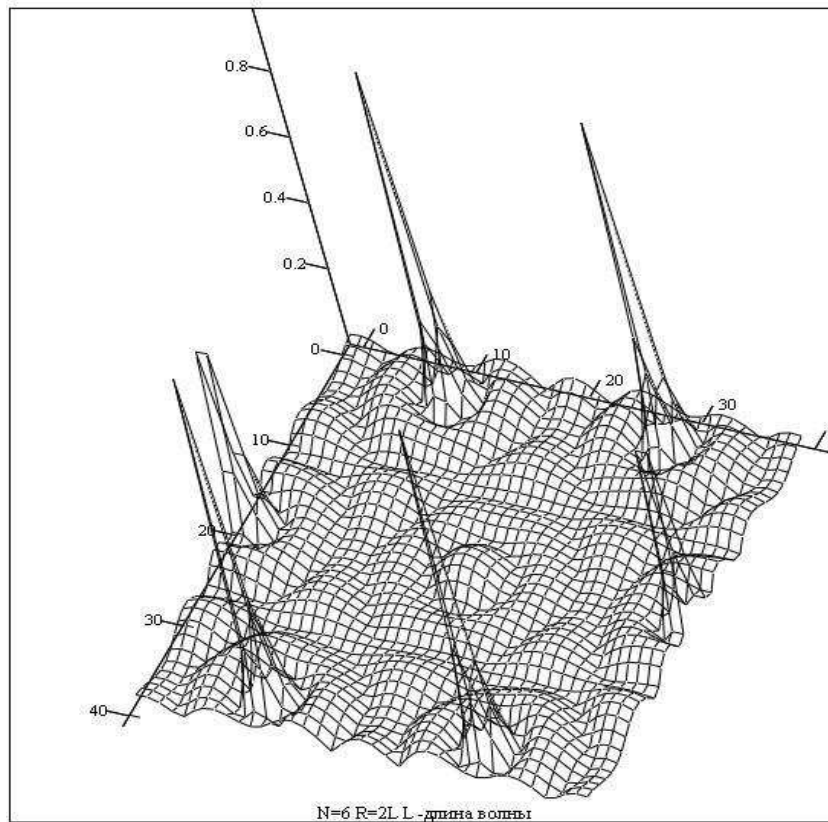
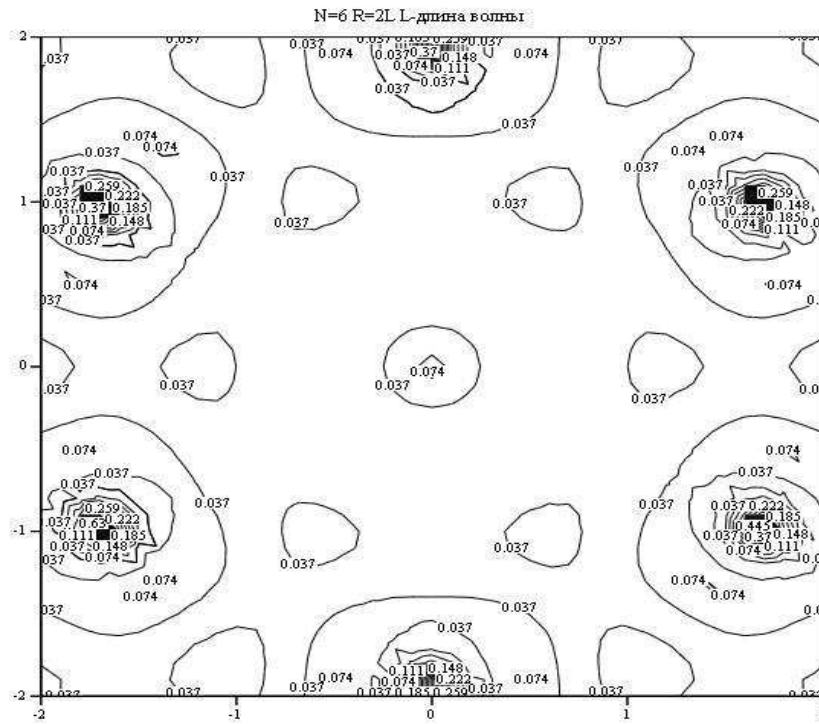


Рис. 4. Распределение акустического поля в решетке ($N = 6, R = 2\lambda$)

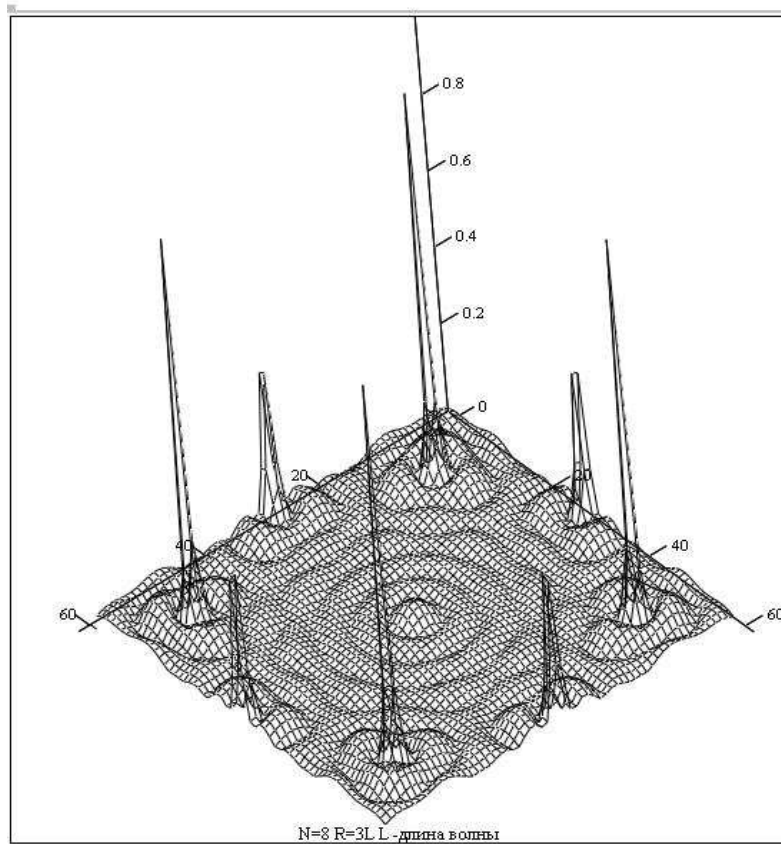
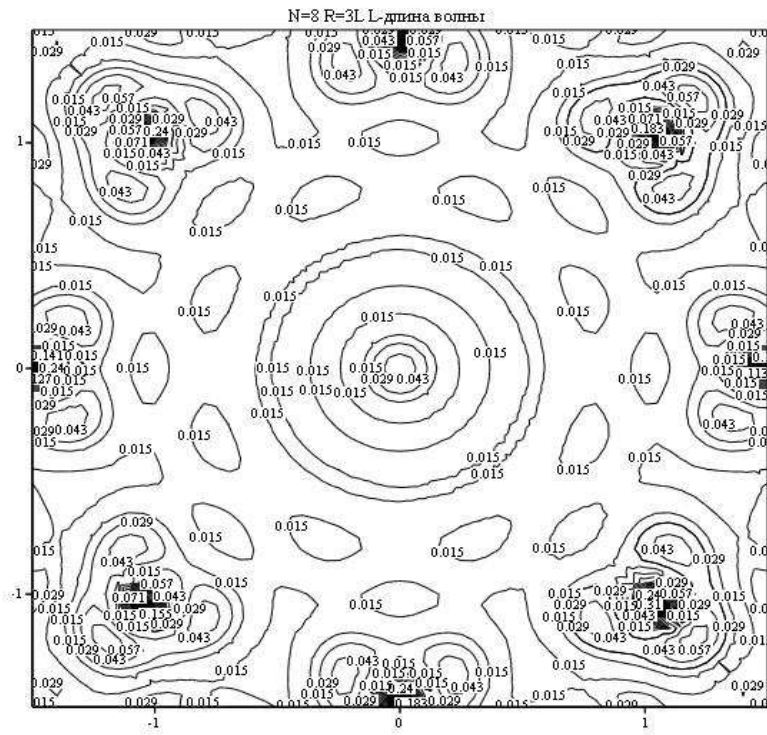


Рис. 5. Распределение суммарного поля излучения акустической решетки из восьми излучателей ($N = 8$, $R = 3\lambda$)

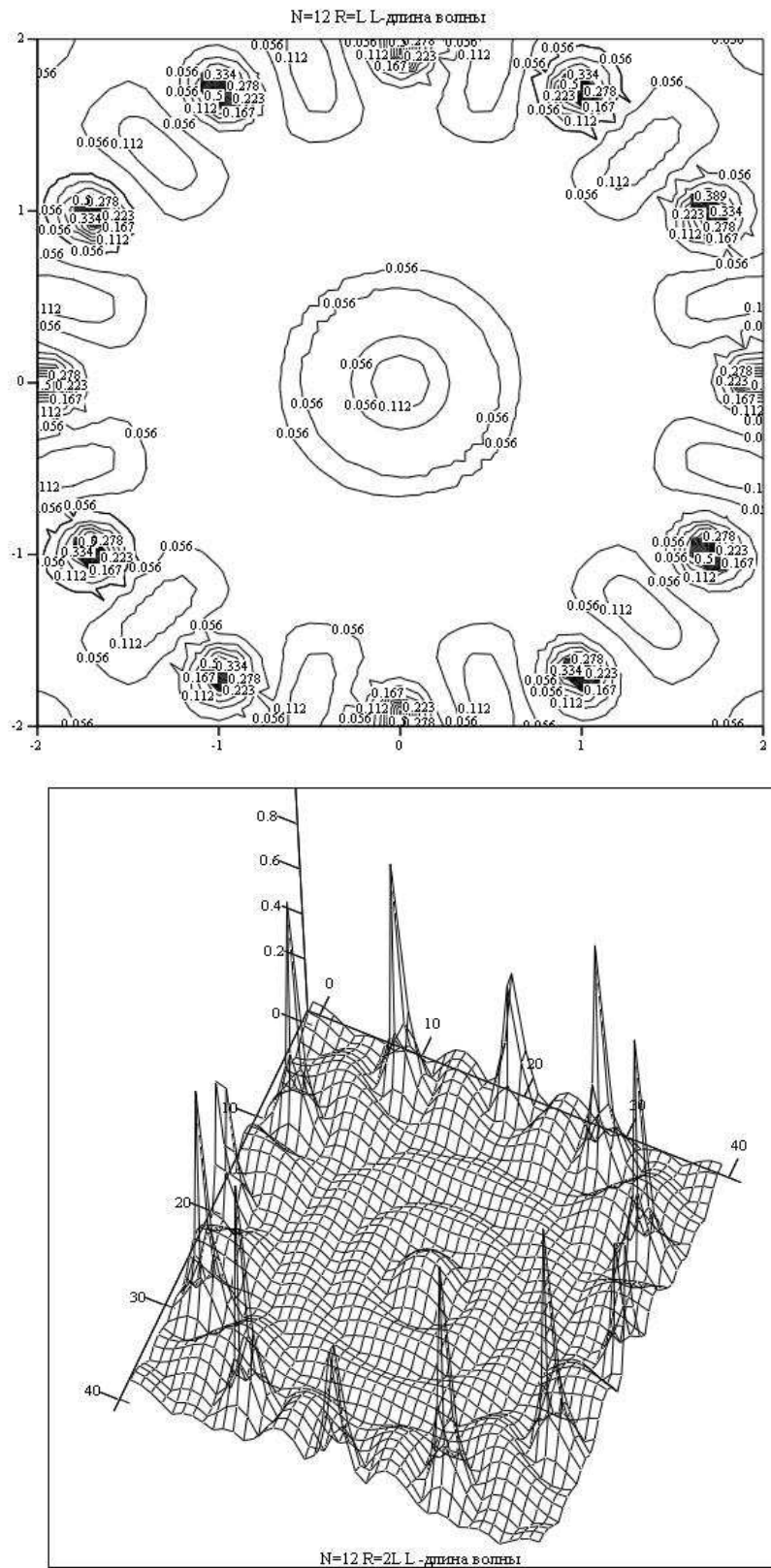


Рис. 6. Распределение суммарного поля излучения акустической решетки из восьми излучателей ($N = 12$, $R = 2\lambda$)

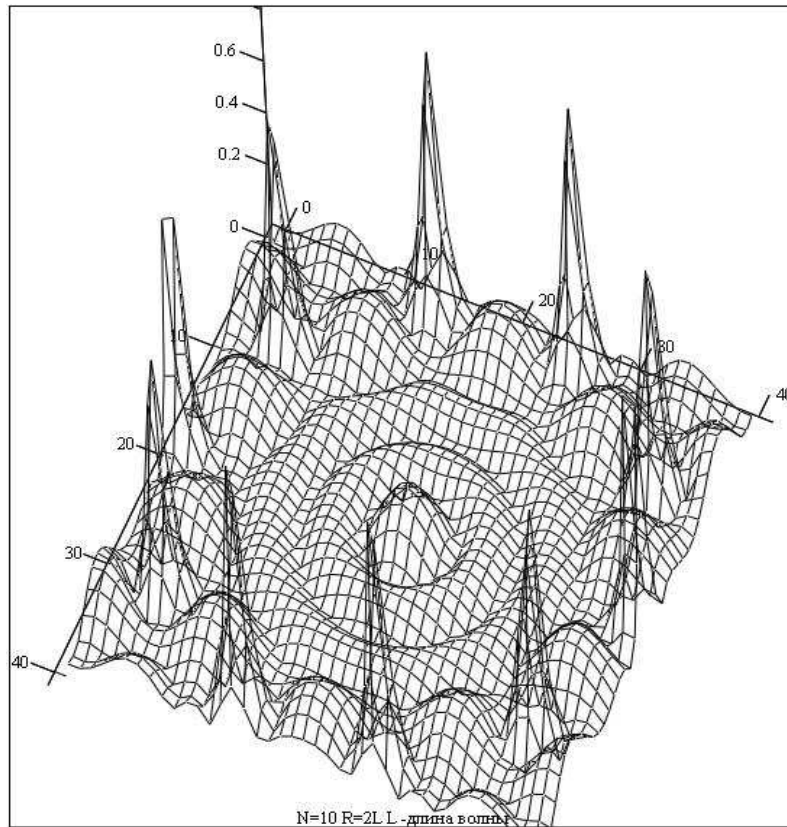
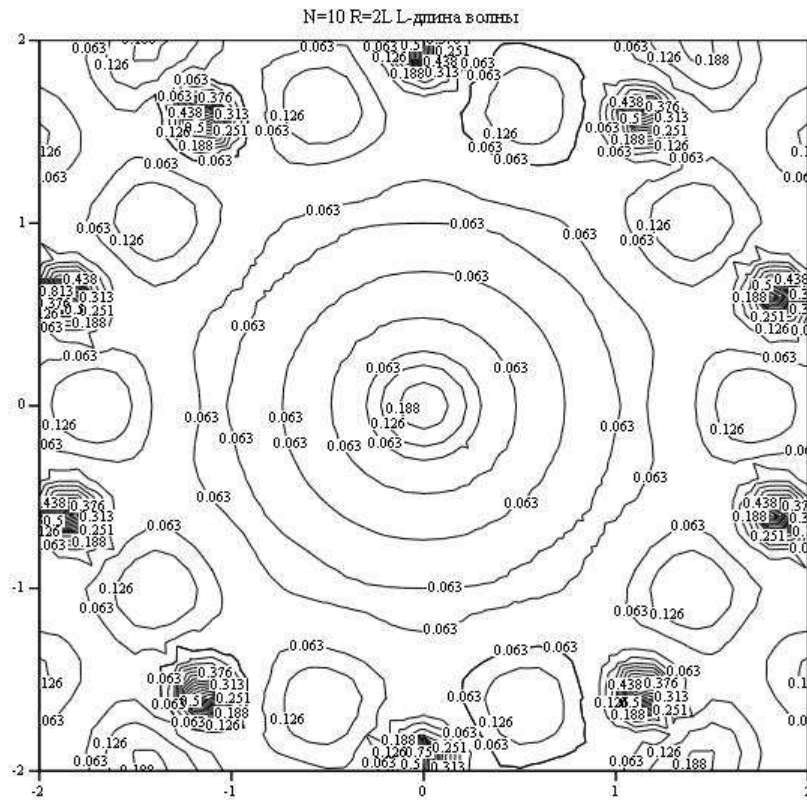


Рис. 7. Распределение суммарного поля излучения акустической решетки из 10 излучателей ($R = 2\lambda$)

Омаров М. А., Лукьянова В. А., Цехмістро Р. І., Гречко Г. В. Аналіз просторового розподілу акустичного випромінювання в розкриті кільцевих мікрофонних решіток у вільному просторі.

Анотація. У роботі здійснено комп'ютерний аналіз просторового розподілу інтенсивності звукового випромінювання решіток випромінювачів сферичних хвиль на малих відстанях. Було проведено аналіз впливу кількості випромінювачів, радіуса решітки на розподіл амплітуди акустичного поля поблизу випромінювачів. Амплітудні і фазові характеристики на малих відстанях від кільцевої мікрофонної решітки були досліджені чисельно. Були проаналізовані фізичні закономірності просторового розподілу акустичного поля мікрофонної решітки.

Ключові слова: акустичне випромінювання, решітка звукових випромінювачів, комп'ютерний аналіз просторового розподілу.

Omarov M. A., Lukyanova V. A., Tsekhmistro R. I., Gretshko A. V. Features of the spatial distribution of acoustic radiation in the aperture of annular gratings in free space.

Abstract. The computer analysis of the spatial concentration of sound amplitude radiation intensity of arrays consist of spherical radiators have been researched on a small distances. An influence of radiator numbers and distance between radiators have been researched on the possibility to provide a even concentration of radiation power in near arrays. Amplitude and phase characteristics of field in near zone of annular sound dipole antenna arrays are studied by program for computer analysis. Physical law of sound field spatial distribution of sound radiators has been carried out.

The wave processes of radiation of linear arrays of acoustic emitters at small distances were studied. It is shown that taking into account the features of interference and the acoustic field, the number of emitters, and the distance between them leads to different patterns of uniformity in the distribution of the amplitude of the acoustic field. It is demonstrated that an increase in the number of emitters leads to a more uniform character of the change in the field amplitude in the center of the grating at a fixed radius. An increase in the radius of the grating with a fixed number of emitters leads to the formation of additional interference lobes (maxima) between adjacent emitters at distances $d = 0,75-0,9$ of the radius of the grating. The possibility of controlling the concentration of the amplitude of the acoustic field inside the lattice by changing its parameters are shown. The studies conducted in this work can be useful in the problem of determining the recognition of a specific sound source by a specific microphone of the array, without using the hardware of the microphone locator, similar to.

Key words: acoustic radiation, sound radiators arrays, computer analysis, spatial concentration.

Надійшла 04.11.2019 р.

Омаров Мурад Анверович, професор, д.т.н., проректор з міжнародного співробітництва, "Харківський національний університет радіоелектроніки", Харків, Україна. E-mail: d_ns@nure.ua ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3515-4849>

Цехмістро Роман Іванович, к.ф.-м.н., доцент, кафедри природознавчих наук, "Харківський національний університет радіоелектроніки", Харків, Україна. E-mail: tsekhmistorroman@gmail.com ORCID ID://orcid.org/0000-0003-3628-3658

Лукьянова Вікторія Анатоліївна, к.п.н., доцент кафедри природознавчих наук, "Харківський національний університет радіоелектроніки", Харків, Україна. E-mail: d_ns@nure.ua ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2272-3501>

Гречко Ганна Володимирівна, студентка спеціальності "Електроніка", "Харківський національний університет радіоелектроніки", Харків, Україна. E-mail: d_ns@nure.ua

Omarov Murad, Vice-Rector on international Cooperation HNURE, Member of Academic Council, Member of Specialized Scientific Council, Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: d_ns@nure.ua ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3515-4849>

Tsekhmistro Roman, Dr. of Philosophy, docent, department of natural sciences. "Kharkiv National University of Radio Electronics", Kharkiv, Ukraine. E-mail: tsekhmistorroman@gmail.com ORCID ID://orcid.org/0000-0003-3628-3658

Victoria Lukyanova, Dr. of Philosophy, docent, department of natural sciences. "Kharkiv National University of Radio Electronics", Kharkiv, Ukraine. E-mail: d_ns@nure.ua ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2272-3501>

Gretshko Anna Vladimirovna, students of electronics department, "Kharkiv National University of Radio Electronics", Kharkiv, Ukraine. E-mail: d_ns@nure.ua