

УДК 534.3

А.В. Коржик, канд.техн.наук, Н.Ю. Филиппова

## Закономерности формирования направленных свойств антенной решетки многомодовых преобразователей в присутствии электроупругого рассеивателя

Рассмотрены особенности формирования направленных свойств антенной решетки в присутствии электроупругого акустического рассеивателя переменной жесткости. В качестве приемных и рассеивающего элементов выбраны круговые пьезокерамические цилиндрические преобразователи с разрезными электродами. Задача решена для режима приема в сквозной постановке и сводится к рассмотрению вариантов компоновки приемной решетки и рассеивателя для различных волновых характеристик и значений нагрузок электродов рассеивателя.

The formation features of directional properties of array are considered in presence the electro-resilient acoustic diffuser of variable inflexibility. As waiting rooms and dispersive elements circular is chosen cylindrical transformers with cut electrodes. A task is solved for the mode of reception in the through raising and taken to consideration of variants of arrangement of receiving grate and diffuser for different wave descriptions and values of loading of electrodes of diffuser.

**Ключевые слова:** характеристика направленности, антенная решетка, преобразователь, рассеиватель, холостой ход, короткое замыкание, переменная акустическая жесткость.

### Введение

Традиционно модельные представления об интерференционных антеннах используют подход «звукопрозрачности» и предполагают представление элементов антенн в виде монополей [1]. При этом использование метода сквозной задачи дает возможность учета реальных распределений колебательной скорости по поверхности элементов антенных устройств, что позволяет уйти от упрощений, использованных в классических моделях и обогатить представления о формировании пространственных характеристик антенных решеток, построенных на основе пьезокерамических круговых цилиндрических вакуумированных внутри элементов (например, работы [2, 3] для цилиндрических и сферических приемников).

Актуальность проблемы обусловлена необходимостью углубленного понимания физической сути взаимного преобразования акустической, механической и электрической энергии в пьезокерамических элементах, используемых не только как приемники звука, но и как рассеиватели переменной акустической жесткости. При этом формирование пространственной избирательности системы электроупругих приемников должно зависеть от условий использования указанного рассеивателя и его акустических свойств. Основываясь на результатах работ [4, 5] при определении пространственной избирательности в части расчета характеристик направленности (ХН), используется подход с применением функций включений вида

$$f_{sm}(\varphi_s) = B \cdot \text{rect} \left[ \frac{\varphi_s}{2\gamma_{os}} \right] \text{ и последующим сумми-$$

рованием электрических напряжений с выхода электродов преобразователя на сумматоре для фиксированных значений углов падения звуковой волны на рассматриваемую систему «преобразователь-рассеиватель».

Целью работы является исследование пространственных характеристик антенных решеток электроупругих преобразователей в присутствии рассеивателя переменной акустической жесткости.

### 1. Постановка задачи, исходные данные и условия расчета

Постановка задачи, метод решения и условия усечения бесконечных систем и общие исходные данных соответствуют приведенным в работах [2, 6].

Рассмотрим антенную решетку электроупругих тел, которая размещена в идеальной жидкости. Система образована двумя приемными преобразователями ( $s = 1; 3$ ) и одним рассеивателем ( $s = 2$ ). Схема расположения элементов приемной антенной решетки приведена на рис. 1.

Каждый преобразователь системы представляет собой пьезокерамическую радиально поляризованную бесконечно длинную круговую

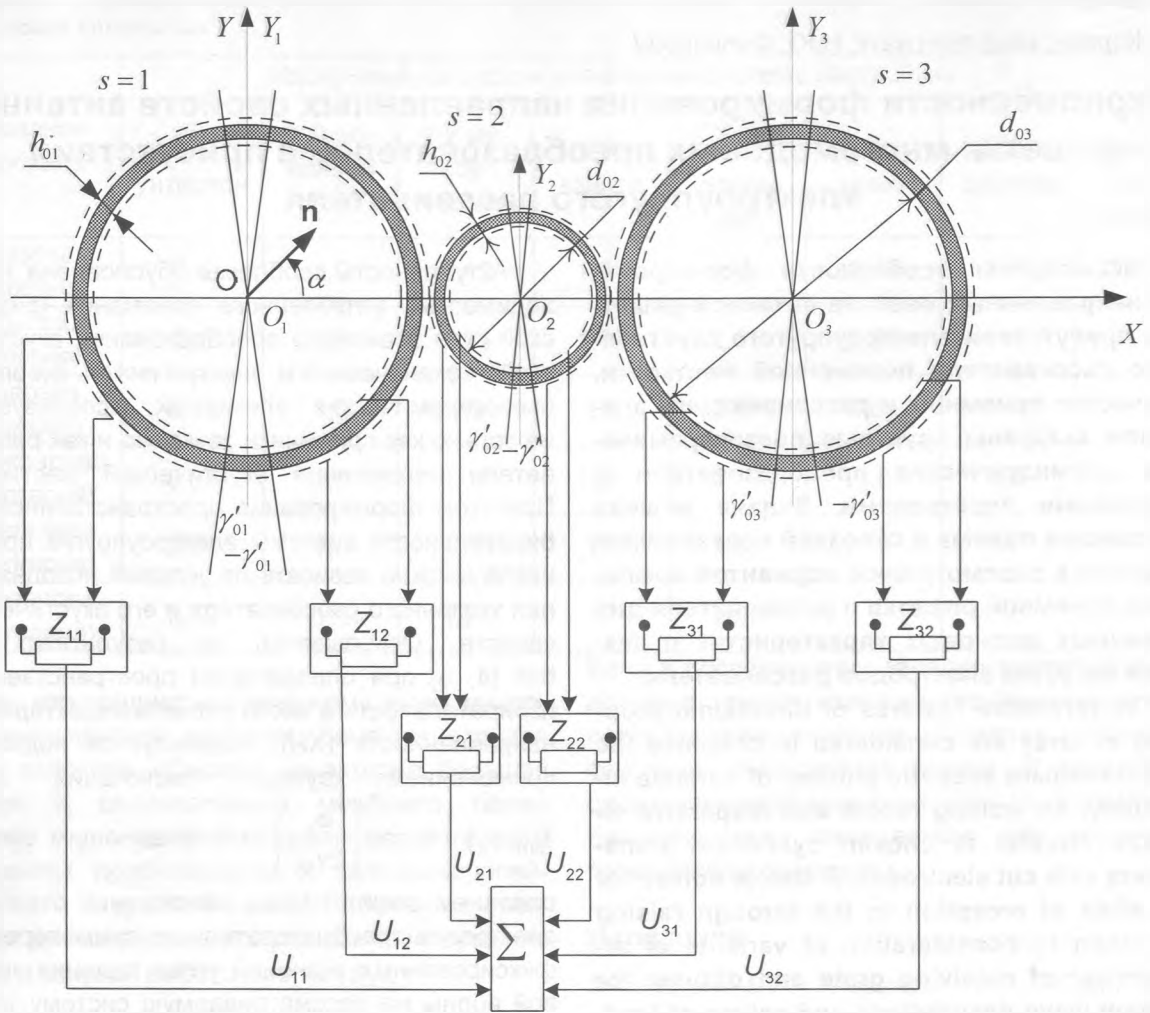


Рис. 1. Схема расположения элементов приемной антенной решетки

цилиндрическую оболочку радиуса  $r_{Os}$  и с толщиной стенки  $h_{Os}$ . Оболочки не соприкасаются и выполнены из одного и того же пьезоматериала. Углы раскрытия электродов  $\gamma_{Os}$  и  $\gamma'_{Os}$  одинаково ориентированы и равны между собой. Электроды преобразователей электрически не соединены и нагружены на отдельные, электрически независимые (в общем случае комплексные) сопротивления.

На систему преобразователей в направлении единичного вектора  $\mathbf{n}$  под углом  $\alpha$  из бесконечности падает плоская звуковая волна, при этом суммарное акустическое поле  $P_{\Sigma}$ :

$$P_{\Sigma} = p^{(0)} + p^{(1)}$$

где  $p^{(0)}(r_s, \varphi_s) = e^{ik(\vec{n}\vec{R}_{Os})} \sum_m i^m I_m(kr_s) e^{im\varphi_s} e^{-im\alpha}$  -

давление плоской волны, падающей нормально на антенную решетку.

Давление поля рассеяния упругими оболочками:

$$p^{(1)} = \sum_{s=1}^N P_s^{(1)} \quad (1)$$

При этом разложение рассеянного поля в локальных координатах  $s$ -го цилиндра представлено как:

$$P_s^{(1)}(r_s, \varphi_s) = \sum_m A_m^{(s)} H_m^{(1)}(kr_s) e^{im\varphi_s} \quad (2)$$

Суммарное поле обусловлено сложным характером угловых распределений давлений, колебательных скоростей и механических перемещений на поверхности элементов антенны. Таким образом, результирующие электрические напряжения на нагрузках электродов будут определяться указанным сложным характером угловых распределений акустических давлений и перемещений точек поверхности оболочки.

Аналитическое решение предлагаемой задачи приведено в работе [2] и сводится к решению бесконечных систем вида:

$$X_l^{(s)} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq s}}^N \sum_p C_{lp}^{(js)} X_p^{(j)} = D_l^{(s)} \quad (3)$$

где

$$C_{lp}^{(js)} = \frac{\frac{a_{js}}{\omega \rho c} I_j'(kr_{os}) + \frac{s_{11}^E (1 - v_s^2)}{h_{os}} I_j(kr_{os})}{\frac{a_{js}}{\omega \rho c} H_p^{(1)'}(kr_{oj}) + \frac{s_{11}^E (1 - v_j^2)}{h_{oj}} H_p^{(1)}(kr_{oj})} \times \\ \times H_{p-l}^{(1)}(kr_{js}) e^{i(p-l)\varphi_{js}}$$

$$D_i^{(s)} = 2\pi r_{os} (1 + v_s) a_{31}^{(s)} \frac{U_{js}}{h_{os}}$$

$$H_l^{(s)} = \frac{a_l}{\omega \rho c} \left[ H_l^{(1)'}(kr_{os}) + \frac{s_{11}^E (1 - v^2)}{h_{os}} H_l^{(1)}(kr_{os}) \right] \times \\ \times A_l^{(s)}$$

В ряде работ [7, 8] системы (3) в выбранном для решения классе функций являются квази-регулярными и могут быть решены относительно неизвестных коэффициентов методом редукции. Исползованный метод решения состоящий в замене бесконечных систем уравнений (3) системами вида:

$$X_l^{(s)} + \sum_{j=1}^N \sum_{p \substack{M1 \\ j \neq s}} C_{lp}^{(js)} X_p^{(j)} = D_l^{(s)} \quad (4)$$

при выборе достаточно больших порядков усечения M1 обеспечивает сходимость приближенных решений к точному. Сведение бесконечных систем вида (2) к конечным с порядком N1, а также выбор значений порядков M1 и N1 производился опытным путем в результате последовательного решения ряда усеченных систем уравнений вида (4) с возрастающими значениями порядка усечения M1, вычислении рядов вида (2) порядка N1 на основании полученных результатов решения и сопоставления расчетных данных. Анализ опыта, накопленного при выполнении расчетных работ по волновым задачам рассматриваемого типа [9], показывает, что в качестве исходного значения для отыскания порядка усечения M1 бесконечной системы линейных уравнений и порядка N1 ограничения количества членов, учитываемых в разложениях полей, можно принять:

$$N1 = [2ka] + \beta$$

где  $k$  - волновое число;  $2a$  - диаметр преобразователя;  $[ ]$  - целая часть числа;  $\beta$  - коэффициент, величина которого зависит от того, в какой части волнового поля находится точка, для которой рассчитывается значение звукового поля. Для дальнего поля  $\beta \approx 4 \div 8$ , а для ближнего  $\beta \approx 9 \div 15$ .

Таким образом, в качестве исходных соотношений для решения задачи может быть принята

величина порядка  $[2ka] + 10$ . Проводимые в ходе выполнения расчетов проверочные вычисления сходимости процессов счета показали, что при принятом порядке усечения точность вычислений решаемой задачи составила величину - не больше 3%. Эта величина была принята достаточной для выполнения всех последующих расчетов.

В качестве электрических нагрузок приняты:

$$Z = \frac{Z_{11}}{Z_0} = \frac{Z_{12}}{Z_0} = \frac{Z_{31}}{Z_0} = \frac{Z_{32}}{Z_0}$$

где  $Z_0 = 1(Ом)$ , а  $Z_{11} = Z_{12} = Z_{31} = Z_{32} = 10^6(Ом)$ .

Известно [9], что режим холостого хода на нагрузках электродов оболочки приводит к повышению ее жесткости. В случае создания условия короткого замыкания жесткость снижается. Поэтому в качестве нагрузки на рассеивателе рассматривались два варианта, как приближенные к ситуации холостого хода и короткого замыкания соответственно:

$$1) Z_{21} = Z_{22} = 10^9(Ом)$$

$$2) Z_{21} = Z_{22} = 1(Ом)$$

Рассеивающий элемент выбранный в виде круговой цилиндрической оболочки с разрезными электродами с диаметром  $d_{02} = 2r_{02} = 67,5 \cdot 10^{-3}(м)$ , а толщина  $h_{02} = 3 \cdot 10^{-3}(м)$ . Рассматривается случай, когда пьезокерамические оболочки расположены вплотную друг к другу.

Ситуация короткого замыкания и возбуждения оболочки на резонансе нулевой формы позволяет приближенно рассматривать ее как рассеиватель, стремящийся по своим акустическим свойствам к акустически мягкому объекту. При выборе значения частоты возбуждения, не совпадающей с частотой резонанса одной их форм, оболочка приобретает акустическую жесткость [11]. Таким образом, рассматриваемые расчетные ситуации включают в себя комбинации условий по частоте и электрическому нагружению:

1. исследование ХН системы двух преобразователей на частоте нулевой моды приемного преобразователя;
2. исследование ХН системы двух преобразователей в присутствии одного рассеивателя на частоте нулевой моды приемного преобразователя;
3. исследование ХН системы двух преобразователей в присутствии одного рассеивателя на частоте нулевой моды рассеивателя;
4. исследование ХН антенной решетки двух монополей.

Результаты расчета характеристик направленности представлены на рис. 2. и рис. 3.

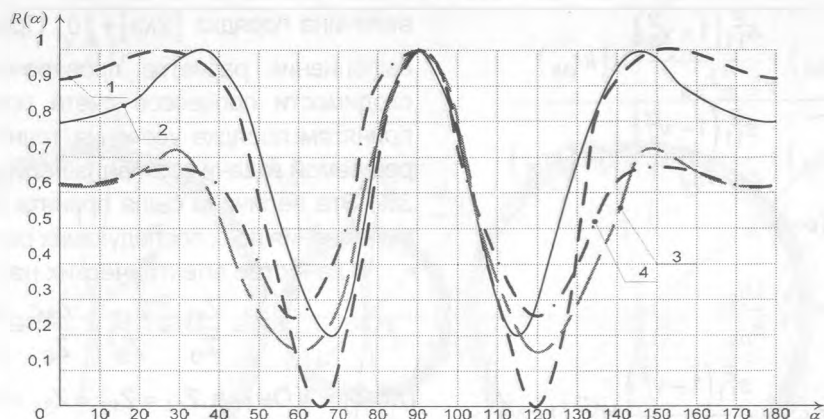


Рис. 2. Характеристика направленности на резонансе нулевой моды приемного преобразователя  $f_{0пр}$   
 1 – системы двух монополей; 2 – системы двух преобразователей без рассеивателя; 3 – системы двух преобразователей при реализации короткого замыкания на нагрузках электродов рассеивателя; 4 – системы двух преобразователей при реализации холостого хода на нагрузках электродов рассеивателя

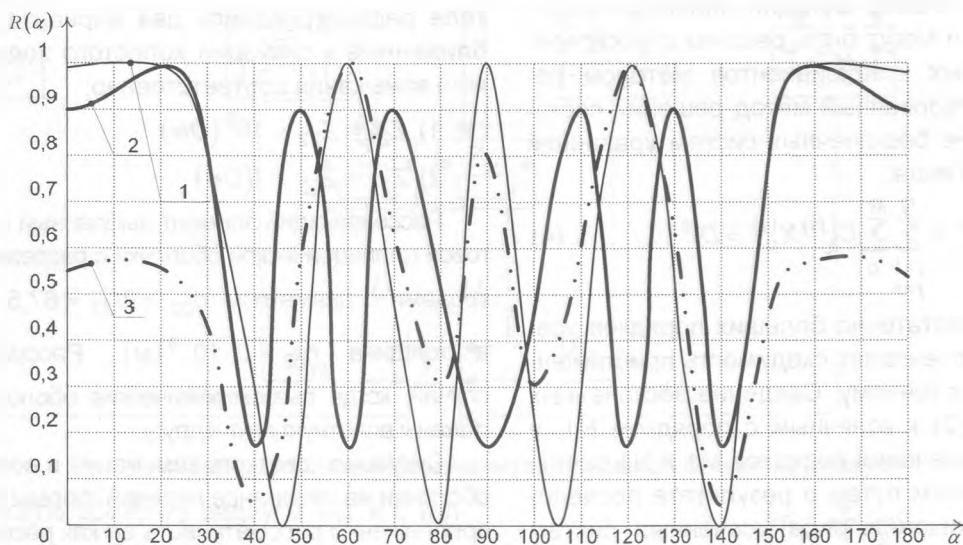


Рис.3. Характеристика направленности на резонансе нулевой моды рассеивателя  $f_{0р}$  1 – системы двух монополей; 2 – системы двух преобразователей при реализации короткого замыкания на нагрузках электродов рассеивателя; 3 – системы двух преобразователей при реализации холостого хода на нагрузках электродов рассеивателя

## 2. Анализ полученных результатов

Для частоты нулевой моды приемных преобразователей ( $f_{0пр} = 8,2$  кГц) ХН классической, исследуемой антенной решеткой и ХН антенной решеткой в присутствии акустически жесткого рассеивателя – имеют схожий характер, что определяется формой, шириной раскрыва главного максимума, местоположением минимумов и нулей функций ХН (рис.2, кривая 1, 2). При этом отличия в местоположении нулей составляет менее  $10^\circ$ , а уровни бокового поля ХН системы преобразователей в присутствии электроупругого рассеивателя имеют меньший (до 3 дБ) уровень бокового поля, что может быть связано с влиянием рассеивателя на характер колебаний преобразователей. Схо-

жая ситуация в части варируемости видов колебаний преобразователей системы была описана в работах [12].

То есть, при работе системы на частоте резонанса преобразователей решетки, сформированная ХН слабо зависит от условий электрического нагружения рассеивателя в виду преобладающего влияния на его акустические свойства выбора рабочей частоты.

При возбуждении системы на резонансе нулевой моды рассеивателя ( $f_{0р} = 15,1$  кГц) ситуация меняется, - наблюдаются существенные отличия в сформированной в присутствии рассеивателя ХН (рис.3, кривая 2). При этом по уровню бокового поля ХН системы с рассеивателем при работе на частоте резонанса нулевой формы рассеивателя, но в условиях электриче-

ского нагружения, соответствующих холостому ходу, - имеет уровни бокового поля на 6-7 дБ ниже, чем ХН классической решетки. Единичные максимумы и нули ХН для указанной расчетной ситуации практически совпадают. Изменяя нагрузку электродов рассеивателя до, практически, короткого замыкания наблюдается устремление его свойств к свойствам акустически мягкого объекта. То есть, в условиях работы на резонансе нулевой формы центрального рассеивателя, применение режима короткого замыкания приводит к образованию многолепестковости ХН с практически равными по раскрытию боковыми максимумами. При этом главный максимум, как таковой, исчезает, а направление компенсации ХН ( $\alpha = 90^\circ$ ), свойственное ситуации акустически жесткого рассеивателя меняется, трансформируясь в направления указанных боковых максимумов. Уровни бокового поля при этом совпадают с уровнями бокового поля классической антенной решетки.

## Выводы

Таким образом, исследование направленных свойств антенной решетки, образованной из электроупругих элементов и электроупругого рассеивателя переменной акустической жесткости показали, что:

1. Изменение акустической жесткости рассеивателя приводит к существенным изменениям ХН.
2. Используя акустически мягкий рассеиватель имеется возможность изменения уровня главного максимума, формы ХН (появление единичных максимумов в направлении  $120^\circ$  и  $60^\circ$ ) и уменьшения уровня бокового поля до 6 дБ.
3. Регулировка акустической жесткости для рассмотренной системы и выбранного типа электродирования осуществляется наиболее эффективно на резонансе нулевой моды рассеивателя при одновременном уменьшении сопротивления нагрузки до режима короткого замыкания.

## Литература

1. *Смарышев М.Д.* Направленность гидроакустических антенн. - Л.: Судостроение, 1973. - 279 с.
2. *Коржик О.В., Лейко О.Г.* Взаємодія плоскої акустичної хвилі з лінійною решіткою електропружних циліндричних перетворювачів // Наукові вісті НТУУ «КПІ». - 2001. - №4. - С. 106-114.
3. *Савин В.Г., Моргун И.О.* Преобразование акустических импульсов в электрические сферической пьезокерамической оболочкой // Электроника и связь. - 2006. - №6. - С. 36-42.
4. *Дідковський В.С., Лейко О.Г., Савін В.Г.* Електроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі. - Кіровоград: «Імекс-ЛТД», 2006. - 448 с.
5. *Коржик А.В., Лейко А.Г.* Формирование характеристик направленности антенны, состоящей из двух электроупругих элементов // Электроника и связь. - 2009. - №1. - С. 45-53.
6. *Коржик О.В., Лейко О.Г.* Дослідження акустичних характеристик одиночного п'єзокерамічного циліндричного перетворювача при розв'язанні задачі прийому в наскрізній постановці // Наукові вісті НТУУ «КПІ», - 2002. - №5 - С.105-113.
7. *Лейко А.Г., Шамарин Ю.Е., Ткаченко В.П.* Подводная электроакустическая аппаратура и устройства: В 2т. - К.: ГКППУ ГНИИ ГП, 2000. - Т.1: Подводные акустические антенны. Методы расчета звуковых полей - 320 с.
8. *Иванов Е.А.* Дифракция электромагнитных волн на двух телах. - Минск. Наука и техника, 1968. - 584 с.
9. *Гринченко В.Т., Вовк И.В.* Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках. - Киев: наук. Думка, 1986. - 240 с.
10. *Сенченко И.В.* Закономерности колебаний пьезокерамических оболочек с учетом взаимодействия с окружающей средой: Дис. ... канд. техн. наук: 01. 02. 04. -К., 1986.-129 с.
11. *Коржик О.В., Лейко О.Г.* До питання дифракції плоскої акустичної хвилі на електропружному циліндричному прийомному перетворювачі // Наукові вісті НТУУ «КПІ», - 2004.- №6 - С.83-89.
12. *Коржик А.В.* Исследование закономерностей акустического взаимодействия элементов антенных решеток, образованных электроупругими цилиндрическими преобразователями/ А.В. Коржик// Системи обробки інформації.- Х.: ХУ ПС, 2010.-Вип. 5(86).-С. 59-66.