

УДК 534.3

А.В. Коржик, канд. техн. наук

Пространственная избирательность многомодовых электроупругих цилиндрических систем

В рамках метода сквозной задачи определено перспективное направление исследований пространственных свойств приемо-излучающих антенных систем на основе многомодовых цилиндрических преобразователей, представленных электроупругими цилиндрическими круговыми оболочками, погруженными в идеальную жидкость. При этом обеспечивается возможность видоизменения характеристик направленности одиночных преобразователей и антенн, построенных на их основе, в широком частотном диапазоне как с применением волновых методов, так и путем реализации свойств умеренной сверхнаправленности указанных преобразователей и антенн.

In a boundaries of hydro – electroelastic tasks the perspective research of directional properties many-modes electroelastic systems was showed. The solution of this task to give a chance for the regulating the directional characteristics this transducers system by traditional waves methods and methods of superdirective antennas, with put together properties coupled modes many-modes electroelastic cylindrical transducers.

Ключевые слова: гидроакустические средства, электроупругость, направленность, сверхнаправленность, цилиндрический преобразователь, моды, разрезные электроды, нагрузка, электрическая нагрузка, давление, электрическое поле, характеристика направленности.

Введение

В современной гидроакустике задачи о создании пространственной избирательности приемо-излучающих систем развиваются весьма динамично, что связано с постоянно возрастающими требованиями к гидроакустическим средствам в части обеспечения большей дальности действия, расширения частотного диапазона, увеличения рабочих глубин и решения задач комплексации при уменьшении массогабаритных характеристик как аппаратной составляющей, так и приемо-излучающих преобразующих систем.

Это направление предполагает изменение расстановки акцентов при проектировании гидроакустических средств, что связывается либо с

усилением роли обрабатывающего ядра и решения проблемы интегрирования аппаратной части гидроакустических средств в бортовые системы носителей, либо с совершенствованием автономных аппаратных устройств, либо с повышением роли антенных и преобразующих систем. Безусловно, не исключается ситуация развития указанных направлений параллельно.

При этом основными предпосылками повышения роли антенно-преобразующей составляющей являются:

- тенденция к расширению частотного диапазона, вообще, и к смещению рабочих характеристик в низкочастотную область, в частности;
 - необходимость снижения или, по крайней мере, сохранения массогабаритных характеристик антенн и преобразователей при изменении частотного рабочего диапазона;
 - необходимость видоизменения пространственных характеристик антенн и преобразователей и управления ими в разных частотных диапазонах с целью получения требуемых параметров характеристик направленности;
 - использование протяженных кабельных линий при подключении забортовых устройств;
 - увеличение диапазона рабочих глубин и при этом учет снижения роли экранирующих элементов, используемых при формировании однонаправленных пространственных характеристик;
 - методическое и метрологическое обеспечение акустической составляющей проблемы комплексации гидроакустических средств в части использования одного общего забортного устройства для решения различных задач в среде интегрированной аппаратной составляющей.
- Все это и обуславливает цель предлагаемой работы, которая заключается в расширении применимости метода сквозной задачи на исследования пространственных свойств антенных систем, созданных на основе многомодовых цилиндрических преобразователей, основываясь на изучении особенностей процессов излучения и приема звуковых волн электроупругими цилиндрическими круговыми оболочками, погруженными в идеальную жидкость.

1. Развитие подходов к определению пространственных свойств акустических антенн

В настоящее время существует большое количество разнообразных классов акустических антенн [1], каждый из которых обеспечен аналитической базой в части решения задач анализа и синтеза (например, работы [1–8]). При этом модели, используемые для описания звуковых полей акустических антенн, в большинстве своем базируются на использовании приближений для дальнего поля и на допущении о звукопрозрачности таких систем [1–4, 6–8]. Заметим, что указанные допущения не распространяются на фокусирующие антенны [3, 5].

Отметим также, что приближение идеологии постановки и построения расчетных схем задач о направленности к реальным условиям работы акустических антенн развивалось параллельно с развитием самой антенной техники по мере ее усложнения. Так, первоначально, достаточно широкое развитие получили интегральные методы в формульных представлениях Кирхгофа [9,10], Гюйгенса [10] и Грина [9,11]. Однако в силу сложности аналитических и расчетных представлений, а также трудностей, связанных с определением вида функций Грина для поверхностей антенн многих классов, указанные методы в инженерной практике использованы мало, остаются в большей степени базовыми и в основном применяются для решения концептуальных научных задач.

В дальнейшем, приближение постановок задач к реальным условиям работы гидроакустических антенн проводилось путем введения ситуации акустического взаимодействия элементов антенны между собой. Учет такого взаимодействия реализован при решении задач синтеза антенн лишь к середине 80-х – началу 90-х годов XX столетия. Причем вопросы акустического взаимодействия элементов антенн между собой в режимах излучения и приема исторически связывались с взаимным сопротивлением излучения элементов [1, 2] и приобрели более широкое толкование в работах [10, 12, 13]. К этому можно отнести привлечение в качестве предмета анализа – структуры рассеянных и полных полей систем приемных и излучающих преобразователей. Поэтому вопросы проектирования отечественных антенных систем на рубеже XX–XXI веков представляются хорошо освещенными лишь в традиционных постановках задач приема и излучения звука [1–7] с дополнениями в части рассмотрения эффектов взаимодействия элементов антенны между собой по

акустическому полю [10, 12, 13]. Следует также отметить, что если в высокочастотном диапазоне практический интерес к формированию пространственных качеств антенных систем мог быть удовлетворен за счет использования, в основном, геометрии и волновых свойств антенн и преобразователей, то для средне- и низкочастотного диапазона (в силу неизбежного увеличения массо-габаритных характеристик антенн) многообещающим представлялось направление, связанное с проблемой использования векторных и комбинированных преобразователей–приемников. При этом удавалось сохранить габариты антенн, но требовались исследования и разработка, собственно, приемников, реагирующих как на скалярные, так и на векторные характеристики акустического поля. В обеспечении векторно-фазовых методов в основном исследовались приемники колебательной скорости, градиента давления и смещения [14, 15].

Еще одно направление развития акустических антенных систем для низкочастотной области, обозначилось благодаря явлению так называемой «сверхнаправленности» [16–18], определяющее возможность антенны иметь более высокие направленные качества при проведении некоторых аддитивных операций в ее трактах без изменения габаритов и конфигурации. Отметим, что общие соображения о возможности концентрации энергии точечного источника в любом сколь угодно малом телесном угле высказаны еще в 1922 г. Озеном.

Терминологически [19, 20], понятие «сверхнаправленность» заимствовано из теории синтеза радиоантенн [21–25]. Привлечение идеологии классической сверхнаправленности к задачам акустики относится к 60-м – 70-м годам прошлого столетия [28, 29] и в дальнейшем для корабельных систем широкого применения не нашло. Это обусловлено рядом причин, например, такими как значительная чувствительность сверхнаправленной антенны к неточностям выполнения аддитивных операций в части внесения амплитудно-фазовых распределений [24, 25–27] и высокая степень подверженности акустических антенн эффектам взаимодействия элементов антенны по акустическому полю [28].

Физические основы работы сверхнаправленных антенн, векторных приемников и непосредственно результаты проектирования гидроакустических систем телеметрии на их основе, представлены в литературе весьма широко: от научно-теоретических аспектов электроакустики [26, 27] и гидроакустики [28, 29] до техни-

ческой реализации векторных и комбинированных приемников [30, 31].

Гидроакустические преобразователи, как структурные элементы приемо–излучающих гидроакустических антенн, заслуживают отдельного исследования их пространственно–энергетических свойств. При этом в задачах анализа и синтеза акустических антенн [1, 2, 6] в рамках существующих представлений о методах и подходах к проектированию электроакустических преобразователей, необходимо упомянуть об общей проблеме для антенн всех классов, состоящей в невозможности точного учета граничных условий на поверхностях преобразователей, взаимодействующих в составе антенны. Неточности, возникающие при этом, очевидно, приводят к искажению результатов проектирования в части пространственно–энергетических характеристик как преобразователей, так, соответственно, и антенн на их основе.

Основными литературными источниками, в которых изложены традиционные подходы к проектированию гидроакустических преобразователей, являются работы [7, 8, 32–34], а также некоторые материалы [35–37], выполненные в рамках проведения научно–исследовательских и опытно–конструкторских работ на ведущих профильных предприятиях. Для устранения или (по крайней мере) снижения возникающих в указанных источниках неточностей и неизбежных упрощений представляется целесообразным переход от граничных условий на поверхности преобразователя (одиночного или нескольких) к условиям сопряжения, с помощью которых должны быть учтены эффекты взаимовлияния преобразователей по акустическому полю как показано, например, в работах [13, 34, 37].

Кроме того, учет эффектов дифракционного взаимодействия для многоэлементных антенн, а также условия использования в конструкции антенн элементов экранировки, очень часто приводят к существенным изменениям характера сопротивления излучения преобразователей [38–43]. Поэтому применение условий сопряжения обеспечивает возможности учета сложного характера распределения возмущений по поверхности приемных или излучающих преобразователей, образующих совместно с остальными конструктивными элементами (экранами, несущими конструкциями, устройствами гидродинамической защиты и т. д.), собственно, акустическую антенну. При этом замена граничных условий условиями сопряжения предпочтительнее еще и в смысле исследования характери-

стик антенн в широком частотном диапазоне для каждого приведенного в работах [1, 2] класса.

В связи с изложенным выше отметим, что в любой задаче о пространственной избирательности приемных и излучающих систем первоначально предметом рассмотрения должен быть, собственно, некий обратимый гидроакустический преобразователь оговоренных и неизменных размеров, позволяющий видоизменять свои пространственные характеристики в широком диапазоне частот. При этом их изменение должно происходить не только за счет изменения волновых соотношений задачи, но и за счет изменения характера и параметров колебаний (режимы приема и излучения), а также вида физического поля, на которое этот преобразователь должен реагировать (случай режима приема). Одними из наиболее перспективных в этом смысле являются пьезокерамические цилиндрические преобразователи, на поверхность которых нанесены разрезные электроды, обеспечивающие возможность подачи (съема) электрического сигнала в режиме излучения (приема). В связи с развитием технологии изготовления пьезокерамических элементов в последние годы широкое распространение получил типовой ряд кольцевых круговых цилиндрических пьезокерамических преобразователей, выполненных в виде сплошной тонкостенной конструкции с радиальной поляризацией [44, 45]. Соосные наборы таких колец дают возможность получать преобразователи с образующей требуемой протяженности, а также компоновать антенны на их основе [36, 37].

Предложенная цилиндрическая колебательная система является многомодовой. Причем каждая мода (собственная форма) колебаний характеризуется своими пространственно–энергетическими свойствами [7, 8, 11, 32–34, 46–49]. Таким образом, практический интерес представляют высокотехнологичные [34, 44–48] круговые тонкостенные цилиндрические преобразователи [32, 33], характеризующиеся высоким энергетическим потенциалом, способные эффективно работать в режимах приема и излучения, и позволяющие в широких частотных диапазонах, условиях работы и при разнообразных видах включения реагировать на различные физические параметры акустического поля. Это и определило использование преобразователей такого типа во многих гидроакустических приборах и устройствах [6, 13, 48].

Предпочтительное отношение к использованию круговых цилиндрических гидроакустических преобразователей указанного типа объяс-

няется еще и тем, что модовая структура акустического поля такого преобразователя весьма самобытна, а пространственная избирательность обеспечивается весомостью использования частного решения уравнения Гельмгольца по угловой координате как члена разложения бесконечного ряда для акустического поля вида $\cos(n\varphi)$, где n – номер моды (собственной формы колебаний) [11, 49], а φ – угловая координата, изменяющаяся в пределах $(0; 2\pi)$.

Акустические антенны на основе таких преобразователей, очевидно, могут быть исследованы с использованием особенностей взаимодействия по акустическому полю, указанных условий сопряжения и общих соотношений для направленности акустических антенн.

Оценку пространственных свойств преобразователей указанного типа и антенных систем на их основе представляется целесообразным производить по результатам решения задач так называемого «сквозного типа» как для режима излучения, так и для режима приема. Сквозные задачи о приеме и излучении звуковых волн относятся к классу задач гидроэластостатики и в настоящее время представлены весьма широко в работах многих авторов, например, работы [34, 37–40, 50–54, 56–62]. Тем не менее, в рамках теории гидроэластостатики вопросы о возбуждении пьезоэлектрических преобразователей электрически или акустически в нестационарном и стационарном режимах работы в большинстве своем рассмотрены лишь для пьезоэлектрических преобразователей с полностью электродированными поверхностями (например, работы [34, 38, 50–52, 54, 56]).

Для управления пространственными свойствами цилиндрических преобразователей необходима многоэлектродность, которая и позволяет использовать влияния мод низших и высших порядков на пространственные характеристики преобразователей [31, 32, 46] и антенн на их основе [15, 22, 25]. При этом случаи применения излучающих сферических и цилиндрических преобразователей со сплошными электродами и электродами в виде секций исследованы лишь в нестационарной постановке для режимов приема и излучения и упрощенных видов сигналов возбуждения [52, 60–62]. Известно также [34, 45, 52, 58, 59, 61], что применение электродов в виде секций, частично покрывающих поверхность преобразователя, приводит к обогащению модовой структуры создаваемого акустических и электрических полей за счет использования высших форм колебаний поверхности и особенностей коммутации секций

электродов. В связи с этим наблюдается своеобразная аналогия получения характеристик направленности цилиндрических преобразователей путем введения аддитивных операций в виде амплитудно-фазового весового суммирования [17, 63–66] и методов получения умеренной сверхнаправленности в антенных решетках [17, 19, 24, 25].

Кроме этого, реальные условия работы большинства гидроакустических преобразователей предполагают использование протяженных кабельных соединений. Такая ситуация приводит к необходимости учета параметров длинных кабельных линий применительно к задаваемому режиму работы линии по входу и выходу для режимов приема и излучения [53, 58–60].

2. Исходные данные, общее решение и основные результаты сквозной задачи приема

Предлагается размещение в идеальной жидкости набора пьезоэлектрических круговых бесконечно длинных многомодовых цилиндрических преобразователей. Преобразователи представлены пьезоэлектрическими цилиндрическими круговыми оболочками с разрезными электродами, которые могут быть подключены либо к выходам задающих генераторов (режим излучения) либо к входам устройств суммирования (режим приема) через однородные электрические линии с распределенными параметрами. При этом обеспечивается также оценка возможности видоизменения характеристик направленности одиночных преобразователей и антенн на их основе в широком частотном диапазоне как с применением волновых методов, так и путем изменения оцениваемого скалярного параметра поля на векторный с использованием аддитивных операций обработки. Заметим, что по своей сути отличие давлений, определяемых на поверхностях рассматриваемых электродов, обеспечивает возможность оценки рассматриваемого преобразователя как приемника градиента давления, что позволяет говорить об умеренной сверхнаправленности такого устройства.

Основные положения постановки сквозной задачи приема для указанной ситуации приведены в работах [55, 57]. Решение задачи и основные результаты в части определения параметров основных взаимодействующих физических полей приведены в работах [63–70].

В качестве основных результатов данной работы предлагаются полученные предложенным «сквозным» методом характеристики на-

правленности одиночного преобразователя в виде соосного набора цилиндрических колец с разрезными электродами и системы цилиндрических преобразователей в виде двухэлементной решетки на их основе. Система рассмотрена в широком диапазоне частот при внесении амплитудно-фазовых распределений чувствительности элементов и использовании модовых свойств предложенных преобразователей. Характеристики направленности (ХН) приведены на рис. 1–6 для условий использования кольцевых преобразователей, выполненных из пьезокерамического материала ЦТБС-3 с диаметрами 135 мм, высотой 30 мм и толщиной 6 мм для значений частот $f = 500; 4000; 8200; 11600$ Гц и значения расстояний между фазовыми центрами пары преобразователей $d = 141$ мм. При этом ХН системы в виде пары определялась из известного [1] соотношения:

$$R_0(\varphi) = \cos\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin(\varphi)\right),$$

где λ – длина волны.

Как видно из полученных результатов, направленные свойства системы, приобретенные с использованием многомодовости преобразователей, существенно выше во всем рассматриваемом частотном диапазоне. Так, даже для области нижних частот (рис. 1–3) изменения ХН пары незначительны, в то время как ХН многомодовой системы видоизменяется от формы вида $\cos(\varphi)$ до кардиоидной и даже практически квадрупольной. С дальнейшим ростом частоты многомодовость приводит к возможности получения ХН с малым числом и уровнем боковых лепестков (рис. 4), а также практически однонаправленных характеристик (рис. 5, 6)

Пространственная избирательность преобразователей рассматриваемой многомодовой системы обеспечивается за счет электромеханической активации мод от нулевой до третьей с использованием коммутации электродов соответствующих преобразователей, амплитудной коррекции чувствительности соответствующего кольцевого элемента преобразователя в рассматриваемом диапазоне частот, а также регулировки фазы электрических сигналов по выходу задающих устройств или снимаемых с электрических нагрузок преобразователей.

Характеристики получены путем внесения смещений фазы для обеспечения сфазированности электрических сигналов, соответствующих реализации мод высших порядков с нулевой модой каждого из преобразователей. При

этом коммутация электродов каждого из четырех преобразователей выполнена так, чтобы с учетом связанности колебаний доминировала нулевая, первая, вторая или третья моды. Безусловно, достижение наибольшего эффекта с точки зрения реализации эффективности

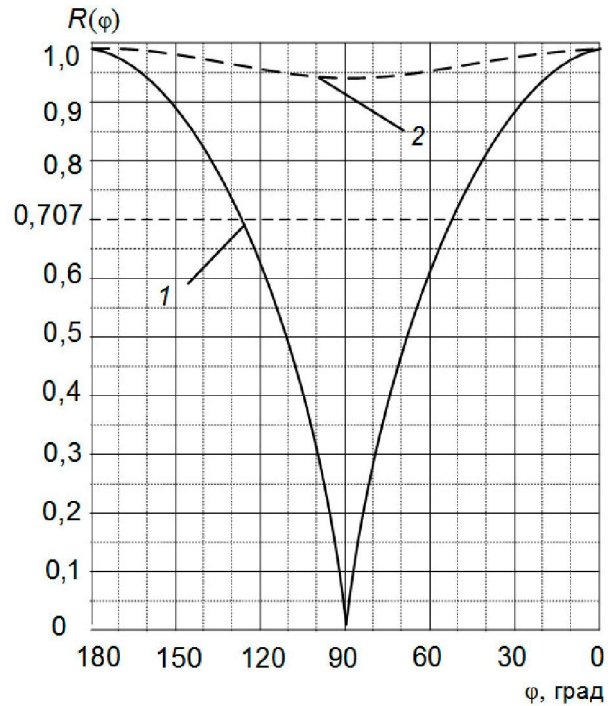


Рис. 1. $R = 500$ Гц; 1 – реализация первой моды $R(\varphi) = \cos(\alpha)$; 2 – ХН дискретной двухэлементной антенны

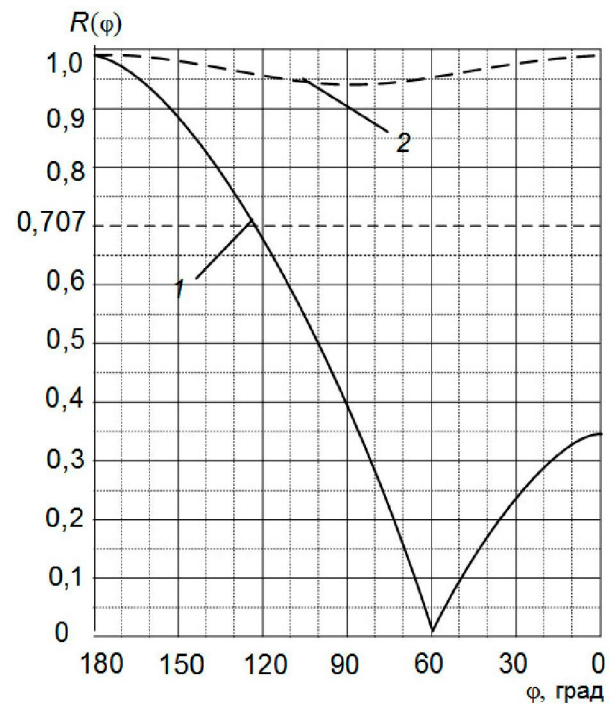


Рис. 2. $f = 500$ Гц; 1 – ХН вида $R(\varphi) = \frac{1+2\cos(\varphi)}{3} \times R_0(\varphi)$; 2 – ХН дискретной двухэлементной антенны

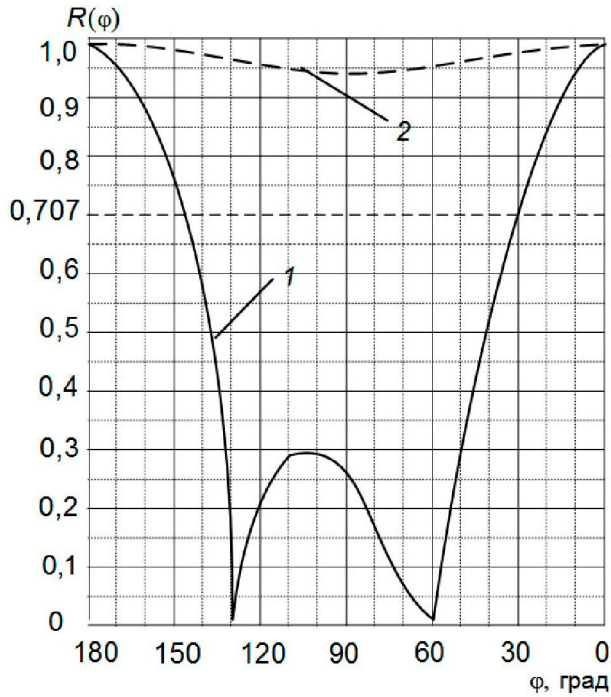


Рис. 3. $f = 500$ Гц; 1 – ХН вида $R(\varphi) = \frac{1 + 2\cos(\varphi)}{3} \times R_0(\varphi)$; 2 – ХН дискретной двухэлементной антенны

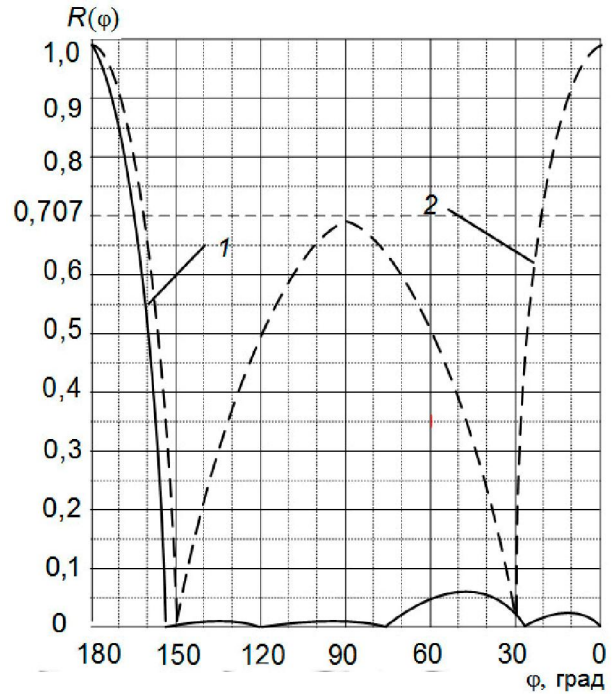


Рис. 4. $f = 4000$ Гц; 1 – ХН вида $R(\varphi) = \frac{1 + \cos(\varphi) + \cos(2\varphi) + \cos(3\varphi)}{4} R_0(\varphi)$; 2 – ХН дискретной двухэлементной антенны

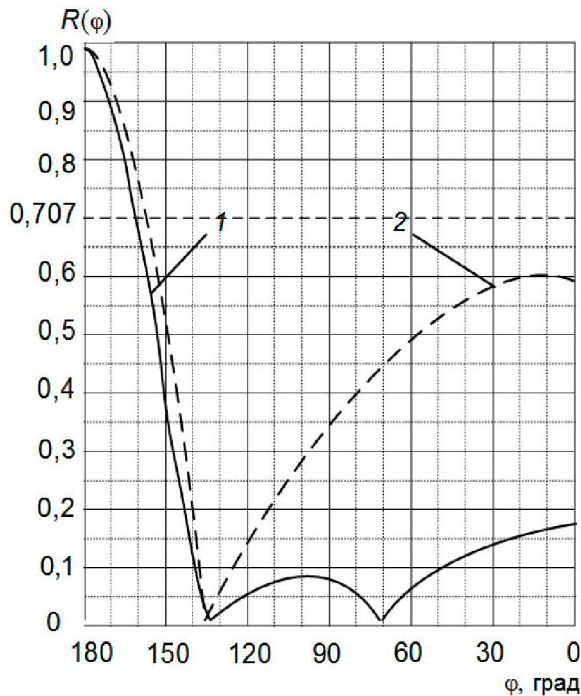


Рис. 5. $f = 8200$ Гц; 1 – ХН вида $R(\varphi) = \frac{1 + 2\cos(\varphi)}{3} \times R_0(\varphi)$; 2 – ХН дискретной двухэлементной антенны

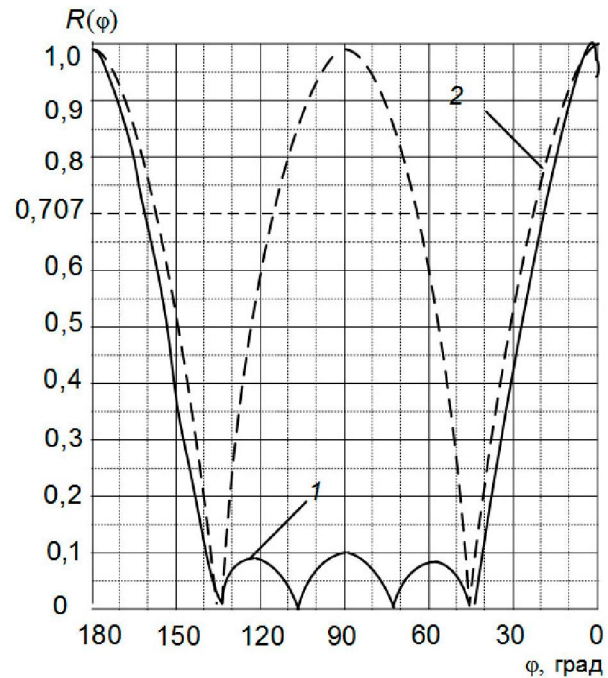


Рис. 6. $f = 11600$ Гц; 1 – ХН вида $R(\varphi) = \frac{1 + 2\cos(\varphi)}{3} \times R_0(\varphi)$; 2 – ХН дискретной двухэлементной антенны

той или иной моды, возможно лишь при работе на частоте ее резонанса. Поэтому получение результатов рис. 1–6 возможно лишь при выравнивании амплитуд по выходу соответствующих преобразователей для каждого вида сум-

мирования – т. е. при внесении амплитудного распределения, величина которого должна выбираться в соответствии с амплитудно-частотными характеристиками преобразователей [70].

Выводы

1. Предложенный подход к определению и синтезу характеристик направленности цилиндрических круговых пьезокерамических преобразователей позволяет получать характеристики направленности с учетом особенностей взаимных преобразований основных физических полей – акустического, механического и электрического, а также особенностей включения преобразователей через длинную кабельную линию;

2. Основной причиной сохранения направленных свойств в широком диапазоне частот является физическая природа колебательной системы, сочетающая в себе свойства связанности собственных форм колебаний и особенности электромеханической активации тех или иных форм;

3. Формирование характеристик направленности с использованием выбранной многомодовой колебательной системы позволяет:

- получать характеристики с весьма большой остротой направленного действия в широкой полосе частот;
- переходить к практически однонаправленным характеристикам, что в некоторой степени компенсирует неэффективность работы экранирующих элементов при значительных величинах внешнего статического давления;
- утверждать (в силу родственности операций аддитивного характера), что подобным акустическим антеннам свойственна умеренная сверхнаправленность.

Процесс управления формой амплитудных характеристик направленности требует проведения операций предварительной индивидуальной фазировки и амплитудной коррекции чувствительности преобразователей, как для одиночных преобразователей, так и для антенных систем, построенных на их основе.

Литература

1. *Смарышев М.Д.* Направленность гидроакустических антенн. – Л.: Судостроение, 1973. – 270 с.
2. *Смарышев М.Д., Добровольский Ю.Ю.* Справочник по расчету направленных свойств гидроакустических антенн. – Л.: Судостроение, 1984. – 304 с.
3. *Габидулин Г.С., Тюрин А.М., Нестеренко В.И.* Антенные устройства гидроакустических средств и их элементы. – Л.: ВМА, 1982. – 364 с.
4. *Евтютов А.П., Митько В.Б.,* Инженерные расчеты в гидроакустике. – Л.: Судостроение, 1988. – 340 с.
5. *Домаркас В.Й., Пилецкас Э.Л.* Ультразвуковая эхоскопия. – Л.: Машиностроение, 1988. – 340 с.
6. *Орлов Л.В., Шабров А.А.* Гидроакустическая аппаратура рыбопромыслового флота. – Л.: Судостроение, 1987. – 222 с.
7. *Свердлин Г.М.* Гидроакустические преобразователи и антенны. – Л.: Судостроение, 1988. – 200 с.
8. *Свердлин Г.М.* Прикладная гидроакустика. – Л.: Судостроение, 1990. – 320 с.
9. *Скучик Е.* Основы акустики: В 2 т. – М.: Мир, 1976. – Т.1. – 520 с.; Т.2. – 542 с.
10. *Шендеров Е.Л.* Волновые задачи гидроакустики. – Л.: Судостроение, 1972. – 352 с.
11. *Лепендин Л.Ф.* Акустика. – М.: Высшая школа, 1978. – 448 с.
12. *Гринченко В.Т., Вовк И.В.* Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках. – К.: Наукова думка, 1986. – 240 с.
13. *Лейко А.Г., Шамарин Ю.Е., Ткаченко В.П.* Подводная электроакустическая аппаратура и устройства: В 2 т. – К.: ГКППУ ГНИИ ГП, 2000. – Т.1: Подводные акустические антенны. Методы расчета звуковых полей. – 320 с.
14. *Гордиенко В.А., Ильичев В.И., Захаров Л.И.* Векторно-фазовые методы в акустике. – М.: наука, 1989. – 220 с.
15. *Скребнев Г.К.* Гидроакустические приемники градиента давления и комбинированные приемники // Судостроение за рубежом. – 1984. – № 2. – С. 79–77.
16. *Хансен Р.* Сканирующие антенные системы СВЧ. – М.: Сов. радио, 1966. – 536 с.
17. *Айзенберг Г.З.* Антенны ультракоротких волн. – М.: Связь, 1967. – 348 с.
18. *Пистолькорс А.А.* Антенны. – М.: Связьиздат, 1947. – 480 с.
19. Терминологический словарь – справочник по гидроакустике / Р.Х. Бальян, Э.В. Батанов, А.В. Богородский и др. – Л.: Судостроение, 1989. – 368 с.
20. Радіотехніка: Енциклопедичний навчальний довідник: Навч. посібник / За ред. Ю.Л. Мазора, Є.А. Мачуського, В.І. Правди. – К.: Вища школа, 1999. – 838 с.
21. *Фельд Я.Н., Барах Л.Д.* Современное состояние теории синтеза антенн // Радиотехника и электроника. – 1968. – № 2. – С. 187–205.
22. *Пистолькорс А.А.* Применение функций Матье для расчета распределения тока в антенне по заданной диаграмме направленности // Доклады АН СССР. – 1958. – Т. XXXIX, № 5. – С. 121–128.

23. Хурган Я.И., Яковлев В.П. Методы теории целых функций в радиофизике, теории связи и оптике. – М.: ГИФМЛ, 1962. – 220 с.
24. Jillbert E.N. Morgan S.P. Optimum design of directive antenna arrays subject to random vibrations // Bell syst. Techn. Journ. – 1955. – Vol. 34, № 5. – P. 637.
25. Tucker D.J. The signal/noise performance of electro-acoustic strip arrays // Acoustica. – 1958. – Vol. 8, № 1. – P. 512–515.
26. Фурдудев Ф.Ф. Электроакустика. – М.–Л.: ОГИЗ Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1948. – 515 с.
27. Сапожков М.А. Электроакустика. – М.: Связь, 1978. – 272 с.
28. Маяцкий В.И. Оптимизация сверхнаправленных элементов, используемых в составе антенны–решетки // Труды предприятия Р-6292.1967. – № 1. – С. 17–33
29. Маяцкий В.И. О синтезе сверхнаправленных антенн со специальными диаграммами направленности // Вопросы специальной гидроакустики. – К.: 1967. – № 4. – С. 31–39.
30. Скребнев Г.К. Комбинированные гидроакустические преобразователи. – СПб.: Элмор, 1997. – 200 с.
31. Гордиенко В.А. Векторно–фазовые методы в акустике. – М.: Физматлит, 2007. – 480 с.
32. Подводные электроакустические преобразователи / В.В. Богородский, Е.А. Зубарев, Е.А. Корепин, В.И. Якушев – Л.: Судостроение, 1983. – 243 с.
33. Пьезокерамические преобразователи. Методы измерений и расчет параметров / Под ред. С.И. Пугачева. – Л.: Судостроение, 1984. – 256 с.
34. Дідковський В.С., Лейко О.Г., Савін В.Г. Електроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі (розрахунок, проектування, конструювання). – Кіровоград: «Імекс-ЛТД», 2006. – 448 с.
35. Отчет по исследованиям пространственных характеристик приборов 37–3, 27–3: Отчет о НИР «Порыв», 1 этап / НПО «Славутич». – Ц172–Э175.21. – К., 1991. – 237 с.
36. Отчет по результатам эскизного проектирования приборов 27–3, 38–3, 28–3: Отчет о ОКР «Новелла–В», Эскизный проект / НПО «Славутич». – Ц204–Э198.05. – К., 1991. – 214 с.
37. Отчет по исследованиям основных конструкторских решений приборов 37–3, 27–3: Отчет о НИР «Объединение», 1 этап / НПО «Славутич». – Ц172–Э175.21. – К., 1991. – 237 с.
38. Гринченко В.Г., Лейко А.Г. Излучение звука системами взаимодействующих пьезокерамических оболочек // Докл. IV Всесоюз. симп. по физике акустикогидродинамических явлений и оптоакустики. – Ашхабад, 1985. – С. 83–87.
39. Борисейко В.А., Гринченко В.Т., Улитко А.Ф. Соотношения электроупругости для цилиндрических оболочек вращения // Прикл. механ. – 1976. – Т.12, № 2. – С. 26–23.
40. Гринченко В.Т., Сенченко И.В. Излучение звука частично экранированными пьезокерамическими оболочками // Прикладная Механика. – 1982. – Т. 18, № 2. – С. 15–21.
41. Климов А.Е., Лейко А.Г. О влиянии взаимодействия экранированных цилиндрических преобразователей на их характеристики звукового поля в ближней зоне плоских антенн // Вопросы кораблестроения. Серия: Спец. гидроакустика. – 1981. – № 37. – С. 55–63.
42. Климов А.Е., Лейко А.Г. Дифракция плоской звуковой волны на резонансном цилиндрическом преобразователе, частично покрытым звукоотражающим слоем конечной толщины // Доклады IX Всесоюзной акустической конференции (секция П). – М., 1978. – С. 33–36.
43. Глазанов В.Е. Экранирование гидроакустических антенн. – Л.: Судостроение, 1986. – 148 с.
44. ПЬЕЗОМАТЕРИАЛЫ. – <http://www.avrora-elma.ru/products.html>
45. ПРОДУКЦІЯ. – <http://www.kmt.kiev.ua/products/avrora-elma>
46. Аронов Б.С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 271 с.
47. Скребнев Г.К. Комбинированные гидроакустические приемники. – СПб.: Элмор, 1997. – 200 с.
48. Лейко А.Г., Шамарин Ю.Е., Ткаченко В.П. Подводная электроакустическая аппаратура и устройства: В 2 т. – К.: ГКППУ ГНИИ ГП, 2000. – Т.2: Технология акустических антенн. Методы изготовления с применением электрофизических приемов обработки. – 256 с.
49. Гринченко В.Т., Вовк І.В., Маципура В.Т. Основы акустики. – К.: Наукова думка, 2007. – 640 с.
50. Бабаев А.Э., Лейко А.Г., Савин В.Г. Акустические и механические поля радиально поляризованного цилиндрического вибратора при импульсном электрическом возбуждении // Акуст. журн. – 1989. – Т. 35, № 2. – С. 211–217.
51. Сенченко И.В. Рассеяние звука пьезокерамической цилиндрической оболочкой вблизи жесткой поверхности // Прикл. механика. – 1984. – Т. 20, № 7. – С. 111–114.
52. Бабаев А.Э., Бут Л.М., Савин В.Г. Нестационарные колебания тонкостенного цилиндрического пьезовибратора в жидкости при несимметричном электрическом возбуждении // Прикл. механика. – 1990. – Т.26. – С. 59–67.

53. Кубенко В.Д., Бабаев А.А. Влияние кабельного тракта на работу цилиндрического пьезопреобразователя в нестационарных режимах // Прикл. механики. – 1997. – Т.33, № 11. – С. 46–62.
54. Лейко А.Г., Савин В.Г., Ткаченко В.П. Взаимодействие плоской акустической волны с цилиндрической решеткой, состоящей из пьезокерамических цилиндрических преобразователей // Акустичний вісник. – 1999. – Т.2, № 2. – С. 64–72.
55. 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.
56. Лейко А.Г., Савин В.Г., Ткаченко В.П., Шармарин Ю.Е. Закономерности взаимодействия плоской акустической волны с цилиндрической решеткой, состоящей из пьезокерамических цилиндрических преобразователей // Акустичний вісник. – 2000. – Т.3, № 1. – С. 51–60.
57. Коржик О.В., Лейко О.Г. Врахування кабельного тракту при розв'язанні прийому звукових хвиль системами багатомодових п'єзокерамічних циліндричних перетворювачів // Електроніка і зв'язь. – 2007. – № 3(38). – С. 51–62.
58. Коржик А.В., Солтановский Ю.И. Излучение звуковых волн секционированным цилиндрическим пьезопреобразователем, подключенным к длинной линии // Электроника и связь. – 2009. – № 6(53). – С. 41–47.
59. Коржик А.В., М.И. Лесечко М.И. Излучение звуковых волн системой секционированных цилиндрических преобразователей, подключенных к длинной линии // Электроника и связь. – 2010. – № 1(54). – С. 54–59.
60. Савин В.Г., Моргунов И.О. Преобразование акустических импульсов в электрические сферической пьезокерамической оболочкой // Электроника и связь. – 2006. – № 6(35). – С. 36–42.
61. Моргунов И.О. Излучение акустических импульсов сферическим тонкостенным пьезопреобразователем с разрезными электродами // Электроника и связь. – 2007. – № 3(38). – С. 43–48.
62. Моргунов И.О. Действие плоской нестационарной волны давления на сферический пьезокерамический преобразователь с внутренним экраном // Электроника и связь. – 2007. – № 1. – С. 62–69.
63. Коржик О.В. Об особенностях электромеханических преобразований в приемных пьезокерамических преобразователях с разрезными электродами // Электроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии». – 2010. – № 2(55). – С. 224–230.
64. Коржик О.В., Лейко О.Г. Формування характеристик напрямленості одиночного приймального електропружного циліндричного перетворювача з розрізними електродами // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2005. – № 1. – С. 50–55.
65. Коржик О.В., Лейко О.Г. Формирование характеристик направленности антенны, состоящей из двух электроупругих элементов // Электроника и связь. – 2009. – № 1. – С. 45–53.
66. 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.
67. 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.
68. Коржик А.В. Применение метода «сквозной задачи» к исследованию амплитудно-частотных зависимостей характеристик акустического поля приемного цилиндрического пьезокерамического преобразователя с разрезными электродами // Электроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии». – 2010. – № 3(56). – С. 160–166.
69. Коржик О.В. Применение метода «сквозной задачи» к исследованию амплитудно-частотных зависимостей характеристик механического поля приемного цилиндрического пьезокерамического преобразователя с разрезными электродами // Электроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии». – 2010. – № 4(57). – С. 155–159.
70. Коржик О.В. Амплитудные и фазовые частотные характеристики электрических напряжений на нагрузках электродов пьезокерамических цилиндрических приемников звука при различных видах электродирования в условиях связанности // Электроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии». – 2010. – № 5(58). – С. 192–196.