

М 497496

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена
Трудового Красного Знамени государственный технический университет
им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ТОМАШЕВИЧ Владимир Игоревич

УДК 620.179.16

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ТЕОРИИ И СОЗДАНИЕ
ОСТРОНАПРАВЛЕННЫХ ЭКВИДАСТАНТНЫХ РЕШЕТОК
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Специальность 05.02.11 - Методы контроля
и диагностики в машиностроении

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор АЛЕШИН Н.П.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
ИВАНОВ В.И.
кандидат физико-математических
наук БАДАЛЯН В.Г.

Ведущее предприятие - НПО "Спектр"

Защита диссертации состоится "23" января 1991 г. на заседании специализированного совета К053.15.01 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Ваш отзыв в 1-м экземпляре, заверенный печатью, просим

библиотеке МГТУ.
лжны заблаговременно
организаций на имя

5 апр 1990 г.

Рябов В.Т.

М 497496

ка. Подп.к печати 10.12.90
Москва, 2-я Бауманская, 5

Актуальность проблемы. В связи с неуклонным ростом применения современных материалов со специальными свойствами ужесточаются требования к критическим размерам допустимых внутренних дефектов в изделиях и их элементах. Например, критический размер объемных дефектов в керамических турбинах ракетных двигателей составляет сотые доли миллиметра, т.е. имеет порядок величины зерна. С другой стороны, в некоторых случаях требуется иметь сведения о размерах внутренних полостей в неразъемных соединениях с очень высокой точностью. Например, определение размеров конструктивного непровара в виброкатках. Применение традиционных для дефектоскопии методов и оборудования в этих и многих других подобных случаях не удовлетворяет требованиям производства. Нужны системы неразрушающего контроля с качественно иными характеристиками. К таким системам, в первую очередь, следует отнести томографические и голографические средства.

В связи с вышеизложенным, в МГТУ им. Н.Э.Баумана разрабатывается ультразвуковой (УЗ) томограф для дефектоскопии промышленных изделий, одним из основных узлов которого является УЗ преобразователь. Предпочтительным способом обеспечения достаточно высокой производительности контроля при соблюдении требуемых чувствительности и разрешающей способности является применение акустической системы в виде решетки УЗ преобразователей (РУП) с линейно-секторным сканированием.

Системы секторного сканирования РУП с качающимся лучом, широко применяются в УЗ медицинской томографии и могут быть использованы для УЗ дефектоскопии. Однако, известные РУП не обеспечивают нужной диаграммы направленности (ДН) излучения/приема, поскольку имеют недопустимо высокий ($-10...-13$ дБ) уровень боковых лепестков, что и обусловило необходимость разработки РУП с небольшим уровнем боковых лепестков (не более -20 дБ), при небольшой ($1^0...3^0$) ширине главного лепестка ДН. Поскольку создать преобразователь с нужной характеристикой направленности из эвристических соображений невозможно, потребовалось разработать относительно простые методики расчета РУП с игольчатой ДН.

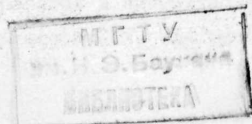
Цель работы и основные задачи исследования. Цель работы состоит в разработке РУП, пригодной для использования в дефектоскопии с применением голографических методов визуализации звуковых полей и допускающей применение существующих приборных ре-

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1497496

Томашевич В.И. Разработка



шений для осуществления электрического сканирования звукового луча. Для достижения поставленной цели необходимо было выполнить следующие исследования:

1. Провести теоретический анализ возможности применения теории радио- и гидролокационных антенн к УЗ дефектоскопии, выявить границы их применимости.

2. На основе математических методов расчета радиолокационных и гидроакустических антенн разработать эффективные методы расчета остронаправленных РУП для дефектоскопической УЗ томографии.

3. Выполнить теоретический анализ границ применимости использованных расчетных методик.

4. Произвести макетирование РУП и выполнить экспериментальную проверку теоретических результатов.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Доказано необходимое и достаточное условие разделяемости ДН излучателя плоского раскрыва. Для обеспечения максимальной эффективности излучения плоской равношаговой косоугольной решетки, сетка решетки не должна содержать углов острее 60° .

2. Разработаны инженерные методики, численные алгоритмы и их программная реализация для синтеза эквидистантных линейной и плоских решеток с чебышевской ДН с минимально возможным уровнем реактивности. Рассмотренные случаи охватывают все важные для практики способы размещения излучателей по апертуре.

3. Получено решение для синтеза многокольцевой РУП с ДН сколь угодно близкой к чебышевской и точностью реализации, не связанной с уровнем реактивности ДН.

Практическая ценность. Разработаны инженерные методики расчета амплитудно-фазового распределения возбуждения синфазных РУП, обеспечивающие получение решеток с оптимальными характеристиками направленности. Создан пакет программ, реализующий расчетные методики. Пакет позволяет рассчитывать амплитудное распределение возбуждения элементов РУП, требуемое для получения оптимальной характеристики направленности по уровню боковых лепестков и числу элементов решетки. Дополнительно вычисляется ширина главного лепестка по требуемому уровню, а также строятся соответствующие ДН. Для этого требуется дополнительно задавать длину волны в рабочей среде и расстояние между фазовыми центрами элементов решетки. Все расчеты выполняются для межэлементного расстояния не менее половины длины волны в рабочей среде.

Разработана технология изготовления РУП с оптимальными направленными свойствами.

К защите представляются:

1. Границы применимости метода синтеза плоских решеток по главным сечениям.

2. Методика синтеза чебышевских косоугольных плоских решеток ультразвуковых преобразователей с разделяющейся диаграммой направленности, путем матричного перемножения двух линейных решеток.

3. Критерий наибольшей эффективности излучения косоугольных плоских эквидистантных решеток с межэлементным расстоянием не менее половины длины волны.

4. Приближенный метод синтеза многокольцевых решеток с чебышевской характеристикой направленности и регулируемой точностью приближения, путем разложения парциальных диаграмм направленности в ряд по полиномам Чебышева.

Апробация. Основные результаты работы доложены на Всесоюзной научно-технической конференции "Методы и средства повышения информативности и достоверности результатов ультразвуковой дефектоскопии сварных металлоконструкций", Ленинград, 1989 г. и на Научно-техническом семинаре отдела неразрушающих методов контроля НИИ конструкционных материалов и технологических процессов.

Публикации. По материалам диссертации опубликована 1 печатная работа.

Методы исследования. Решение расчетных задач, а также теоретические исследования осуществлялись методами теории целых аналитических функций и теории приближения функций, в рамках жидкостной модели акустической среды в приближении Кирхгофа. Применялись численные методы и расчеты на ЭВМ. Экспериментальные исследования проводились на серийно выпускаемой отечественной аппаратуре с использованием лабораторных приспособлений.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 80 страницах машинописного текста, иллюстрируется 25 рисунками, содержит 2 таблицы, состоит из введения, трех глав, выводов по работе, списка литературы из 112 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава. Теория и практика дискретных излучающих систем является глубоко разработанным научным направлением, основу которого составляет техника радиолокационных антенн СВЧ. В качестве основы для дальнейших разработок в диссертации принята теория радиолокационных антенных решеток СВЧ, как наиболее разрабо-

танная и базовая для смежных областей (гидролокации и медицинской УЗ томографии). Сравнительным анализом возможных принципов формирования направленных свойств излучающей системы и электрического качания луча показано, что наиболее рациональным является выбор акустической системы для томографа в виде интерференционной равношаговой (эквидистантной) решетки с фазовым электрическим сканированием. В работе принят традиционный для радиолокации подход, при котором вся антенная система разбивается на три структурных блока: согласующее устройство, распределитель и излучающая система. Данный подход дает возможность применить в разработке РУП математический аппарат теории синтеза антенн.

Этот аппарат основан на том, что в приближении Кирхгофа распределение поля возбуждения (апертурная функция) по излучающей поверхности (раскрытию или апертуре) связано с волновым полем в дальней зоне излучения (функции направленности) преобразованием Фурье. Поскольку преобразование двустороннее, должно существовать обратное преобразование, дающее решение задаче синтеза. В общем виде решение задачи синтеза, т.е. определение апертурной функции по функции направленности, относится к некорректным задачам математической физики и сводится к решению системы интегральных уравнений Фредгольма I рода. Для регуляризации задачи достаточно, чтобы ДН описывалась целой аналитической функцией экспоненциального типа, в противном случае, ДН практически не реализуема, либо большое значение реактивной компоненты ДН делает излучающую систему крайне неэффективной (и в конечном счете опять не реализуемой). Реактивной компонентой ДН в радиолокации называют часть ДН, соответствующую комплексным значениям полярного угла сферической системы координат.

При синтезе антенных решеток вместо интегрального оператора, функция направленности имеет представление в виде конечно-го экспоненциального многочлена, следовательно реализованы могут быть только ДН, представимые в виде полинома. Если это условие не выполняется, приходится искать приближенное решение либо в чебышевской, либо в среднеквадратичной метрике. Чебышевская метрика соответствует приближению амплитудных ДН, а среднеквадратическая — энергетических ДН. Чебышевская метрика обеспечивает лучшее приближение.

Простейшим случаем решетки является случай эквидистантной линейной решетки с равноамплитудным синфазным возбуждением. Ее ДН описывается функцией

$$f(x) = V \sum_{v=1}^M e^{i v x d} \quad (1)$$

откуда видно, что ДН и ее аналитическое продолжение является функцией периодической, с периодом $2\pi/d$; ($d = \lambda/2$). Здесь d - расстояние между излучателями. M - количество излучателей в решетке. В случае $d < \lambda/2$, период больше зоны видимости и ДН реактивна, если $d \geq \lambda/2$, то реактивная компонента отсутствует, поскольку период ДН не превышает размера зоны видимости. Из условия отсутствия побочных главных лепестков, общее условие ограничения шага решетки имеет вид:

$$\lambda/2 \leq d \leq \lambda(M-1)/M \quad (2)$$

РУП равноамплитудного возбуждения имеет такую же ширину главного лепестка как непрерывный излучатель тех же размеров, но недопустимо высокий уровень боковых лепестков (-13,2 дБ).

Если применить амплитудное распределение возбуждения, спадающее к краям раскрыва, то уровень боковых лепестков уменьшается, а главный лепесток расширяется, если же апертурная функция возрастает к краям раскрыва, то уровень боковых лепестков растет, а главный лепесток сужается. Однако изменение ширины главного лепестка в обоих случаях незначительно.

Распределение возбуждения реальных решеток всегда имеет как амплитудные погрешности, так и фазовые. Различают систематические и случайные фазовые погрешности. Распределение систематических фазовых ошибок можно аппроксимировать гладкой функцией и представить ее в виде степенного ряда:

$$\Phi(\zeta) = \Phi_1 \cdot \left(\frac{2\zeta}{(M-1)d} \right) + \Phi_2 \cdot \left(\frac{2\zeta}{(M-1)d} \right)^2 + \Phi_3 \cdot \left(\frac{2\zeta}{(M-1)d} \right)^3 + \dots \quad (3)$$

Константы Φ_i представляют собой максимальные значения фазовой ошибки степени i на краю раскрыва при $\zeta = (M-1)d/2$.

Если распределение возбуждения имеет линейную фазовую ошибку Φ_1 , то луч отклоняется в сторону запаздывания фазы, таким образом сканирование можно осуществлять изменением линейного фазового распределения возбуждения по апертуре. Чем сильнее перепад фаз между краями раскрыва, тем сильнее отклоняется луч. При отклонении главный лепесток расширяется по закону $\cos \theta_0$, где θ_0 - угол отклонения луча от нормали.

Фазовое распределение квадратичного типа не вызывает отклонения главного лепестка, однако приводит к его расширению и воз-

растанию минимумов ДН, а также к увеличению боковых лепестков. Наиболее сильно квадратичные фазовые искажения сказываются при равномерном амплитудном распределении возбуждения. При спадающем амплитудном распределении наиболее сильно расфазированные) крайние элементы РУП дают меньший вклад в общее излучаемое поле и искажение ДН получается меньше.

Кубичные фазовые погрешности возбуждения приводит к отклонению главного лепестка ДН в сторону края решетки с фазовым запаздыванием, причем отклонение в $I,7$ раза меньше, чем в случае линейной фазовой ошибки, при условии равенства фазовых ошибок на краях раскрыва. Искажение ДН заключается также в том, что главный лепесток расширяется и становится несимметричным; боковые лепестки по одну сторону главного лепестка увеличиваются, а по другую уменьшаются, причем возрастание наблюдается с той стороны, в которую отклоняется главный лепесток. В случае спадающего амплитудного распределения искажение ДН уменьшается.

Случайными фазовыми погрешностями возбуждения называют ошибки распределения, которые не могут быть описаны рассмотренными случаями, потому что не носят систематического характера. Это значит, что фазовая ошибка возбуждения каждого элемента решетки является случайной величиной. Случайные ошибки приводят к исчезновению нулей излучений и росту боковых лепестков. При небольшом числе элементов решетки искажение формы и уровня каждого бокового лепестка может изменяться в значительных пределах.

Импульсность режима излучения вызывает также искажения ДН как и наличие квадратичной фазовой погрешности при стационарном режиме.

В результате анализа литературных данных, а также учета конкретных условий работы разрабатываемой акустической системы, для решения задачи синтеза была сформулирована следующая расчетная модель: 1) рабочая среда – однородный и изотропный упругий континуум без сдвиговой жесткости; 2) излучение стационарно; 3) дисперсия и поглощение среды не учитывается; 4) задача решается в приближении Кирхгофа. В рамках принятой модели правомерно использование всех результатов радиолокации, относящихся к синтезу антенн. Об адекватности модели можно судить по соответствию результатов расчетов, выполненных в ее рамках, с их экспериментальной проверкой. Забегая вперед отметим, что результаты расчетов и экспериментов совпали практически с точностью измерения приборов.

Вторая глава. Удачный выбор функции, описывающей синтезируе-

мую ДН, позволяет серьезно упростить решение многих задач синтеза антенн. Задача выбора становится очевидной только в одном случае, когда нужно синтезировать остронаправленную эквидистантную линейную решетку. Дело все в том, что реализуемая ДН эквидистантной решетки может описываться только полиномом. Очевидно, что самой остронаправленной из всех ДН является δ -функция Дирака, однако она нереализуема, т.к. относится к классу обобщенных функций. Значит среди всех полиномов нужно выбрать такой, который больше всего похож на δ -функцию. Этот полином должен на каком-то отрезке принимать значения по абсолютной величине меньше, чем значения на этом отрезке любого другого полинома, а за его пределами большие. Такими свойствами обладают полиномы Чебышева.

Задача синтеза линейной решетки с чебышевской ДН была впервые решена Дольфом для радиолокационных решеток. В диссертации приведено несколько более общее решение той же задачи. При помощи формальной замены переменных можно представить ДН решетки в виде линейной комбинации полиномов Чебышева. Задача синтеза, таким образом, сводится к решению уравнения (4) относительно неизвестных коэффициентов, имеющих смысл амплитуд возбуждения элементов решетки:

$$(1-\gamma)a_0 + 2 \sum_{v=1}^L a_v T_{2v-\gamma}(\eta) = T_{M-1}(Z\eta). \quad (4)$$

Параметр Z определяется уровнем боковых лепестков B из условия

$$T_{M-1}(Z) = B; \quad (5)$$

или, что то же самое

$$Z = \operatorname{ch}[\operatorname{arch} B / (M-1)] \quad (6)$$

Уровень боковых лепестков нужно брать в десятичной шкале. Уравнение (4) легко решается методом неопределенных коэффициентов вручную, либо методом Гаусса на ЭВМ.

Линейная решетка формирует нужные направленные свойства только в одном сечении ДН, в остальных сечениях ДН имеет вид совершенно отличный от нужного. Чтобы ДН была оптимальной и в других сечениях, возникает необходимость разработки решеток плоского раскрыва. Во избежание сильного искажения ДН при сканировании в двух направлениях, желательно, чтобы ДН была разделяющейся. В этом случае при правильной организации управления сканированием, погрешности возбуждения по строкам и столбцам мозаичной решетки можно считать независимыми. Ранее, Е.В.Баклановым была математически строго доказана достаточность прямоугольной формы раскрыва для разделяемости ДН, если апертурная функция

разделяема. Однако в литературных источниках упоминаются и другие формы раскрывов с разделяющейся ДН. Чтобы окончательно прояснить данный вопрос пришлось провести дополнительные исследования. Поскольку ДН есть преобразование Фурье апертурной функции, при помощи теоремы Планшереля-Поля методами теории целых функций было математически строго доказано необходимое и достаточное условие разделяемости ДН для плоского раскрыва:

- для того, чтобы в случае разделяющейся апертурной функции плоский раскрыв имел разделяющуюся функцию направленности, необходимо и достаточно, чтобы раскрыв имел форму параллелограмма.

Выполнение этого условия гарантирует возможность решения задачи синтеза косоугольной решетки по двум главным сечениям перемножением решений для линейных решеток, соответствующих данным сечениям пространственной ДН. Правда, задачу приходится решать в аффинных контравариантных координатах при помощи замены переменных:

$$y_1 = x_1^0 + x_2^0 \cos \psi; \quad y_2 = x_1^0 \sin \psi + x_2^0; \quad (7)$$

где ξ_1^0, ξ_2^0 - контравариантные координаты точки интегрирования в раскрыве, а x_1^0, x_2^0 - контравариантные координаты вектора пространственных частот. Реперы аффинной системы координат совпадают с краями раскрыва.

В случае, например, круглого раскрыва точное решение методом главных сечений невозможно. Это следует непосредственно из доказанного условия.

Юлагодаря приведенному выше условию, синтез косоугольной решетки с ДН, оптимальной в двух главных сечениях, сводится к синтезу двух линейных решеток. Вычисления проводятся по тем же формулам, а амплитуды возбуждения элементов плоской РУП можно определить, если перемножить амплитуды возбуждения линейных решеток как матрицу-столбец на матрицу-строку. Выражение для ДН будет иметь вид:

$$F(\xi, \eta) = T_{N_1-1}(Z_1 \xi) \cdot T_{N_2-1}(Z_2 \eta); \quad (8)$$

а амплитуды возбуждений вычисляются как

$$a_{ij} = a_i \cdot a_j$$

Значения Z_1 и Z_2 выбираются из условия

$$T_{N_1-1}(Z_1) \cdot T_{N_2-1}(Z_2) = B \quad (9)$$

Данное решение обеспечивает оптимальность ДН в направлениях ξ и η , на форму ДН в остальных сечениях никаких ограниче-

ний не налагается и они могут существенно отличаться от главных, поэтому была решена задача синтеза косоугольных решеток с ДН, оптимальной в любом сечении. Амплитуды возбуждения элементов в этом случае определяются из системы уравнений

$$Q_{nm}^{ij} a_{ij} = Q_{ij}^{N-1} Z^{(2i-r)}; \quad (10)$$

если решить ее относительно матрицы коэффициентов a_{ij} . Здесь a_{ij} - амплитуды возбуждения элементов РУП с индексами i, j ; Q_{nm}^{ij} - матрица коэффициентов полиномов Чебышева, где i, j - соответствует порядку полинома, а n, m - степени аргумента полинома; Q_{ij}^{N-1} - диагональная матрица коэффициентов полиномов Чебышева; $Z^{(2i-r)}$ - Z в степени $(2i-r)$. Z вычисляется из условия

$$T_{N-1}(Z) = B.$$

Однако решение возможно только в том случае, когда раскрыв - ромб или квадрат. Если раскрыв квадратный, то горизонтальное сечение ДН по уровню боковых лепестков описывается формулой

$$\theta' = [\lambda \sqrt{2} / (\pi d)] \sqrt{1 - (1/Z)}; \quad (11)$$

т.е. осесимметрично; если раскрыв ромбический, то формулой

$$\theta'_r = \theta' / \sqrt{\sin 2\varphi \sin \psi}; \quad (12)$$

где ψ - угол раскрыва, а φ - азимутальный угол. В этом случае главный лепесток имеет эллиптическое сечение, но остается оптимальным в любом вертикальном сечении.

Расстояния между элементами РУП выбирают из условия для плоской равношаговой решетки:

$$\frac{\lambda}{2\sqrt{2(1-\cos\psi)}} \leq d \leq \frac{(N-1)\lambda}{N\sqrt{2(1+\cos\psi)}} \quad (13)$$

здесь N - число элементов РУП в данном главном сечении. Из этого условия следует, что косоугольная РУП не может содержать углов острее 60° .

В связи с большой сложностью изготовления мозаичных РУП была решена задача синтеза решетки из колец с чебышевской ДН с управляемой точностью реализации. До сих пор считалось, что повышение точности приближения к нереализуемой ДН всегда сопровож-

дается ростом реактивной компоненты излучения. Получено решение, в котором точность реализации чебышевской ДН решеткой кольцевых излучателей не связана с уровнем реактивности решетки. Данная задача сводится к решению уравнения

$$\sum_{v=\gamma}^M a_v \sum_{k=0}^N b_k T_{2k}(u) = T_{L-1}(Zu); \quad (14)$$

где $b_k = \epsilon_k (-1)^k J_k^2(r_v/2)$, а $\epsilon_k = 1$, при $k=0$ и $\epsilon_k = 2$ при $k \neq 0$; $J_k(z)$ — функция Бесселя. Межеlementное расстояние определяется также, как в линейной решетке.

Разработан алгоритм численного решения всех описанных задач и реализован на языке Бейсик на персональном компьютере типа IBM PC.

Третья глава посвящена макетированию линейной РУП и экспериментальной проверке результатов расчетов. Описанная методика расчета дает лишь приближенные значения конструктивных параметров РУП уже в силу того, что основана на следующих допущениях:

1. Все излучающие элементы решетки абсолютно идентичны.
2. Акустическое и электромагнитное взаимодействие элементов исключается, т.е. все элементы акустически и электрически развязаны.
3. Излучатели точечные и изотропные.

Кроме того, возбуждение элементов РУП предполагалось идеальным, необходимость электроакустического согласования не учитывалась. Естественно, чтобы получить соответствие между расчетом и экспериментом нужно либо рассчитать всю РУП с учетом всех взаимных влияний ее элементов, искажений сигналов в электрическом тракте, разнообразных потерь мощности и т.п., т.е. решить не только внешнюю, но и внутреннюю задачу синтеза. Либо, выбирая конструкцию РУП, максимально учесть расчетные гипотезы и, в какой-то мере приблизить ее к расчетной схеме за счет особенностей конструктивного решения. В радиолокации более перспективным считается математическое моделирование всей антенной системы целиком, хотя подобная постановка задачи резко усложняет математические методы исследования и приводит к необходимости производить огромный объем вычислений на самых мощных ЭВМ. В результате этого подхода отпадает необходимость разделения задачи на внутреннюю и внешнюю, потому что решается сразу связанная задача. Однако для УЗ дефектоскопии подобные методы разработки преобразователей не реализуемы из-за отсутствия необходимых математических

моделей и недостаточной информации о механизмах взаимодействия волн с пьезопластинами.

Учитывая вышесказанное, был принят единственно возможный путь максимального приближения конструкции РУП к расчетной схеме, и если он не позволяет сразу сделать промышленно воспроизводимую, гарантированно стабильную и высокочувствительную РУП, то, по крайней мере, позволяет проверить правильность расчетов и отработать технологию изготовления РУП.

Решетка собиралась из заранее нарезанных и подобранных пьезоэлементов. Для уменьшения их взаимного влияния за счет паразитных колебаний необходимо вводить акустические развязки. Наилучшим способом развязки элементов РУП является размещение каждого из них на отдельном возвышении, однако это не технологично, поэтому развязки были изготовлены из слоистых слюдяных пластин, не склеенных между собой. Кроме акустической развязки пьезоэлементов данный способ позволяет с высокой точностью обеспечивать одинаковые расстояния между фазовыми центрами излучателей за счет количества пластинок слюды в каждой прослойке, т.к. слюдяная пластинка имеет толщину 20...30 мкм.

Для проверки расчетов была изготовлена РУП на резонансную частоту 0,7 МГц из семи элементов. Распределитель РУП представлял собой набор емкостей, согласующее устройство при этом отсутствовало. ДН снимались в иммерсионной ванне в секторе 360° с шагом дискретизации 5° по традиционной раздельной схеме. Измерения производились с использованием дефектоскопа УД2-12, осциллографа СИ-81 и измерителя емкости Е8-4.

Сначала была реализована РУП с оптимальной ДН. Экспериментальная ДН приведена на рисунке сплошной линией. Она весьма близка к расчетной (штриховая линия) в рабочем секторе углов 90° . Экспериментальная ДН получена путем соответствующей обработки результатов восьми опытов, при этом в секторе 75° разброс результатов не превышал 1 дБ, т.е. экспериментально измеренной случайной погрешности измерения дефектоскопа. С ростом величины углов измерения разброс результатов увеличивался и достигал 6 дБ на углах $160...180^\circ$, что можно объяснить увеличением относительной погрешности измерения за счет уменьшения более, чем на порядок, значения измеряемой величины.

Несмотря на предельную близость, результаты эксперимента не совпали полностью с расчетом. Чтобы выяснить причину несовпадения были сняты ДН отдельных элементов РУП. ДН всех элемен-

тов имели очень широкий, более 180° , главный лепесток. Боковые лепестки зарегистрированы не были. Формы всех диаграмм очень близки и отличались только интенсивностью, следовательно влияние ДН отдельных излучателей не могло изменить ДН РУП.

Для окончательного прояснения вопроса было создано равномерное распределение амплитуд по элементам РУП. Экспериментальную ДН сравнили с расчетной. Характер несовпадения расчетных и экспериментальных ДН у оптимальной и равноамплитудной РУП оказался одинаковым. Экспериментальная ДН решетки равноамплитудного возбуждения имела форму, соответствующую решетке равноамплитудного синфазного возбуждения с выраженной кубичной фазовой погрешностью и, наложенной на нее небольшой случайной погрешностью. В результате чего был сделан вывод, что в связи с разбросом в свойствах пьезоэлементов излучатели вносят фазовые погрешности возбуждения, даже если обеспечено синфазное возбуждение. Этот факт еще раз подтверждает необходимость проведения дальнейших исследований по решению внутренней задачи синтеза, а также указывает на необходимость повышения требования стабильности свойств пьезокерамики, используемой для изготовления РУП.

Несмотря на невозможность в настоящее время промышленного изготовления разработанных РУП, вполне реально их единичное производство в лабораторных условиях для уникальных аппаратов УЗ дефектоскопии. Поскольку возможно использование для электрического перемещения луча известных систем медицинской томографии, даже в нынешнем виде РУП вполне пригодна для работы по совместной схеме в составе томографа промышленных изделий или в режиме приема для систем акустической голографии. Более того, на базе многокольцевой решетки возможно изготовление гибридного УЗ преобразователя с формой ДН, приближающейся к лазерному лучу (в настоящее время такие работы уже ведутся). Данный преобразователь представляет собой совокупность многокольцевой РУП нормального излучения с оптимальной ДН и акустической линзы специальной формы. Правда, электрическое сканирование ДН в данном случае невозможно, тем не менее преобразователь с истинно "шнуровой" диаграммой может быть весьма полезен для точного контроля формы внутренних конструктивных элементов в неразъемных деталях и для определения размеров очень маленьких внутренних дефектов в ответственных узлах.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Впервые получено решение задачи синтеза многоскольцевой решетки с чебышевской ДН с управляемой точностью, в котором точность приближения не связана с уровнем реактивности излучающей системы. Данное решение позволяет утверждать, что для многоскольцевых решеток возможна реализация чебышевской диаграммы с любой точностью без ухудшения эффективности излучения/приема.

2. На основании требований, предъявляемых к форме ДН остро-направленных РУП и с учетом того, что функция направленности эквидистантной РУП представляет собой полином, можно утверждать, что наиболее лучшей исходной функцией для синтеза является полином Чебышева I рода.

3. Поскольку ДН есть Фурье-преобразование апертурной функции, с помощью теоремы Планшереля-Поля доказано, что в случае разделяемой апертурной функции необходимым и достаточным условием разделяемости ДН является наличие формы раскрыва в виде параллелограмма.

Из условия ограничения шага линейной решетки следует, что равношаговая плоская косоугольная РУП не может иметь углов, острее 60° без нарушения условия максимальной эффективности излучения/приема.

4. Поскольку функция направленности плоской решетки есть полином по двум переменным, то из возможности приведения полилинейной формы к каноническому виду следует, что ромбическая РУП может иметь ДН, оптимальную в любом сечении. Приведено соответствующее решение.

5. Разработаны конструкция и технология изготовления РУП. Результаты макетирования показали, что разработка и изготовление РУП значительно сложнее создания традиционных для дефектоскопии УЗ преобразователей и требует более высокого уровня приборного и технологического оснащения.

6. На основании полученных экспериментальных ДН можно утверждать, что на частоте 0,7 МГц ДН для непрерывного и импульсного режимов излучения практически не различимы.

7. Макетирование РУП нормального излучения и их экспериментальное исследование доказали высокую точность совпадения экспериментальных результатов с расчетными. Для разработки РУП, пригодных для серийного производства и отвечающих требованиям, предъявляемым к акустическим системам для томографии промышлен-

ных изделий и материалов, необходимы серьезные исследования по решению внутренней задачи синтеза.

8. Разработаны инженерные методики, численные алгоритмы и их программная реализация для синтеза эквидистантных линейной и плоских РУП с чебышевской ДН при минимально возможном уровне реактивности. Рассмотренные случаи охватывают практически все важные для практики способы размещения излучателей по апертуре.

9. Разработаны методики синтеза косоугольных РУП с чебышевской ДН как в двух сечениях, так и во всех сечениях, определены границы применимости данных расчетных методик.

Основное содержание диссертации отражено в следующей опубликованной работе:

1. Алешин Н.П., Томашевич В.И. Синтез остронаправленного ультразвукового преобразователя // Методы и средства повышения информативности и достоверности результатов ультразвуковой дефектоскопии сварных металлоконструкций: Тез. докл. всесоюзной научно-технической конференции. - Ленинград, ноябрь 1989. - С. 48-49.

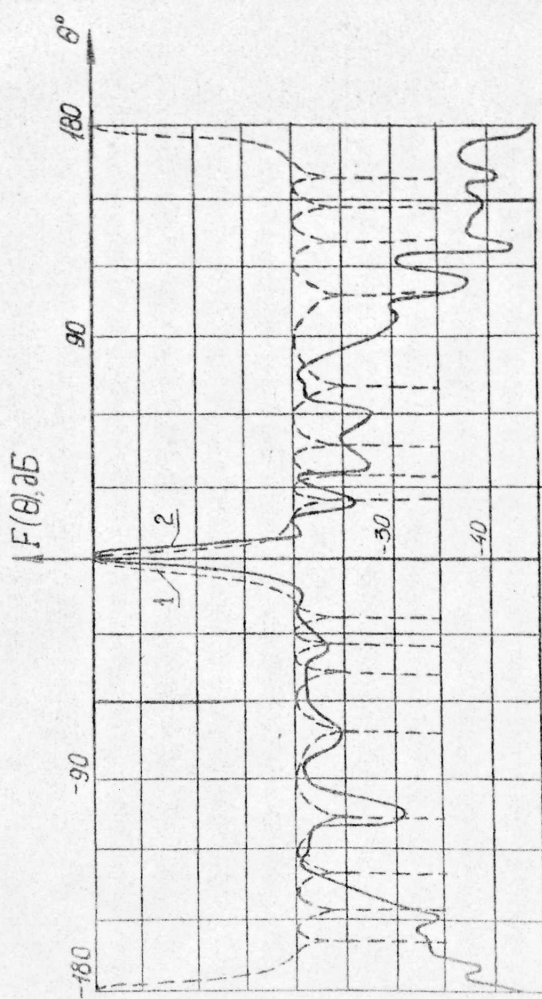


Рис. 1. Расчетная и экспериментальная ДН оптимальной РУП из семи элементов:
1 - расчетная ДН; 2 - экспериментальная ДН