На правах рукописи

Болотина Ирина Олеговна

ПАССИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКУСТИЧЕСКИХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК

Специальность 05.11.13. – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск – 2004

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Евтушенко Геннадий Сергеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Пуговкин Алексей Викторович

доктор технических наук, профессор
Кербель Борис Моисеевич

Ведущая организация: **Институт проблем управления РАН**
г. Москва

Защита диссертации состоится 14 декабря 2004 г. в 15.00 ч. на заседании диссертационного Совета Д 212.269.09 при Томском политехническом университете по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, Библиотека НИИ Интроскопии.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «____» _____ 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета Б.Б. Винокуров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Интенсивное развитие трубопроводного транспорта привело к росту протяжённости магистральных нефтепродуктопроводов. Только в России их общая длина достигла 215 тыс. км. В связи с этим остро встала проблема безаварийной эксплуатации, которая базируется, в основном, на тех или иных методах контроля. Практически, методы неразрушающего контроля магистральных трубопроводов развивались и совершенствовались одновременно с развитием самих трубопроводов.

Одно из первых мест среди разнообразных средств и способов контроля занимает акустический метод. Связано это с целым рядом уникальных характеристик, присущих акустическому излучению. Основными из них являются малая энергетичность, высокая проникающая способность, информативность и степень развития техники приёма и излучения в широком диапазоне частот. Поэтому контроль таких важных и ответственных участков трубопроводов как подводные переходы осуществляется преимущественно акустическими течеискателями.

Существующие в настоящее время приборы в принципе позволяют решить задачу контроля подводных участков трубопроводов. Однако необходимо отметить два существенных недостатка таких приборов. Во-первых, слишком низкая производительность контроля и, во-вторых, недостаточная точность определения местоположения дефектов. Вызвано это, главным образом, использованием одноканальной аппаратуры, акустический тракт которой формируется, как правило, одним пьезопреобразователем, имеющим широкую диаграмму направленности (ДН).

Решение проблемы модификации акустической аппаратуры, направленной на устранение указанных недостатков, делает данную тему, бесспорно, актуальной.

Целью работы является разработка метода и многоканальной системы неразрушающего контроля целостности подводных трубопроводов на основе регистрации сигналов акустической эмиссии, позволяющей определять местоположение дефекта с высокой точностью и обеспечивающей визуализацию акустического поля в реальном масштабе времени.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **задач:**

1. Классификация и сравнительный анализ неразрушающих методов контроля с точки зрения производительности и точности обнаружения утечек в подводных трубопроводах (ПТ) для определения наиболее перспективных путей достижения поставленной цели.
2. Исследование:
   а) возможности применения методов синтезирования акустической апертуры с помощью фазированных антенных решёток (ФАР) для обнаружения утечек на ПТ;

б) зависимости между дефектометрическими характеристиками и синтезированной ДН на основе расчёта структуры акустического поля.
в) возможности использования методов звуковидения для визуализации структуры акустического поля в зоне контроля.

3. Создание инженерной методики проектирования акустического тракта многоканальной аппаратуры контроля утечек ПТ.
4. Разработка аппаратной части и программного обеспечения прибора контроля, имеющего высокую разрешающую способность и обеспечивающего визуализацию сигналов акустической эмиссии (АЭ), соответствующих сквозным дефектам, в реальном масштабе времени.

Методы исследования. Теоретические исследования проводились на основе использования принципа Гюйгенса, интегрального исчисления, теории случайных процессов, преобразований Фурье и численных методов. При расчетах и моделировании применялся пакет программ математического моделирования MathCAD. Экспериментальные исследования выполнялись в лабораторных и натурных условиях.

Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается сравнением математических моделей процессов сканирования и визуализации акустического поля с экспериментальными исследованиями действующей системы контроля.

Научная новизна состоит в том, что:

– предложен способ обработки акустических сигналов двумерной ФАР, заключающийся в перемножении с последующим суммированием сигналов преобразователей каждой антенной решётки, дающий возможность существенно увеличить её разрешающую способность;
– впервые получены аналитические выражения для расчета разрешающей способности двумерной ФАР, состоящей из двух линейных эквидистантных ортогонально ориентированных антенных решёток, содержащих круглые и прямоугольные преобразователи, в зоне дифракции Фраунгофера. С помощью созданной математической модели акустического поля получены графики ДН, посредством которых оценена разрешающая способность двумерной ФАР в зоне дифракции Френеля;
– показано, что вероятностный характер сигналов АЭ, генерируемых сквозным дефектом, снижает точность фиксации его местоположения. Предложен механизм повышения достоверности контроля путём усреднения сплайнами регистрируемых сигналов.

Практическая ценность. В результате проведенных исследований:

– разработан и защищён патентом способ обработки сигналов ФАР, позволяющий существенно увеличить её разрешающую способность;
– предложена неэквидистантная структура ФАР, которая при сохранении высокой разрешающей способности, позволяет в три раза расширить зону контроля по сравнению с эквидистантными ФАР;

– создана методика инженерного расчёта геометрических параметров ФАР;
– разработаны и изготовлены акустический, электронный тракты, создано программное обеспечение прибора пассивной локации ПАЛ-121 с визуализацией сигналов АЭ в реальном масштабе времени.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Предложенный способ обработки сигналов фазированной антенной решётки даёт возможность в два раза повысить её разрешающую способность.
2. Аппаратура для контроля герметичности подводных трубопроводов, реализующая предлагаемый способ обработки сигналов фазированных антенных решёток, позволяет визуализировать источники сигналов акустической эмиссии в реальном масштабе времени.
3. Математическое описание дефектометрических характеристик линейной антенной решётки позволило получить аналитические выражения в зоне дифракции Фраунгофера и графики диаграмм направленности в зоне дифракции Френеля.
4. Предложенный подход к конструированию фазированных антенных решёток обеспечивает заданную зону контроля при сохранении высокой разрешающей способности.

Личный вклад автора. Основные научные исследования, теоретические выводы и рекомендации, макетирование, а также моделирование на ЭВМ получены автором самостоятельно. Постановка задач теоретических исследований и экспериментальные исследования в натурных условиях выполнялись совместно с соавторами, фамилии которых указаны в списке опубликованных работ.

Реализация результатов работы. В результате диссертационной работы разработан пассивный акустический локатор ПАЛ-121, который использован в ОАО «Магистральные нефтепроводы Центральной Сибири» для обнаружения местоположения коррозионного свища водопровода на базе ЛПДС «Орловка»; в МУП «Северский водоканал» для обнаружения коррозионного свища на подводном участке кольцевого водовода г. Северска. Прибор ПАЛ-121 внедрён и используется на кафедре промышленной и медицинской электроники электрофизического факультета Томского политехнического университета (ТПУ) при проведении лабораторных работ «Изучение способов электронного сканирования» по дисциплинам «Электронно-промышленные устройства» и «Применение ультразвука в медицине» для студентов, обучающихся по специальностям 210106, 200401.

Прибор ПАЛ-121 экспонировался:

– на VI, VIII Всероссийских универсальных научно-производственных инновационных выставках - ярмарках «Интеграция», г. Томск, 2001, 2003 гг.;
– на III-ей межрегиональной специализированной выставке – конгрессе «Нефть и газ 2002», г. Томск, 2002 г.;
– на Всероссийской выставке-ярмарке научно-исследовательских работ и инновационной деятельности студентов, аспирантов и молодых учёных выс-

ших учебных заведений Российской Федерации «ИННОВ-2003», г. Новочеркасск, 2003 г.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на:

- IV и V областных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Томск, 1998, 1999;
- V и VI международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Новосибирск, 2000, 2002;
- VI, VII, VIII международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов, молодых ученых «Современные техника и технологии». Томск, 2000-2002;
- Южносибирской Международной научной конференции студентов и молодых учёных «Экология Южной Сибири». Абакан, 2001;
- Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых учёных и специалистов «Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы». Рязань, 2001;
- III межрегиональном семинаре «Автоматизация технологических процессов в нефтегазовом комплексе». Томск, 2002;
- круглом столе «Повышение эксплуатационной надёжности и экологической безопасности трубопроводного транспорта». Томск, 2003;
- 10-м международном симпозиуме ИМЕКО ТК7 «Развитие науки об измерениях». Санкт-Петербург, 2004.

На проведение исследований по проекту «Система визуализации источников сигналов АЭ» получен грант губернатора Томской области в 2002 г. и индивидуальный грант для молодых учёных ТПУ в 2004 г.

Публикации. По результатам выполненных в диссертации исследований опубликовано 13 печатных работ, в том числе получен патент Российской Федерации на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка литературы, включающего 158 наименований, содержит 166 страниц основного машинописного текста, 66 рисунков и 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна полученных результатов, практическая значимость и личный вклад автора. Приведены структура диссертации и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится характеристика ПТ и возникающих на них утечек. *В разделе 1.1* рассмотрена классификация аварийных ситуаций магистральных трубопроводов, причины возникновения аварий, типы дефектов, час-

то возникающих при сооружении и эксплуатации подводных переходов и статистика отказов ПТ.

Из статистических данных следует, что наиболее частыми причинами образования дефектов являются: внешнее механическое воздействие – 35%; брак строительно-монтажных работ, отступление от проектных решений – 24%; коррозионные повреждения труб – 22%; брак изготовления труб – 14%; ошибочные действия персонала и другие причины – 5%.

Решение проблемы обнаружения нарушения герметичности трубопроводов состоит из двух этапов. Во-первых, необходимо установить факт существования дефекта. *В разделе 1.2* подробно рассмотрены различные методы и средства, позволяющие установить наличие дефекта. Показана перспективность применения акустических методов контроля, приведены примеры различных приборов, работающих на его основе.

Однако имеющаяся аппаратура не может решить некоторые выявленные проблемы. В частности, высокая степень локализации источника АЭ методом пассивной локации вступает в противоречие с требованием увеличения производительности контроля. Действительно, согласно критерию Рэлея, разрешающая способность связана с шириной ДН акустической приёмной антенны. Но уменьшение этой характеристики неизбежно приводит к снижению зоны одновременного контроля и, следовательно, требуется большее время для механического сканирования вдоль, а возможно, и поперёк трассы, что затрудняет быстрый и качественный ремонт дефектного участка. Особенно важно это при контроле труднодоступных мест, таких как подводные переходы. Решение проблемы может быть основано на применении ФАР для приёма сигналов АЭ.

Таким образом, второй этап решения данной проблемы состоит в применении аппаратуры, совмещающей достаточно высокую разрешающую способность с высокой производительностью контроля. *В разделе 1.3* для диагностики герметичности подводных переходов проанализирована возможность применения ФАР, дефектометрические характеристики которых обеспечивают высокую точность и оперативность контроля.

Для повышения разрешающей способности ФАР предлагается использовать оригинальный метод обработки сигналов ФАР, заключающийся в сочетании перемножения парциальных сигналов преобразователей и сложения результатов этого перемножения. При таком способе обработки ширина главного лепестка ДН становится меньше, чем при суммировании парциальных сигналов. Для линейной эквидистантной антенной решётки в зоне дифракции Фраунгофера можно записать:

$$A_p(t,F) = \prod_{n=1}^{N} \sin(\omega t + nF); \tag{1}$$

$$A_s(t,F) = \sum_{n=1}^{N} \sin(\omega t + nF); \tag{2}$$

где $A_p(t,F)$, $A_s(t,F)$ – выходные сигналы ФАР при перемножении и суммировании соответственно; N – количество элементов в антенной решётке; ω – частота акустического излучения; t – текущее время; n – текущий номер элемента антенны; F – фаза сигнала.

Был проведён численный компьютерный анализ и построены графики приведённых зависимостей. Отметим, что выражение (2) содержит только линейные операторы относительно частоты акустического излучения ω. Поэтому для его анализа целесообразно определить амплитудный множитель только для первой гармоники частоты.

В результате обработки сигналов антенной решётки в соответствии с выражением (1) будут генерироваться составляющие различных порядков частоты ω. Кроме того, в конечном сигнале непременно будет присутствовать постоянная составляющая, которую будем считать полезной информационной компонентой. Поэтому для выражения (1) вычислялся амплитудный коэффициент ряда Фурье при нулевой гармонике. При этом фазу сигналов, принимаемых элементами антенной решётки, удобно выразить через угол отклонения направления на точку контроля $\gamma 0$.

На рис. 1 представлены графики выходного нормированного сигнала ФАР при сложении (пунктирная кривая) и при перемножении (сплошная кривая) сигналов отдельных преобразователей антенной решётки. Из рис. 1 видно, что разрешающая способность системы, описываемой выражением (1) оказывается выше, чем при способе обработки парциальных сигналов, который описывается выражением (2).

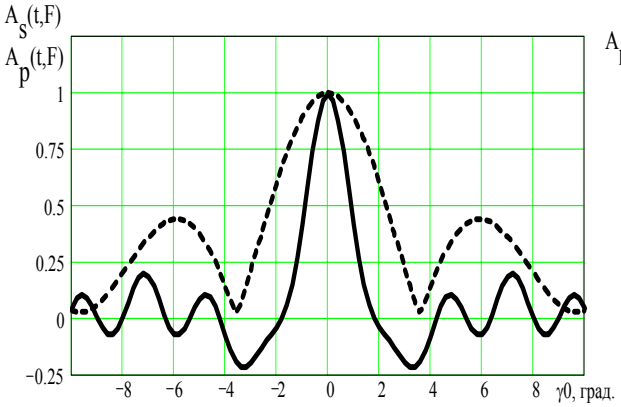

Рис. 1. Выходной нормированный сигнал ФАР
----- при сложении парциальных сигналов;
—— при перемножении парциальных сигналов

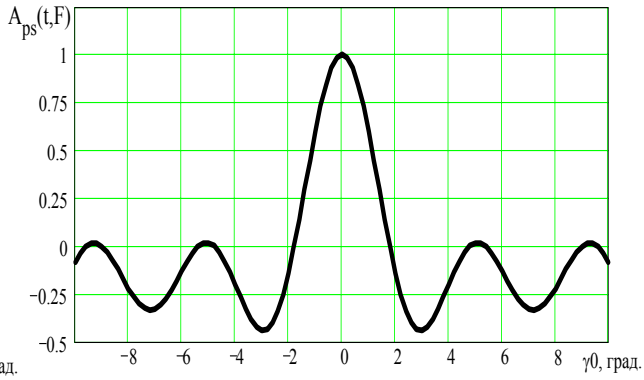

Рис. 2. Выходной нормированный сигнал ФАР при перемножении с последующим суммированием парциальных сигналов

Однако взаимное перемножение принятых сигналов ФАР, содержащей более 6 элементов приводит к существенному снижению главного максимума и возрастанию боковых уровней до значений, когда можно говорить о потере направленности системы. Другим недостатком такой системы является слож-

ность её практической реализации при перемножении большого количества элементов ФАР.

Предложено сочетание попарного перемножения с последующим суммированием полученных результатов, причём суммируются постоянные составляющие произведений. Этот способ обработки сигналов ФАР защищён патентом Российской Федерации на изобретение. Результат такого решения показан на рис. 2, а аналитическое выражение, использованное для моделирования, имеет вид

$$A_{ps}(t,F) = \sin(\omega t + F) \cdot \sum_{n=2}^{N} \sin(\omega t + nF). \qquad (3)$$

Таким образом, оптимальным способом обработки сигналов ФАР представляется сочетание попарного перемножения с последующим алгебраическим суммированием медленно меняющейся компоненты произведения, что приводит к увеличению разрешающей способности по сравнению с традиционным способом обработки сигналов.

Решение проблемы повышения производительности и достоверности контроля требует, прежде всего, увеличение зоны одновременного в реальном масштабе времени исследования при сохранении высокой разрешающей способности. В результате возникает необходимость создания синтезированной акустической апертуры и определения дефектометрических характеристик ФАР в условиях контроля герметичности трубопроводов.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию дефектометрических характеристик линейных антенных решёток. *В разделе 2.1* рассмотрены вопросы синтеза двумерной апертуры с помощью ФАР двух конфигураций: «креста Уэллса» и «коллинеарного креста». На рис. 3 приведёны схемы расположения преобразователей перечисленных ФАР в декартовой системе координат.

Максимальный угол отклонения главного максимума для зоны дифракции Фраунгофера будет равен

– для «коллинеарного креста»

$$\varphi_{\max} = \pm \frac{\lambda}{d \cdot \left(2 \cdot \left|N/2\right| - 1\right)}, \qquad (4)$$

где λ - длина волны; d – расстояние между преобразователями;

– для «креста Уэллса»

$$\varphi_{\max} = \pm \frac{\lambda}{d \cdot (N - 1)}. \qquad (5)$$

Величина, стоящая в знаменателе (4) и (5), представляет собой длину антенной решётки. Она, как правило, значительно больше длины волны. Поэтому угол $\varphi_{\max}$ оказывается небольшим, а величина сектора сканирования часто недостаточной для решения целого ряда задач неразрушающего контроля.

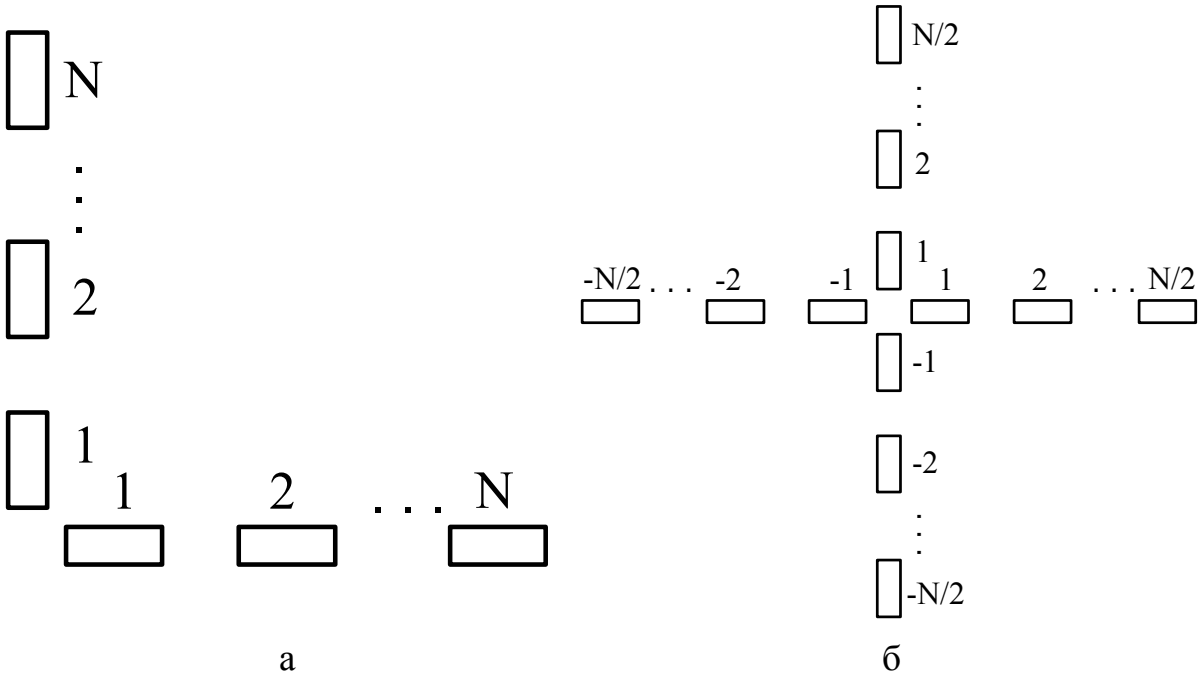

Рис. 3. Схемы расположения преобразователей двумерных эквидистантных антенных решёток
а) «крест Уэллса»; б) «коллинеарный крест»

Решение проблемы увеличения зоны сканирования ФАР возможно путём дополнительного механического сканирования всей конструкции антенны. Другим, более предпочтительным решением, является электронное синтезирование суммарной апертуры акустического поля. При этом конфигурация ФАР становится отличной от эквидистантной. Один из возможных вариантов такой решётки показан на рис. 4.

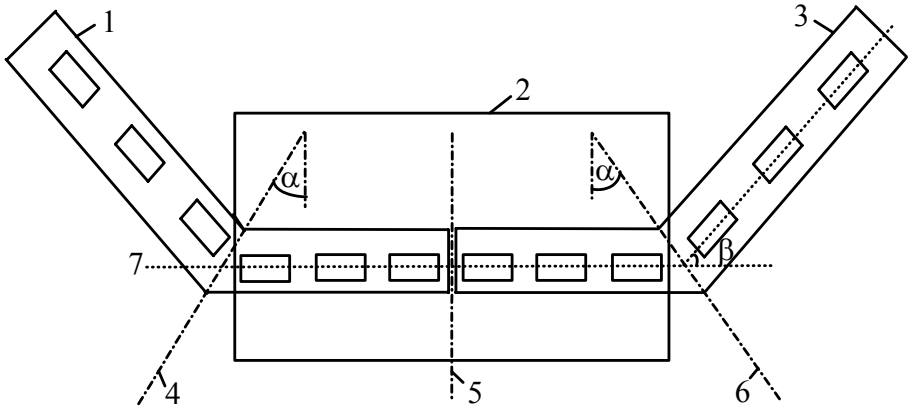

Рис. 4. Структура линейной неэквидистантной антенной решётки

Эта сложная линейная антенная решётка составлена из трёх структур, часть преобразователей которой развёрнута на угол β относительно центральной оси 7. Группа, заключённая в контур 1, представляет антенную решётку, основной лепесток ДН которой образует некоторый угол α с центральной осью 5. Аналогичную группу образуют элементы, входящие в контур 3. ДН этой антенны развёрнута на такой же угол, но повёрнутый в противоположную сторону от оси 5. И, наконец, группа элементов, ограниченная контуром 2, образует антенну, ДН которой совпадает с осью 5.

Процесс синтеза суммарной апертуры предполагает следующий алгоритм функционирования. Первой включается антенна 1 со своим сектором сканирования. При достижении крайней правой границы сектора сканирования включается антенна 2, затем аналогичным образом включается антенна 3. В результате происходит суммирование трёх секторов сканирования, увеличивая синтезированную апертуру в три раза.

В разделе 2.2 проведено подробное исследование разрешающей способности линейных эквидистантных антенных решёток, состоящих из круглых и прямоугольных преобразователей, в зоне дифракции Фраунгофера.

Определение ДН антенны в этой зоне основано на вычислении интеграла Гюйгенса-Рэлея. Аналитическое выражение для звукового давления на поверхности *n*-го преобразователя круглой формы в точке наблюдения имеет вид

$$P_n(\gamma_n) = P_{0n}(\gamma_n)\cdot D_n(\gamma_n) = A_n \cdot \cos\left(\omega t - kL\sqrt{1+tg^2(\gamma_n)}\right)\cdot \frac{2J_1\left(ka\cdot\sin\gamma_n\right)}{ka\cdot\sin\gamma_n}, \quad (6)$$

где $P_{0n}(\gamma_n)$ – давление на оси преобразователя; $D_n(\gamma_n)$ – ДН; A_n – амплитудный размерный коэффициент, зависящий от свойств среды; k – волновое число; L – расстояние от ФАР до точки наблюдения; γ_n – угол между радиус-вектором, соединяющим центр *n*-го приёмника с точкой наблюдения, и нормалью к плоскости *n*-го приёмника; $J_1(ka\cdot\sin\gamma_n)$ – функция Бесселя первого порядка; a – радиус преобразователя.

Выражение взаимосвязи между электрическими и акустическими характеристиками *n*-го пьезопреобразователя имеет вид

$$U_n(\gamma_n) = K\cdot P_n(\gamma_n) = K\cdot P_{0n}(\gamma_n)\cdot D_n(\gamma_n), \quad (7)$$

где U_n – электрическое напряжение на выходе преобразователя; K – передаточная функция, описывающая режим приёма.

В соответствии с предложенным способом обработки сигналов антенной решётки, имеющей конфигурацию «креста Уэллса», выходной сигнал линейной эквидистантной антенной решётки будет равен медленно меняющейся компоненте следующего выражения

$$U_\Sigma(\gamma_n) = \xi\cdot U_1(\gamma_1)\cdot\sum_{n=2}^{N}U_n(\gamma_n) = \xi\cdot K^2\cdot P_{01}(\gamma_1)\cdot D_1(\gamma_1)\cdot\sum_{n=2}^{N}P_{0n}(\gamma_n)\cdot D_n(\gamma_n), \quad (8)$$

где ξ – размерный коэффициент.

В зоне дифракции Фраунгофера можно предположить, что все амплитудные коэффициенты постоянны для данного значения L и равны между собой при любом n, а также что разность хода для двух соседних преобразовате-

лей будет постоянной для любых n. Тогда для предложенного способа обработки сигналов нормированная по максимуму ДН будет иметь вид:

$$D(\gamma_0) = \left[\frac{J_1(ka\sin\gamma_0)}{ka\sin\gamma_0}\right]^2 \times$$

$$\times \frac{1}{N-2}\left[\frac{\sin\left(\frac{kd}{2}tg\gamma_0(N+1)\right)}{\sin\left(\frac{kd}{2}tg\gamma_0\right)}\cdot\cos\left(\frac{Nkd}{2}tg\gamma_0\right) - 1 - 2\cos^2\left(\frac{kd}{2}tg\gamma_0\right)\right], \quad (9)$$

где γ_0- угол между нормалью ФАР и радиус-вектором, соединяющим центр антенной решётки с точкой наблюдения.

На рис. 5 показана ДН «креста Уэллса» в декартовой системе координат, нормированная по максимуму давления на оси антенной решётки, для конкретных параметров акустического тракта. Для сравнения на этом же рисунке пунктиром изображена ДН антенной решётки при традиционном методе обработки парциальных сигналов.

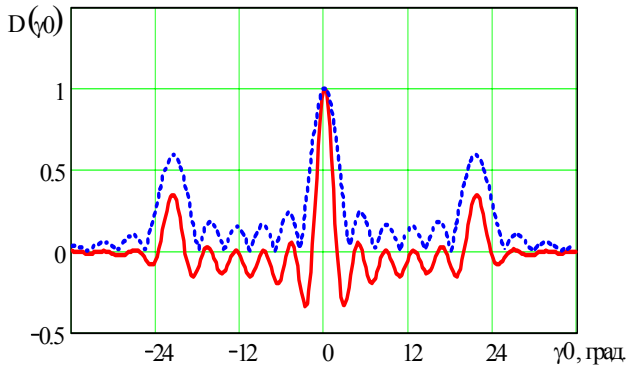

Рис. 5. ДН линейной эквидистантной антенной решётки, состоящей из круглых преобразователей, в зоне дифракции Фраунгофера.
—— предложенный метод обработки сигналов;
----- традиционный метод обработки сигналов

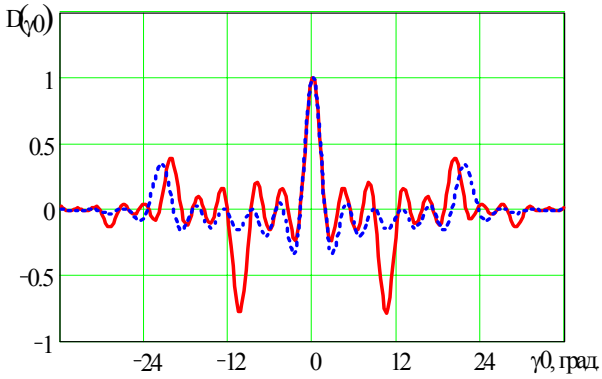

Рис. 6. ДН линейной эквидистантной антенной решётки, состоящей из круглых преобразователей, в зоне дифракции Фраунгофера.
—— «коллинеарный крест»;
----- «крест Уэллса»

В результате сравнительного анализа графиков (рис. 5), можно видеть, что ширина основного лепестка ДН предлагаемой антенной системы примерно вдвое меньше традиционной. В приложении к антенным решёткам определяющим фактором в оценке разрешающей способности служит ширина ДН. Следовательно, согласно критерию Рэлея, разрешающая способность такой системы будет выше в два раза при тех же частотных и геометрических параметрах. Интересно также отметить уменьшение первого бокового лепестка примерно на 25%.

Рассмотрим линейную эквидистантную антенную решётку, соответствующую «коллинеарному кресту» (рис. 3, б). Результирующий сигнал ФАР в данном случае будет равен медленно меняющейся компоненте следующего выражения:

$$U_{\Sigma} = \xi \cdot \sum_{n=1}^{N/2} U_n \cdot U_{-n} . \qquad (10)$$

Тогда ДН будет описываться выражением

$$D(\gamma_0) = \left(\frac{J_1(ka \cdot \sin\gamma_0)}{ka \cdot \sin\gamma_0} \right)^2 \cdot \frac{\sin(Nkd \cdot tg\gamma_0)}{N \cdot \sin(kd \cdot tg\gamma_0)} . \qquad (11)$$

На рис. 6 представлены ДН антенных решёток, соответствующих «коллинеарному кресту» и «кресту Уэллса». Анализ графиков показывает, что у обеих антенных решёток разрешающая способность и уровень первого максимального бокового лепестка практически одинаковы.

Для линейной эквидистантной антенной решётки, состоящей из прямоугольных преобразователей, аналогичным образом были получены выражения для ДН в зоне дифракции Фраунгофера. Для «креста Уэллса» ДН имеет вид:

$$D(\gamma_0) = \left[\frac{\sin(ka\sin\gamma_0)}{ka\sin\gamma_0} \right]^2 \times$$

$$\times \frac{1}{N-2} \left[\frac{\sin\left(\frac{kd}{2} tg\gamma_0 (N+1)\right)}{\sin\left(\frac{kd}{2} tg\gamma_0\right)} \cdot \cos\left(\frac{Nkd}{2} tg\gamma_0\right) - 1 - 2\cos^2\left(\frac{kd}{2} tg\gamma_0\right) \right], \qquad (12)$$

для «коллинеарного креста»:

$$D(\gamma_0) = \left(\frac{\sin(ka \cdot \sin\gamma_0)}{ka \cdot \sin\gamma_0} \right)^2 \cdot \frac{\sin(Nkd \cdot tg\gamma_0)}{N \cdot \sin(kd \cdot tg\gamma_0)} . \qquad (13)$$

Сравнивая выражения (9) и (12), (11) и (13) можно видеть, что они отличаются множителем, характеризующим форму элементарных преобразователей, составляющих антенную решётку. Различие же между ДН антенных решёток, составленных из круглых и прямоугольных преобразователей, весьма незначительно как для «коллинеарного креста», так и для «креста Уэллса». Стоит только отметить несколько больший уровень боковых лепестков для линейной антенной решётки, составленной из круглых преобразователей.

В разделе 2.3 проведено исследование разрешающей способности линейных эквидистантных антенных решёток, состоящих из круглых и прямоугольных преобразователей, в зоне дифракции Френеля.

Парциальный сигнал приёмника с номером n в точке наблюдения, расположенной в ближней зоне, записывается в форме:

$$U_n = \frac{K}{S}\iint_S A \cdot \sin\left(\omega t + k\sqrt{L^2 + x^2 + y^2 + L^2 tg^2\gamma_n - 2x \cdot L \cdot tg\gamma_n}\right)dS \quad , (14)$$

где S – площадь поверхности приёмника; A – амплитуда звукового давления; x, y – декартовые координаты произвольной точки приёмника.

Введём обозначение:

$$\zeta_n(x, y) = L^2 + x^2 + y^2 + L^2 tg^2\gamma_n - 2x \cdot L \cdot tg\gamma_n . \quad (15)$$

Результирующий сигнал линейной эквидистантной антенной решётки будет описываться выражением (8). Обозначим:

$$B_n = \sqrt{\left(\iint_S \cos(k\sqrt{\zeta_n(x, y)})dS\right)^2 + \left(\iint_S \sin(k\sqrt{\zeta_n(x, y)})dS\right)^2} \quad . (16)$$

Тогда сигнал на выходе ФАР можно представить рядом:

$$U_\Sigma = \frac{\xi \cdot K^2 A^2}{2S^2} \cdot B_1 \times$$

$$\times \sum_{n=2}^{N} B_n \cos\left(arctg\frac{\iint_S \sin(k\sqrt{\zeta_1(x, y)})dS}{\iint_S \cos(k\sqrt{\zeta_1(x, y)})dS} - arctg\frac{\iint_S \sin(k\sqrt{\zeta_n(x, y)})dS}{\iint_S \cos(k\sqrt{\zeta_n(x, y)})dS}\right) \quad ,(17)$$

Так как интегралы, входящие в (17), не могут быть выражены в рациональных функциях, то наиболее целесообразным в этом случае следует признать численный метод их вычисления с помощью ЭВМ.

На рис. 7 показан результат расчёта в зоне дифракции Френеля. Из рисунка видно, что кривая несколько смещена вправо. Дальнейшее уменьшение расстояния L приводит к потере направленности и снижению амплитуды сигнала. Это связано, очевидно, с пространственным смещением оси ДН каждой парциальной системы, состоящей из двух преобразователей, сигналы которых перемножаются. Для компенсации указанного смещения может быть использована временная или фазовая задержка акустических сигналов отдельных преобразователей, зависящая от расстояния L.

Рассмотрим теперь систему, соответствующую «коллинеарному кресту» (рис. 3, б). Предлагаемый способ обработки сигналов для такой решётки описывается выражением (10).

В этом случае суммарный сигнал можно представить в виде ряда:

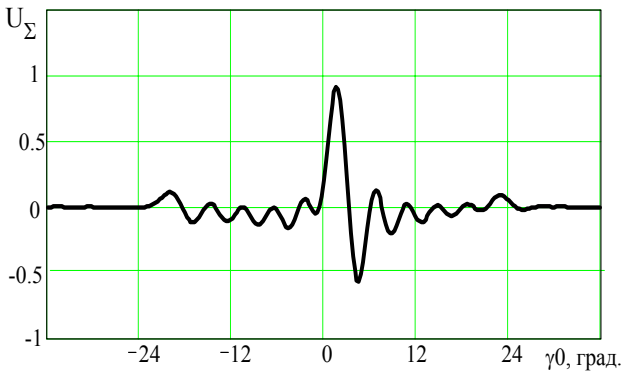

Рис. 7. Выходной нормированный сигнал линейной эквидистантной антенной решётки, соответствующей «кресту Уэллса» и состоящей из круглых преобразователей, в зоне дифракции Френеля.

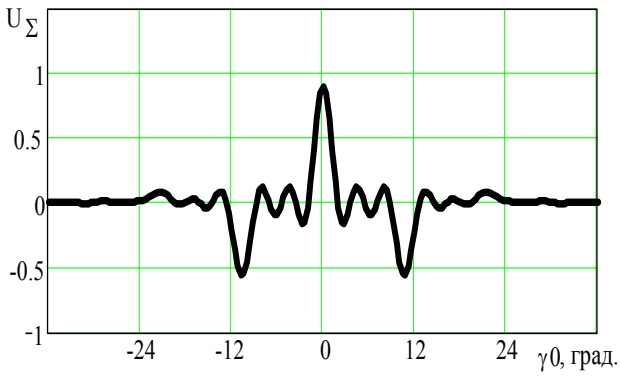

Рис. 8. Выходной нормированный сигнал линейной эквидистантной антенной решётки, соответствующей «коллинеарному кресту» и состоящей из круглых преобразователей, в зоне дифракции Френеля.

$$U_{\Sigma}=\frac{\xi\cdot K^2A^2}{2S^2}\times$$

$$\times\sum_{n=1}^{N/2}B_{-n}B_n\cos\left(arctg\frac{\iint\limits_S\sin(k\sqrt{\zeta_{-n}(x,y)})dS}{\iint\limits_S\cos(k\sqrt{\zeta_{-n}(x,y)})dS}-arctg\frac{\iint\limits_S\sin(k\sqrt{\zeta_{n}(x,y)})dS}{\iint\limits_S\cos(k\sqrt{\zeta_{n}(x,y)})dS}\right),(18)$$

На рис. 8 представлен график выходного сигнала антенной решётки, конфигурация которой соответствует «коллинеарному кресту». Сравнительный анализ графиков на рис. 7 и 8 показывает, что «коллинеарный крест» не теряет направленность при любых расстояниях L.

Для линейной эквидистантной антенной решётки, состоящей из прямоугольных преобразователей, используется разделение переменных интегрирования. В этом случае суммарный сигнал имеет вид:

$$U_{\Sigma}=\frac{\xi\cdot K^2A^2}{2\ell^2}\times$$

$$\times\sum_{n=1}^{N/2}B_{-n}B_n\cos\left(arctg\frac{\int_0^{\ell}\sin(k\sqrt{\zeta_{-n}(x)})dx}{\int_0^{\ell}\cos(k\sqrt{\zeta_{-n}(x)})dx}-arctg\frac{\int_0^{\ell}\sin(k\sqrt{\zeta_{n}(x)})dx}{\int_0^{\ell}\cos(k\sqrt{\zeta_{n}(x)})dx}\right),(19)$$

где ℓ – размер пьезоэлемента вдоль оси x.

Форма выходного сигнала для антенных решёток, составленных из круглых и прямоугольных преобразователей, полностью совпадают как для «креста Уэллса», так и для «коллинеарного креста». Следовательно, выводы, сде-

ланные в разделе 2.2, сохраняют свою справедливость для любой зоны дифракции.

В разделе 2.4 представлены результаты компьютерного моделирования процесса визуализации в режиме *С*-сканирования с представлением информации в «серой» шкале для зоны дифракции Фраунгофера. Алгоритм моделирования процесса визуализации основан на вычислении двумерной нормированной апертуры для каждой точки зоны контроля. На рис. 9 изображена ДН в виде светового пятна, причём яркость его связана прямо пропорциональной зависимостью с величиной огибающей ДН.

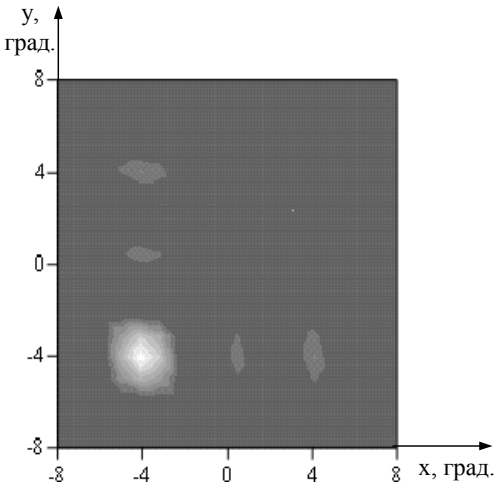

Рис. 9. Модель двумерного изображения акустического поля, полученного с помощью «коллинеарного креста»

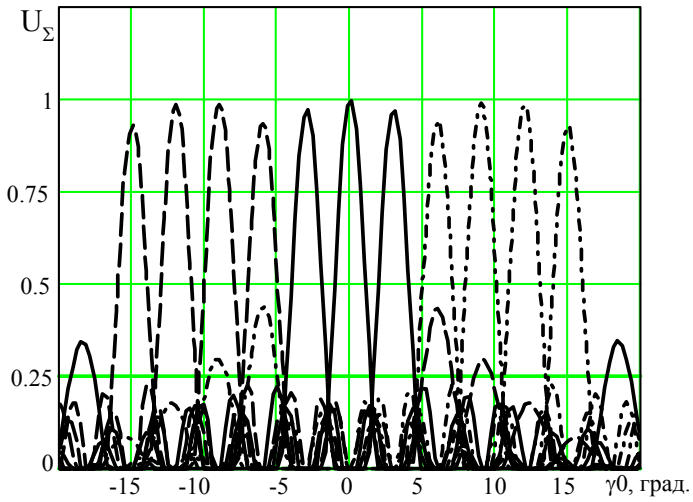

Рис. 10 Вид выходного сигнала линейной неэквидистантной антенной решётки в процессе сканирования

Анализ изображения рис. 9 позволяет оценить величину элемента разложения синтезированной апертуры в визуальном представлении. Это значение с достаточной степенью точности совпадает с величиной ширины ДН по уровню 0,5, что подтверждает правомерность оценки разрешающей способности.

Кроме того, в данном разделе помещены результаты сканирования с помощью неэквидистантной линейной ФАР (рис. 10). Эти результаты представляют собой ряд кривых выходного сигнала при различных углах сканирования в пределах зоны контроля.

Видно, что амплитуда огибающей основного лепестка не остаётся постоянной в процессе сканирования. Выделяются три зоны, соответствующие трем отдельным участкам составной линейной ФАР. Рис. 10 также подтверждает тезис о сохранении высокой разрешающей способности такой системы.

В разделе 2.5 исследовано влияние случайного характера сигналов АЭ на формирование ДН приёмной ФАР. Показано, что случайный характер изменения амплитуды сигнала АЭ приводит только к изменениям амплитудного параметра визуального образа. Случайный характер изменения частоты сигнала АЭ вызывает изменение местоположения и формы визуального образа, причём степень изменения зависит от угла сканирования. На рис. 11 показана

форма и положение десяти реализаций принятого сигнала линейной ФАР. Видно, что меняется не только ширина главного максимума, но также положение визуального образа источника АЭ.

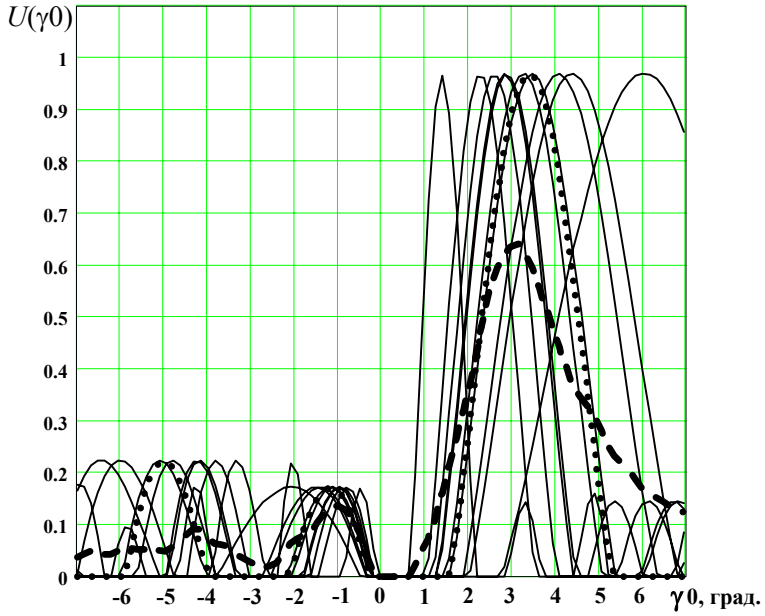

Рис. 11. —— Десять реализаций принятого сигнала линейной ФАР; ----- результат усреднения сплайнами принятого сигнала линейной ФАР; ····· истинное положение источника АЭ

Постоянно меняющееся положение и форма акустического изображения источника АЭ затрудняет работу оператора и снижает точность фиксации местоположения дефекта. Повысить точность определения местоположения источника АЭ можно путём усреднения сплайнами результата контроля. На рис. 11 видно, что максимум кривой усреднения сплайнами указывает местоположение источника АЭ на расстоянии +3,2° от центра антенной решётки, что отличается от истинного положения на 0,2°. С увеличением количества усреднений реализаций принятого сигнала результат будет стремиться к истинному положению источника АЭ.

В третьей главе содержатся сведения о практической реализации и экспериментальных исследованиях аппаратуры визуализации сигналов АЭ. Обычное решение структурного исполнения такого рода аппаратуры предполагает наличие трёх взаимозависимых частей.

1. Акустический тракт.
2. Электронный тракт.
3. Визуальная графическая индикация.

Функциональное назначение, выбор и проектирование акустического тракта рассмотрены *в разделе 3.1*. Здесь приводится методика расчёта частотных, геометрических параметров ФАР и рекомендации по её конструированию.

На основе проведённых исследований создана ФАР в виде «коллинеарного креста», состоящая из двух линеек по 6 прямоугольных преобразователей в каждой, расположенных ортогонально.

В разделе 3.2 проведен выбор, обоснование структурной схемы прибора ПАЛ-121 и описана её работа.

Визуальная графическая индикация предназначена для формирования визуального образа на основе полученной акустической информации. Для этого предложено соединить персональную ЭВМ и аппаратуру акустической локации в единый комплекс. Следует указать, что созданное в настоящее время большое количество методов представления информации в графической форме позволяет применять не только яркостную модуляцию, создающую «теневую» картинку, но также различные формы псевдообъёмных изображений. К другим достоинствам этого метода следует отнести возможность применения целого ряда специфических методов обработки информации. Например, усреднение сплайнами с целью увеличения соотношения сигнал/шум, логарифмирование, антилогарифмирование сигнала, либо использование иной функциональной зависимости. Ещё одно достоинство такого комплекса заключается в возможности архивирования сеансов контроля с целью их последующего анализа.

В разделе 3.3 описаны принципиальные электрические схемы отдельных узлов электронного тракта.

В разделе 3.4 рассмотрены вопросы программного обеспечения аппаратуры пассивной акустической локации. Оно состоит из трёх частей. Первая из них обеспечивает работу многоканального гетеродина. Вторая часть предназначена для управления работой аппаратуры, синхронизации всех её узлов. Она обеспечивает также работу последовательного порта *RS*-232*C*. Программное обеспечение первой и второй части написаны на языке ассемблер.

Третья часть написана на языке высокого уровня *Delphi*. Она осуществляет формирование органов управления на экране дисплея ЭВМ и реализует алгоритм управления работой локатора путём генерации необходимых команд.

Изображение структуры акустического поля на мониторе ЭВМ при работе с программой, осуществляющую связь с управляющим контроллером, ввод, сохранение и визуализацию данных приведен на рис. 12.

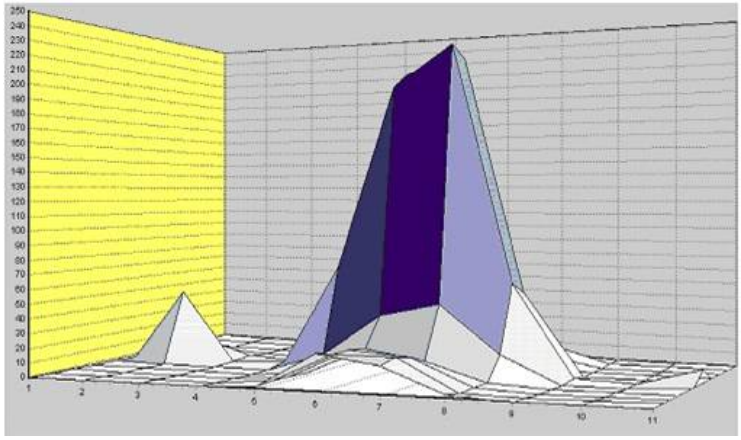

Рис.12. Изображение структуры акустического поля на мониторе ЭВМ

В разделе 3.5 приведены результаты экспериментальных исследований прибора для визуализации источников сигналов АЭ. Экспериментальные исследования имели цель подтверждения ряда дефектометрических параметров разработанной аппаратуры. Были проведены лабораторные и натурные испытания прибора ПАЛ-121, в результате которых достигнута точность регистра-

ции местоположения источников сигналов АЭ 1°…2°. На расстоянии 8 метров от ФАР был обнаружен сквозной дефект диаметром 0,4 мм. При этом точность регистрации его местоположения оказалась не хуже ±14 см.

Проведённые лабораторные и натурные испытания полностью подтвердили достоверность теоретических исследований, выполненных в диссертационной работе.

В заключении сформулированы выводы по диссертационной работе.

В приложении диссертации приведены протоколы лабораторных и натурных испытаний пассивного акустического локатора ПАЛ-121 и акты об использовании результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Рассмотрены различные методы и средства контроля герметичности трубопроводов, выявлены их достоинства и недостатки. Показано, что перспективным направлением в разработке течеискателей является применение акустических ФАР, позволяющих реализовывать высокую точность и оперативность контроля.
2. Предложен способ обработки акустических сигналов ФАР, дающий возможность увеличить в два раза её разрешающую способность. В результате проведения исследования предложенного способа с помощью принципа Гюйгенса получены аналитические выражения в зоне дифракции Фраунгофера и графики ДН в зоне дифракции Френеля для расчёта разрешающей способности антенных решёток двух конфигураций, состоящих из круглых и прямоугольных преобразователей. Разработана модель процесса сканирования и визуализации акустического поля с помощью таких решёток.
3. Для увеличения зоны контроля предложена неэквидистантная структура ФАР. Разработана модель процесса сканирования и визуализации акустического поля с её помощью. Показано, что, имея высокую разрешающую способность, такая конструкция позволяет существенно увеличить зону одновременного исследования.
4. Доказано, что случайный характер сигналов АЭ приводит к изменениям как амплитуды, так положения и формы визуального образа. Это затрудняет работу оператора и снижает точность фиксации местоположения дефекта. Для повышения точности определения положения источника АЭ предложено использовать усреднение сплайнами результатов контроля.
5. Разработана методика инженерного расчёта, позволяющая точно определить геометрические параметры ФАР. Практически реализована двумерная ФАР, имеющая конфигурацию «коллинеарного креста» и состоящая из двух линеек по 6 прямоугольных преобразователей в каждой, расположенных ортогонально.
6. Созданы аппаратная и программная части пассивного акустического локатора ПАЛ-121, имеющего высокую разрешающую способность и обеспечи-

вающего визуализацию источников сигналов АЭ в реальном масштабе времени на мониторе ЭВМ.

7. Выполнены лабораторные и натурные испытания разработанного прибора ПАЛ-121, результаты которых отражены в протоколах испытаний. Проведённые экспериментальные исследования подтвердили достоверность основных теоретических положений работы.
8. Получены акты использования результатов диссертационной работы в ОАО «Магистральные нефтепроводы Центральной Сибири», в МУП «Северский водоканал» и на кафедре промышленной и медицинской электроники электрофизического факультета ТПУ.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Пат. 2163015 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/04, G 01 M 3/00. Способ определения положения источников сигналов акустической эмиссии и устройство для его осуществления / Болотина И.О., Лапшин Б.М., Макаров В.С., Солдатов А.И., Цехановский С.А. – Опубл. 10.02.2001, Бюл. № 4. – 9 с.
2. Болотина И.О., Макаров В.С., Цехановский С.А. Пассивная фазированная антенная решётка в акустико-эмиссионном контроле // Труды IV областной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии». – Томск: Изд. ТПУ, 1998. – С. 103-104.
3. Болотина И.О., Макаров В.С., Углов Д.В. Устройство для контроля герметичности подводных участков нефтепроводов // Труды V областной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии». – Томск: Изд. ТПУ, 1999. – С. 106-108.
4. Bolotina I.O. Antenna array resolving power // Transactions of VI International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists «Modern Techniques and Technology», Tomsk, 2000.– P. 68-70.
5. Болотина И.О., Макаров В.С., Цехановский С.А. Контроль герметичности подводных переходов трубопроводов с использованием фазированной антенной решётки // Труды V международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2000, Новосибирск, 2000. – Т. 6. – С. 78-80.
6. Болотина И.О. Синтез апертуры с помощью фазированных линейных антенных решёток // Труды VII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых «Современные техника и технологии, СТТ’ 2001», Томск, 2001.– Т.1.– С. 226-228.
7. Болотина И.О. Методы контроля герметичности подводных переходов трубопроводов // Труды Южносибирской Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Экология Южной Сибири», Абакан, 2001. – С. 77.
8. Болотина И.О., Цехановский С.А. Устройство для бесконтактного контроля герметичности подводных нефтепроводов // Труды Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых учёных и специалистов «Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы», Рязань, 2001.– С. 27-28.
9. Bolotina I.O., Makarov V.S., Tsekhanovsky S.A. Modeling the proces of the acoustic field scanning and visualization // Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists «Modern Technique and Technologies MTT’2002», Tomsk, 2002. – P. 57-58.

10. Болотина И.О., Цехановский С.А. Система визуализации источников сигналов акустической эмиссии // Межвузовский научный сборник «Электронная техника», Ульяновск, 2002. – С. 94-100.
11. Болотина И.О., Цехановский С.А. Расширение зоны контроля с помощью трёхструктурной неэквидистантной фазированной антенной решётки // Труды VI международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2002, Новосибирск, 2002. – Т. 3. – С. 59-62.
12. Болотина И.О., Евтушенко Г.С., Солдатов А.И., Цехановский С.А. Определение местоположения источников сигналов акустической эмиссии с помощью фазированной антенной решётки // «Известия Томского политехнического университета», Томск, 2003. – №1, Т. 306. – С. 59-63.
13. Bolotina I.O. Phased antenna array resolution enhancement for inspection of underwater crossings of pipelines // Proceedings of the 10th IMEKO TC7 International Symposium on Advances of Measurement Science, Saint-Petersburg, 2004. – Vol. 2. – P. 357-360.