

На правах рукописи



**Кравец Елена Валентиновна**

**АКУСТОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ  
МНОГОЛУЧЕВЫХ ЭХОЛОКАТОРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОДВОДНЫХ  
ПЕРЕХОДОВ ТРУБОПРОВОДОВ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

**Петров Павел Николаевич**

Официальные оппоненты: **Богословский Сергей Владимирович**

доктор технических наук, профессор, заместитель директора  
НПК «Микроэлектроники, микросхемотехники и нанотехнологий»,  
начальник научного комплекса АО «НПП «Радар ммс»

**Калинин Владимир Анатольевич**

кандидат технических наук, начальник отдела ОАО «Авангард»

Ведущая организация: **Акционерное общество «Научно-исследовательский институт  
«Вектор»**

Защита состоится «9» июня 2016 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета ДС212.233.01 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Б.Морская, 67.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета д.т.н., профессор

Шелест Д.К.

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

В настоящее время интенсивное освоение морских нефтегазовых ресурсов требует сооружения разветвленной трубопроводной сети как для транспортировки сырья от месторождения к береговым сооружениям, так и для доставки к потребителям. Являясь наиболее эффективным способом доставки пожаро- и взрывоопасных углеводородов, данный метод требует строго придерживаться целого ряда условий, касающихся соблюдения норм проектирования, строительства и эксплуатации.

Наибольшую опасность при эксплуатации газо- и нефтепроводов представляют пересечения водных преград. Подводными переходами трубопроводов (ППТ) являются как переходы через небольшие реки (с шириной зеркала более 10 м и глубиной более 1,5 м), так и многокилометровые морские переходы. Для надежной эксплуатации трубопроводов необходимо знать не только показатели, связанные с физическим состоянием трубы, но и факторы природного характера. При проектировании и строительстве особое внимание уделяется устойчивости трасс, однако вследствие подвижки грунтов, образования провалов и пустот под действием других факторов происходит оголение (недозаглубление) и провис трубопроводов. При превышении критической длины провисания на переходе могут возникнуть резонансные колебания трубопровода или действующее напряжение начнет превышать расчетное сопротивление материала трубы, что в конечном итоге приведет к развитию аварийной ситуации.

Для контроля технического состояния ППТ производится съемка трассы в целях обнаружения оголенных и провисающих участков трубопроводов. Следует отметить, что при недостаточном заглублении или при провисе под воздействием вибрации в трубопроводе происходит усталость металла, что приводит к «гильотинному» разрыву трубы.

В настоящее время на смену комплексам, состоящим из промерных эхолотов и гидролокаторов бокового обзора, приходят многолучевые приборы,

позволяющие производить трассопоисковые и измерительные работы по контролю состояния ППТ. Для исключения пропусков участков трубопроводов и получения «площадной» съемки донной поверхности многолучевые приборы контроля формируют веер узких диаграмм направленности (ДН) и используют зондирующие импульсы с высокой разрешающей способностью по дальности.

Современные многолучевые эхолоты с линейными решетками приемных элементов обладают разрешением по дальности от 6 до 50 м и шириной луча ДН от 1,5 до 9°. Сформированное таким многолучевым прибором пятно акустического контакта с донной поверхностью, расположенной на глубине 20 м, составит от 520 до 3150 мм. При диаметре трубопровода от 325 до 1420 мм разрешающая способность по углу является недостаточной и может привести к пропуску оголенных и провисающих участков.

Для уменьшения площади акустического контакта необходимо использовать решетки с большим количеством приемных элементов, что позволит увеличить число пространственных каналов, уменьшить ширину луча ДН и обеспечить высокую разрешающую способность по углу. Очевидно, что для построения устройств многолучевого контроля актуальной задачей является разработка элементной базы, позволяющей в режиме реального времени обрабатывать короткие широкополосные сигналы, обладающие высокой разрешающей способностью по дальности, приходящие с большого числа различных угловых направлений. Также необходимо отметить, что при использовании подводных аппаратов и малотоннажных судов актуальными становятся задачи уменьшения энергопотребления и массогабаритных показателей.

Предлагаемые в данной диссертационной работе устройства с масштабными переизлучающими решетками, являющиеся разновидностью акустоэлектронных устройств (АЭУ), позволяют реализовать метод восстановления волнового фронта и служат примером нового подхода к созданию многолучевых эхолотов для контроля технического состояния ППТ.

В отличие от традиционных АЭУ, использующих преобразователи поверхностных акустических волн (ПАВ) с осевым направленным излучением и малой расходимостью волновых пучков, устройства с масштабными переизлучающими решетками являются многополусными, и их работа связана с интерференционными и дифракционными эффектами. Данные устройства позволяют восстановить волновые фронты акустических волн, приходящих от объекта контроля в среде аналогового процессора на ПАВ, и осуществить регистрацию углового направления принимаемого сигнала более простым способом по сравнению с альтернативными и более рационально с точки зрения габаритов, массы, стоимости и энергопотребления. К достоинствам акустических процессоров следует отнести возможность применять их в различных частотных диапазонах акустических волн и обрабатывать сигналы в реальном времени за один проход зондирующего импульса.

В развитие АЭУ внесли существенный научный вклад Ю. В. Гуляев, Г. Д. Мансфельд, Г. К. Ульянов, А. С. Бугаев, А. Олинер, Г. Метьюз, В. С. Орлов, В. И. Речицкий, И. Б. Яковкин и др. Проблемам, связанным с проектированием многоканальных АЭУ, посвящены работы В. Г. Карташева, М. Ю. Дивногорцева, С. П. Семенова, В. С. Кравец и др. Среди зарубежных авторов необходимо отметить работы Р. Е. Брукса, Ф. Хайне, Дж. З. Уилкокса, С. С. Цоя, Л. Т. Нгуена и др.

Однако устройства с масштабными переизлучающими решетками пока не получили широкого распространения, в частности при создании приборов контроля, соответствующего их функциональным возможностям. Это связано с недостаточной исследованностью характеристик данных устройств, фрагментарностью сведений об их функциональных возможностях, конструктивных и технологических особенностях.

Таким образом, исследование таких параметров, как полоса пропускания, предельно возможное число элементов обработки, способность пространственного разрешения в ближней и дальней зонах антенны представляет

интерес как с научной, так и с практической точки зрения и является актуальной задачей.

При построении акустических процессоров частота ПАВ может не совпадать с частотой принимаемых эхосигналов, поэтому возникает необходимость использовать преобразования частоты или временной масштаб сигналов. Это приводит к существенному ограничению полосы пропускания АЭУ, что уменьшает разрешающую способность по дальности, так как не позволяет обрабатывать короткие (широкополосные) импульсы.

Информационная пропускная способность эхолотатора непосредственно зависит не только от его полосы пропускания, но и от волнового размера апертуры, т. е. от числа элементов приемной антенной решетки (АР), следовательно, и от числа элементов переизлучающей решетки АЭУ. Однако при реализации акустического процессора возникает ряд проблем практического характера, препятствующих увеличению числа элементов. Проведенный анализ показал, что число преобразователей, размещенных на современных подложках, колеблется от 15 до 40, что не позволяет использовать многоэлементные АР и обеспечивать высокую разрешающую способность эхолотаторов для формирования панорамного акустического изображения и контроля технического состояния ППТ.

Научные исследования, выполненные в рамках данной диссертационной работы, являются составной частью НИР №01201054049 и НИР №01201157207, а новизна АЭУ подтверждена патентами на полезные модели РФ №127943 и РФ №139809.

В настоящее время ведется работа по данной тематике в рамках гранта РФФИ № 15-07-04720.

**Целью работы** является увеличение информационной пропускной способности многолучевых приборов контроля ППТ на базе АЭУ.

**Объектом исследования** являются ППТ, а **предметом исследования** – эхосигналы, содержащие информацию об их пространственном положении.

Для достижения указанной цели представляется необходимым решить следующие **задачи**:

1. Провести научно-технический анализ современных многолучевых приборов контроля пространственного положения ППТ, основанных на обработке эхолокационных сигналов, принимаемых линейными и дуговыми АР.
2. Исследовать возможности использования в приборах многолучевого эхолокационного контроля АЭУ, реализующих метод восстановления волнового фронта и позволяющих обрабатывать широкополосные эхосигналы с высокой разрешающей способностью по дальности (соответствующей обработке эхосигналов с относительной полосой до 40%, т.е. разрешением по дальности до нескольких миллиметров) и углу не более  $0,5^\circ$ .
3. Разработать методику расчета пространственных характеристик АЭУ, учитывающую использование взаимодействующих малоапертурных решеток преобразователей поверхностных акустических волн, расположенных на анизотропных подложках, влияющих на разрешающую способность многолучевых приборов контроля положения ППТ.
4. Предложить схемотехнические решения увеличения числа элементов переизлучающих решеток АЭУ для многоэлементных АР (с числом элементов более ста) и топологические решения построения широкополосных акустических процессоров, позволяющих обрабатывать короткие широкополосные эхосигналы с высокой разрешающей способностью по углу (не более  $0,5^\circ$ ) и дальности, за счет чего увеличивается информационная пропускная способность многолучевых приборов контроля.
5. Предложить топологическое решение построения АЭУ, обеспечивающее обработку сигналов многолучевых приборов контроля с фиксированной разрешающей способностью в ближней и дальней зонах АР.

**Область исследования** соответствует положениям 1, 2, 3, 4, 6 специальности 05.11.13 - «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий».

**Методы исследования.** Исследования проведены с использованием теории эхолокации, теории антенных решеток, методов обработки пространственно-временных сигналов, теории распространения акустических волн в упругих средах и численных методов расчета на ЭВМ в среде MathCAD.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Исследованы характеристики многолучевых приборов контроля пространственного положения ППТ на базе устройств, реализующих метод восстановления волнового фронта принимаемых АР эхолокационных сигналов за счет применения масштабирующих переизлучающих решеток в АЭУ.
2. Впервые получены аналитические выражения для расчета акустических полей, создаваемых решетками малоапертурных встречно-штыревых преобразователей (ВШП) в анизотропных подложках АЭУ. Предложена методика расчета, учитывающая ряд новых факторов, связанных с применением АЭУ для обработки эхолокационных сигналов, позволяющая определить параметры и характеристики акустических процессоров, влияющие на разрешающую способность многолучевых эхолокационных приборов контроля пространственного положения ППТ.
3. Предложен вариант построения многолучевых приборов акустического контроля на базе АЭУ, который дает возможность за время прохода одного широкополосного зондирующего импульса получать информацию об объекте контроля во всем секторе обзора, как из ближней, так и дальней зоны АР.

**Практическая ценность** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Показаны возможности использования в приборах многолучевого эхолокационного контроля АЭУ, реализующих метод восстановления волнового фронта и обеспечивающих обработку широкополосных эхосигналов с высокой разрешающей способностью по дальности и углу для определения координат оголенных и провисающих участков ППТ.



2. Проведены экспериментальные исследования, способствующие решению проблемы создания принципиально новых многоэлементных акустоэлектронных устройств, позволяющих совершенствовать и создавать новые приборы контроля различного назначения на современной элементной базе.

3. Предложены схемотехнические и топологические решения построения АЭУ с заданными пространственными и частотными характеристиками, которые дают возможность использовать в приборах контроля широкополосные эхолокационные сигналы с высоким разрешением по дальности и многоэлементные АР, обеспечивающие высокую разрешающую способность по углу. Решен ряд конкретных задач увеличения информационной пропускной способности: разработаны два схемотехнических решения группировки элементов АР для многолучевых приборов контроля в подрешетки, кратные числу элементов переизлучающей решетки АЭУ, размещенных на одной подложке (от 15 до 40 в зависимости от материала), обеспечивающие пропорциональное увеличение разрешающей способности по углу. Предложены две топологии широкополосных акустических процессоров, работающих с масштабированием по скорости и частоте, позволяющие обрабатывать короткие широкополосные зондирующие импульсы (с относительной полосой до 40 % в зависимости от параметров АР).

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Многолучевые приборы контроля ППТ на базе АЭУ, реализующих метод восстановления волнового фронта и обеспечивающих пространственную обработку широкополосных эхолокационных сигналов с относительной полосой до 40% (в зависимости от параметров АР и АЭУ) и высокой разрешающей способностью по углу.

2. Результаты анализа и методики расчета, учитывающие специфику работы устройств с переизлучающими решетками, позволяющие рассчитать пространственные и частотные характеристики и оценить варианты схемотехнических и топологических решений, увеличивающих информационную

пропускную способность многолучевых приборов эхолокационного контроля ППТ на базе АЭУ. Результаты экспериментальных исследований разработанных акустических процессоров, подтвердившие полученную методику расчета, учитывающую дифракционные и интерференционные эффекты пересекающихся акустических пучков волн, создаваемых в аналоговых процессорах решетками малоапертурных взаимовлияющих преобразователей, расположенных на анизотропных подложках.

3. Схемотехнические и топологические решения увеличения информационной пропускной способности многолучевых приборов контроля на базе АЭУ за счет увеличения числа элементов (до ста и более) и расширения полосы пропускания до 40 % (в зависимости от параметров АР и АЭУ).

4. Принцип построения многолучевого прибора акустического контроля с кольцевой и круговой АР на базе АЭУ с масштабированием по скорости и дискретной фокусировкой переизлученных волн на считывающие преобразователи, позволяющий в реальном времени и с фиксированной разрешающей способностью обрабатывать эхосигналы, приходящие из ближней и дальней зоны АР.

**Достоверность результатов.** Все защищаемые положения и рекомендации диссертационной работы получены в результате исследований с применением известных физических и математических моделей, а теоретические результаты подтверждаются математическим моделированием и экспериментальными исследованиями.

**Личный вклад автора.** Все приведенные в работе результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии. Во всех работах, которые выполнены в соавторстве, соискатель непосредственно участвовал в постановке задач, в экспериментальных исследованиях, в обработке, обобщении и анализе полученных результатов.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на VIII, XI, XIII– XVIII международных научных

конференциях «Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems» (Санкт-Петербург, 2005, 2008, 2010– 2015 гг.); на научных сессиях ГУАП (Санкт-Петербург, 2010, 2011, 2015 гг.); II Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы технических наук в современных условиях» (Санкт-Петербург, 2015 г.).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 22 работах, 2 из которых – патенты на полезные модели, 2 – отчеты о НИР, 4 – статьи в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК России, 14 – публикации в материалах российских и международных форумов и конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа изложена на 163 страницах текста и состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка использованных источников (91 наименование). Работа включает 68 рисунков и 6 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Структура работы по решаемым задачам представлена в таблице 1.

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования. Приведены научные положения, выносимые на защиту, определена научная новизна и практическая значимость работы.

**В первом разделе**, носящем обзорно–аналитический характер, выявляются задачи стоящие перед аппаратурой контроля ППТ, рассматриваются принципы построения АЭУ, обеспечивающих пространственную обработку сигналов многолучевых эхолокаторов.

Основу устройства обработки составляет многоканальный акустический процессор на ПАВ, осуществляющий в уменьшенном масштабе моделирование внешних акустических полей (рисунок 1).

Таблица 1 – Структура работы по задачам

Задача исследования	Методы исследования	Результат исследования
<p>Провести научно-технический анализ современных многолучевых приборов контроля пространственного положения ППТ, основанных на обработке эхолотационных сигналов, принимаемых линейными и дуговыми АР.</p>	<p>Гидроакустические методы обследования морского дна и ППТ</p>	<p>Получены выводы о недостаточной разрешающей способности по углу и дальности многолучевых приборов эхолотационного контроля ППТ. Сформулированы требования к параметрам АЭУ полосу пропускания и числу элементов обработки.</p>
<p>Исследовать возможности использования в приборах многолучевого эхолотационного контроля АЭУ, реализующих метод восстановления волнового фронта и позволяющих обрабатывать широкополосные эхосигналы с высокой разрешающей способностью по дальности (соответствующей обработке эхосигналов с относительной полосой до 40%, т.е. разрешением по дальности до нескольких миллиметров) и углу не более <math>0,5^\circ</math>.</p>	<p>Методы оптимальной пространственно-временной обработки сигналов, квазиоптимальной обработки сигналов, восстановления волнового фронта.</p>	<p>Исследованы возможности использования в приборах многолучевого эхолотационного контроля АЭУ обработки эхосигналов; получены выражения для пространственных импульсных характеристик, определены основные соотношения, позволяющие связать информационную пропускную способность приборов многолучевого эхолотационного контроля с внутренними параметрами акустических процессоров.</p>
<p>Разработать методику расчета пространственных характеристик АЭУ, учитывающую использование взаимовлияющих малоапертурных решеток преобразователей поверхностных акустических волн, расположенных на анизотропных подложках, влияющих на разрешающую способность многолучевых приборов контроля положения ППТ.</p>	<p>Методы анализа и расчета параметров АР, расчета ВПП на основе функции Грина, математической обработки результатов экспериментальных исследований, численные методы расчета на ЭВМ</p>	<p>Разработана методика расчета пространственных характеристик АЭУ, позволяющая определить топологию акустических процессоров на анизотропных подложках и разрешающую способность по углу многолучевых приборов контроля на их основе. Результаты экспериментов, связанные с методикой расчета пространственных характеристик приборов многолучевого эхолотационного контроля.</p>

*Продолжение таблицы 1 – Структура работы по задачам*

Задача исследования	Методы исследования	Результат исследования
<p>Предложить схемотехнические решения увеличения числа элементов переизлучающих решеток АЭУ для многоэлементных АР (с числом элементов более ста) и топологические решения построения широкополосных акустических процессоров, позволяющих обрабатывать короткие широкополосные эхосигналы с высокой разрешающей способностью по углу (не более 0,5°) и дальности, за счет чего увеличивается информационная пропускная способность многолучевых приборов контроля.</p>	<p>Методы прорезивания, расчета ВШП на основе модели дельта-функций, компенсации углочастотной зависимости</p>	<p>Предложены схемотехнические и топологические решения, позволяющие использовать акустические процессоры с ограниченным числом элементов переизлучающих решеток для пространственной обработки эхосигналов, принимаемых АР с числом элементов до ста и более, использующие короткие широкополосные сигналы. Увеличение числа элементов АР и полосы пропускания обеспечивает высокую разрешающую способность по дальности и углу для определения координат оголенных и провисающих участков ПШТ и расширяет информационную пропускную способность приборов контроля.</p>
<p>Предложить топологическое решение построения АЭУ, обеспечивающее обработку сигналов многолучевых приборов контроля с фиксированной разрешающей способностью в ближней и дальней зонах АР.</p>	<p>Методы обработки широкополосных пространственно-временных сигналов</p>	<p>Предложено топологическое решение построения АЭУ, обеспечивающее формирование зондирующих сигналов и пространственную обработку принимаемых широкополосных эхосигналов с одинаковой разрешающей способностью в ближней и дальней зонах АР.</p>

Для того чтобы АЭУ обладало приемлемо малыми размерами, масштаб уменьшения должен быть достаточно высоким, что достигается переходом к меньшим длинам волн в среде обработки по сравнению с длинами волн в пространстве объектов. Это осуществляется за счет изменения скорости распространения или частоты переизлученных волн, либо за счет того и другого.

В представленной классификации устройств рассматриваются различные классы устройств и способы построения их топологий. Также приводится описание нескольких известных типов АЭУ, предназначенных для обработки сигналов линейных и дуговых или кольцевых АР. Представлена классификация, и приводится описание нескольких известных типов АЭУ, предназначенных для многолучевых приборов контроля.

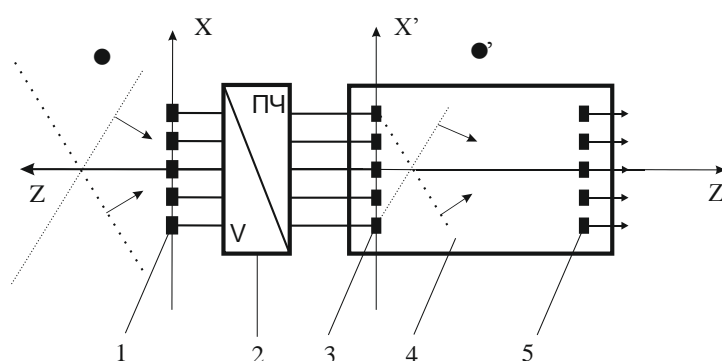


Рисунок 1 – Работа АЭУ: 1- элементы приемной антенной решетки, 2- электронные устройства (усилители и/или преобразователи частоты), 3- переизлучающая решетка преобразователей ПАВ, 4- подложка, 5- считывающая решетка преобразователей ПАВ

В качестве базовой модели пространственно-временных сигналов и помех выбран сигнал, образуемый точечным источником, излучающим в однородной, изотропной, недиспергирующей среде; отклик устройства на такой сигнал является пространственной импульсной характеристикой. В результате анализа, проведенного в первом разделе, сделаны следующие выводы:

1. Анализ нормативных документов, требований к приборам контроля ППТ дал возможность сформулировать необходимые технические параметры, которые и используются далее в работе в качестве основных.
2. При построении акустических процессоров частота ПАВ обычно не совпадает с частотой зондирующих сигналов, поэтому для обработки сигналов возникает необходимость использования преобразования частоты или временного масштаба сигналов.
3. Существенное ограничение полосы пропускания АЭУ, работающих с преобразованием частоты, в приборах контроля, использующих линейную АР связано с проявлением углочастотной зависимости:

$$\Delta n = -\frac{q_2 \gamma}{q_1 + q_2 \gamma} \cdot n \frac{\Delta \nu}{1 + \Delta \nu} \quad \text{или} \quad 2 \cdot \Delta \nu = \frac{1}{2n} \cdot \left| \frac{q_1 + q_2 \gamma}{q_2 \gamma} \right| = \frac{1}{2n} \cdot \frac{\omega'_0}{\omega_r} \quad (1)$$

или нарушением условий фокусировки при работе с сигналами дуговой или кольцевой АР:

$$\Delta L' = L'_0 \cdot \left[ 1 - \frac{(\gamma - \nu)}{\nu \cdot (\gamma - 1)} \right] \quad (2)$$

Здесь и далее используются следующие обозначения:  $\nu = \omega / \omega_0$  – относительная частота принимаемого сигнала,  $\omega_0$  – центральная частота принимаемых волн,  $\Delta \nu = \Delta \omega / \omega_0$  – относительная расстройка по частоте,  $2 \cdot \Delta \omega$  – полоса пропускания,  $n = \sin \alpha / \Delta \sin \alpha_R$ ,  $\alpha$  – угол падения волны на приемную АР,  $\Delta \sin \alpha_R = \lambda / D$  – угловая разрешающая способность,  $\Delta n = \Delta \sin \alpha / \Delta \sin \alpha_R$  (обычно  $\Delta n = 0,25$ ),  $\gamma = \omega_r / \omega_0$  – нормированная частота гетеродина,  $\omega'_0 = q_1 \omega_0 + q_2 \omega_r$  – промежуточная частота  $q_1 = \pm 1$ ,  $q_2 = \pm 1$ ,  $L'_0 = 3 \cdot \lambda'_0 \cdot R / \lambda_0$  – расстояние между переизлучающей и считывающей решетками при  $\omega = \omega_0$ ,  $\Delta L'$  – величина смещения плоскости регистрации при изменении частоты  $\omega$ ,  $R$  – радиус дуговой АР,  $D$  и  $D'$  – апертура АР и переизлучающей решетки.

Выражения (1) и (2) позволяют сделать вывод, что полоса АЭУ зависит от числа пространственных каналов линейной АР и волнового размера дуговой или кольцевой АР, соотношения частот принимаемых длин волн в акустическом

процессоре и внешней среде. Для обработки коротких (широкополосных) сигналов, используемых в приборах контроля и обладающих высокой разрешающей способностью по дальности, необходимо разработать новые топологии акустических процессоров, в которых отсутствует или компенсируется углочастотная зависимость и сохраняется фокусировка волн.

**Второй раздел** посвящен разработке методики расчета характеристик АЭУ с учетом ряда дополнительных факторов. Большинство современных материалов, используемых в качестве акустических подложек, являются анизотропными. В связи с этим при разработке АЭУ необходимо определить значение угла между групповой и фазовой скоростью в широком секторе углов излучения встречно-штыревых преобразователей (ВШП). Для этого в работе предложена аппроксимация кривых фазовой скорости для различных материалов (таблица 2). Выражение, описывающее пространственную импульсную характеристику АЭУ при наличии случайных фазовых ошибок, анизотропных свойств подложки, с учетом направленных свойств и взаимного влияния элементов переизлучающей решетки можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \overline{|h_{ACI}(\alpha')|^2} = & (1 - \sigma^2) \cdot \{f_C(\alpha') \cdot f_A(\alpha') \cdot h_{TA}(\alpha, \alpha')\}^2 + \\ & + \frac{3\sqrt{\pi}}{4} C_\varphi \cdot \sigma^2 \cdot (1 + l^2) \cdot \exp\left\{-\frac{(k'(\alpha') \cdot D' \cdot \sin(\alpha' - \Phi))^2 \cdot C_\varphi^2}{4}\right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $f_A(\alpha')$  – амплитудная характеристика направленности элементов переизлучающей решетки в анизотропной среде,  $f_C(\alpha')$  – функция взаимного влияния элементов решетки преобразователей поверхностных волн,  $h_{TA}(\alpha, \alpha')$  – пространственная импульсная характеристика АЭУ при точечных элементах переизлучающей решетки в анизотропной среде,  $C_\varphi = 1/(2N+1)$  – радиус корреляции фазовых ошибок в относительных единицах,  $N$  – число элементов АР,  $\sigma^2$  – дисперсия фазовых ошибок,  $l$  – весовая функция, учитывающая характеристики направленности элементов АР.



Таблица 2 – Аппроксимирующие полиномы для кривых фазовых скоростей различных материалов

Материал, срез	Аппроксимирующий полином
$Ca_3NbGa_3Si_2O_{14}$ срез ( $\alpha=0^\circ, \mu=48^\circ$ )	$v_f^*(\alpha_k'^{**})=2950,0-11,4 \alpha_k'+436,0 (\alpha_k')^2-981,4 \cdot (\alpha_k')^3+$ $+1922,0 \cdot (\alpha_k')^4-2440,0 \cdot (\alpha_k')^5+1789,0 \cdot (\alpha_k')^6-700,2 \cdot (\alpha_k')^7+$ $+113,3 \cdot (\alpha_k')^8$
$LiNbO_3$ Y-срез	$v_f(\alpha_k')=3485,0-23,2 \alpha_k'-1383,0 (\alpha_k')^2+3548,0 \cdot (\alpha_k')^3-$ $-1408,0 \cdot (\alpha_k')^4-3079,0 \cdot (\alpha_k')^5+4152,0 \cdot (\alpha_k')^6-2031,0 \cdot (\alpha_k')^7+$ $+365,4 \cdot (\alpha_k')^8$
$Bi_{12}GeO_{20}BGO$ плоскость [001]	$v_f(\alpha_k')=1624,0-7,8 \alpha_k'+92,9 \cdot (\alpha_k')^2+920,5 \cdot (\alpha_k')^3-$ $-2655,0 \cdot (\alpha_k')^4+3135,0 \cdot (\alpha_k')^5-2120,0 \cdot (\alpha_k')^6+816,1 \cdot (\alpha_k')^7-$ $-135,2 \cdot (\alpha_k')^8$
$Al_2O_3$ Z – срез	$v_f(\alpha_k')=5559,0-6,0 \cdot \alpha_k'+132,0 \cdot 10^{-2} (\alpha_k')^2-5,0 \cdot 10^{-2} \cdot (\alpha_k')^3+$ $+6,5 \cdot 10^{-4} \cdot (\alpha_k')^4-2,8 \cdot 10^{-6} \cdot (\alpha_k')^5$
*Значение фазовой скорости в м/с **Значение угла в рад	

Входящий в выражение (3) сомножитель  $f_A(\alpha')$  позволяет учитывать характеристики акустической подложки и используется для вычисления диаграммы направленности ВШП при математических расчетах. Основной вклад в формирование диаграммы направленности элементов переизлучающей решетки вносит апертура преобразователя. При этом даже малоапертурные, сравнимые с длиной волны, преобразователи имеют сравнительно узкую диаграмму направленности, что затрудняет их использование при разработке АЭУ, работающих с интерферирующими пучками. Для компенсации этого эффекта рекомендуется использовать расфокусирующие преобразователи со сферическими штырями.

Сомножитель  $f_C(\alpha')$  выражения (3) позволяет учитывать взаимное влияние элементов переизлучающей решетки. Характеристика направленности элемента в решетке существенно отличается от характеристики направленности изолированного преобразователя, и с уменьшением расстояния между элементами эффект взаимного влияния увеличивается.

Для определения коэффициентов взаимовлияния между элементами переизлучающей решетки  $C_{0n}$ , влияющих на вид функции  $f_C(\alpha')$ , предлагается

использовать экспоненциальную аппроксимацию, показатель которой характеризует скорость убывания наводок. Для его определения был проведен эксперимент, в котором использовались акустические процессоры, выполненные на Y-срез ниобата лития. На рисунке 2 (а) представлены аппроксимации нормированного уровня наводок между элементами переизлучающей решетки, состоящей из 15 элементов: указаны аппроксимации максимальных, минимальных и усредненных значений. Скорости убывания усредненных наводок между элементами составила  $v_c=4,3$ . На рисунке 2 (б) представлена функция взаимного влияния элементов  $f_c(\alpha')$  для экспериментально полученного значения параметра  $v_c$ . Для сравнения также приводится аналогичная функция взаимного влияния элементов при  $v_c=1,5$ .

Анализ полученных при моделировании пространственных импульсных характеристик позволяет сделать вывод, что взаимное влияние элементов менее 30 дБ существенно сказывается на виде пространственной импульсной характеристики при изменении угла падения волны на элементы АР.

Результаты экспериментальных исследований (рисунок 3) подтверждают математические расчеты, выполненные на основании методики, полученной в данном разделе.

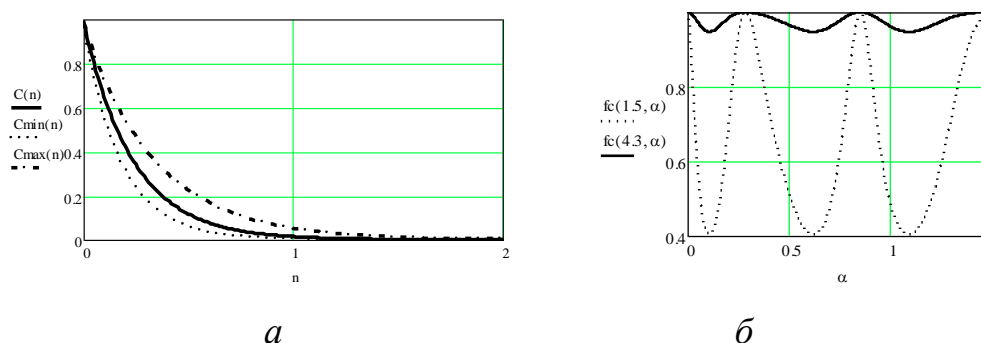


Рисунок 2 – Экспериментальные граничные значения уровней наводок между элементами переизлучающей решетки и выбранное для расчетов значение (а) и вид функции  $f_c(\alpha')$  при значениях скорости убывания наводок  $v_c=4,3$  и  $v_c=1,5$  (б)

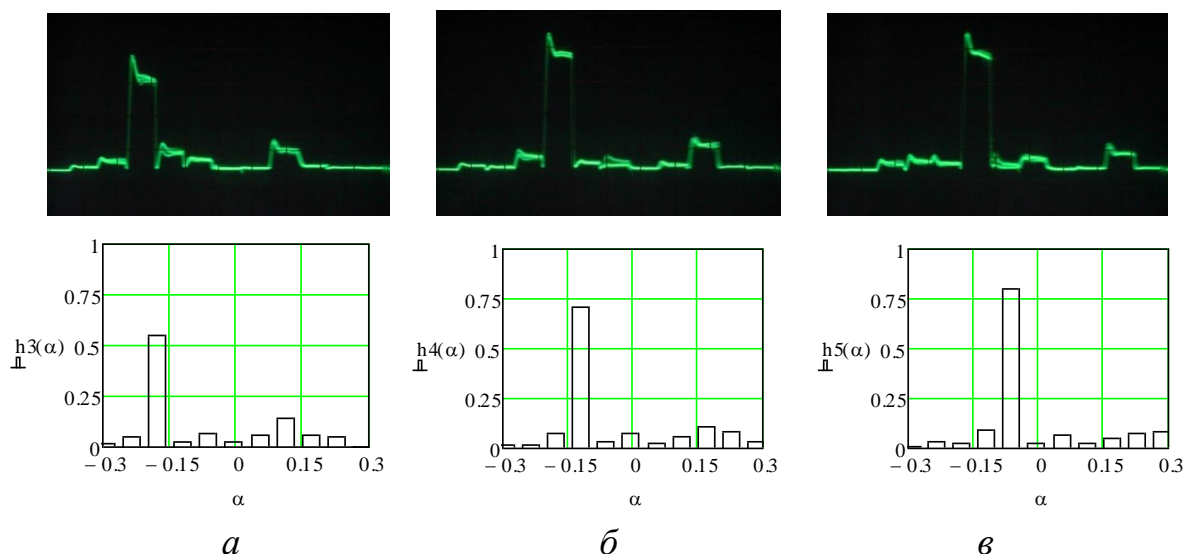


Рисунок 3 – Отклики АЭУ, полученные в ходе эксперимента для пространственных каналов  $n=3$  при  $\alpha=-12^\circ$  (а),  $n=4$  при  $\alpha=-8^\circ$  (б),  $n=5$  при  $\alpha=-4^\circ$  (в) и соответствующие им результаты расчетов

Для многолучевых приборов контроля задача уменьшения ширины луча диаграммы направленности (для увеличения разрешающей способности по углу) связана с необходимостью увеличения числа приемных элементов АР и, как следствие, числа элементов переизлучающей решетки в АЭУ. Для современных материалов эта величина варьируется в пределах от 15 до 40, что является недостаточным.

В разделе предложено два варианта группировки элементов в подрешетки, позволяющие использовать разработанные АЭУ для параллельной пространственной обработки сигналов в многолучевых приборах контроля, содержащих до нескольких сотен приемных элементов. Это позволяет существенно уменьшить площадь пятна акустического контакта на дне, увеличить разрешающую способность по углу и информационную пропускную способность приборов контроля.

**В третьем разделе** представлены топологические решения построения акустических процессоров, позволяющих обрабатывать короткие широкополосные эхосигналы с высокой разрешающей способностью по

дальности и увеличивающих информационную пропускную способность многолучевых приборов контроля.

Для обеспечения высокой разрешающей способности по дальности в приборах контроля используются короткие (широкополосные) импульсы. Анализ полосы пропускания АЭУ показал, что при работе с масштабированием по частоте данные устройства становятся узкополосными. В данном разделе рассмотрено несколько известных топологий построения широкополосных устройств контроля природных сред на основе узкополосных АЭУ. Выявлены их основные недостатки – громоздкость устройства с параллельными каналами и ограниченная применимость устройств с преобразователями временного масштаба.

Предложено два варианта построения АЭУ, позволяющие расширить полосу пропускания за счет топологии построения переизлучающих и считывающих решёток преобразователей. В первом случае результат достигается за счет использования частотозависимой апертуры, обеспечивающей сохранение углового направления переизлученной волны при изменении частоты принимаемого сигнала (рисунок 4, а). Для построения такой переизлучающей решетки преобразователей ПАВ шаг расположения преобразователей должен изменяться в соответствии с выражением:

$$d'(\omega) = \frac{\omega'_0}{\omega_0} \cdot \frac{\omega}{\omega'} d'_0, \quad (4)$$

где  $d'_0$  – шаг переизлучающей решётки преобразователей ПАВ на частоте  $\omega_0$ . Результаты расчетов показывают эффективность применения данной топологии для расширения полосы пропускания (рисунок 4, б).

При этом существенное влияние оказывает величина базы  $B=2\Delta f \cdot T$  неэквидистантных преобразователей переизлучающей решетки. Минимальное значение которой определяется выражением:

$$B \geq \left( \frac{n}{\varepsilon} \cdot \frac{\omega_\Gamma}{\omega'_{\min}} \cdot \frac{\Delta\omega}{\omega_{\min}} \right)^2, \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент, определяющий допустимую степень искажения формы отклика, соответствующего монохроматическому сигналу,  $n$  – число пространственных каналов. Из выражения (5) следует, что при заданной полосе входного сигнала и принятой промежуточной частоте  $\omega_0'$  более выгодным является вариант преобразования частоты с меньшим значением  $\omega_r$ , т.е.  $\omega_{\min} = \omega_0 - \Delta\omega$  и  $\omega'_{\min} = \omega_0 \pm \omega_r - \Delta\omega$ , чем  $\omega'_{\min} = \omega_r - \omega_0 + \Delta\omega$ .

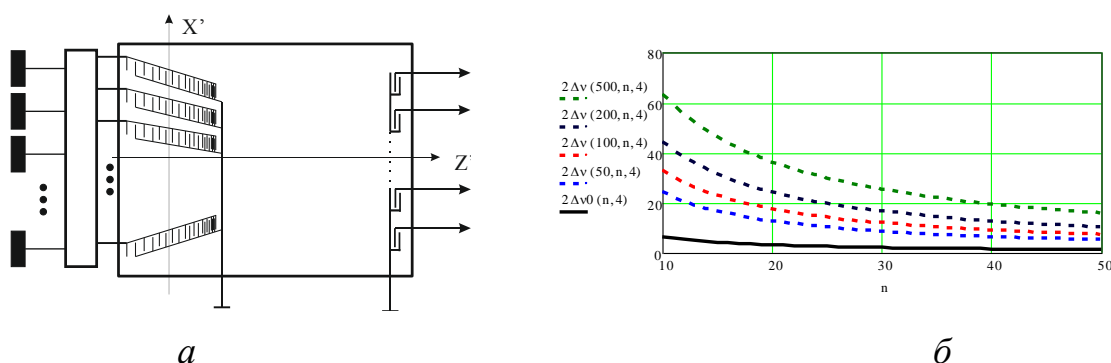


Рисунок 4 – АЭУ с частотозависимой апертурой переизлучающей решетки (а) и полоса пропускания  $2\Delta\nu(B, n, \gamma)$  при различном значении базы преобразователей в сравнении с полосой пропускания устройства с эквидистантными преобразователями ( $2\Delta\nu_0$ ) при относительной частоте гетеродина  $\gamma=4$  (б)

Устройство данного вида может использоваться не только как устройство пространственной обработки сигналов многолучевых приборов контроля, но и в качестве фильтра сжатия для сигналов с линейной частотной модуляцией, обеспечивая их пространственно-временную обработку. Искажениями, связанными с неосевым переизлучением сигналов можно пренебречь, если ограничить сектор углов, в соответствии с условием:

$$\sin \alpha'_0 \leq \sqrt{1 - \left( \frac{B}{B+1.5} \right)^2}. \quad (6)$$

Во втором случае поставленный результат достигается за счет использования дифракционных максимумов первого порядка считывающей решетки преобразователей ПАВ, обеспечивающих компенсацию изменения угла распространения переизлученной волны при изменении частоты принимаемого

сигнала (рисунок 5, а). Новизна данного устройства подтверждена патентом РФ № 139809. Для однозначного определения угловой координаты принимаемого сигнала необходимым условием является отсутствие в секторе углов переизлучения (при изменении частоты и углового положения принимаемого сигнала) дифракционных максимумов считывающей решетки кроме первого. Данное условие определяет порядок дифракционного максимума переизлучающей решетки как:

$$|i| > \frac{d}{\lambda_0} \cdot \sin \alpha_{\max} \cdot \left( \frac{2 \cdot \omega_{\max}}{\omega_0} + \left| q_1 - \frac{\omega'_0}{\omega_0} \right| \right). \quad (7)$$

где  $2\alpha_{\max}$  – сектор обзора линейной антенной решетки,  $\omega_{\max} = \omega_0 + \Delta\omega$  – максимальная частота принимаемых волн,  $\lambda_0$  – длина волны на частоте  $\omega_0$ ,  $d$  – шаг линейной АР,  $q_1 = 1$  при  $\omega' = \omega - \omega_r$  и  $q_1 = -1$  при  $\omega' = \omega_r - \omega$ .

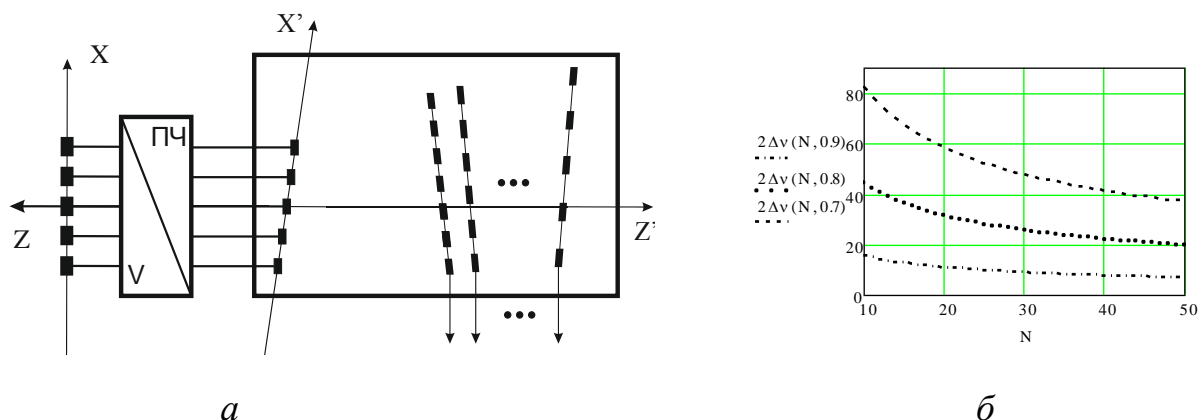


Рисунок 5 – АЭУ с линейной переизлучающей решеткой и дифракционными считывающими преобразователями ПАВ (а) и зависимость относительной полосы пропускания  $2\Delta v(\gamma, N_0)$  (в процентах) при  $\gamma = 0,7; 0,8; 0,9$  (б)

В результате применения АЭУ с компенсацией углочастотной зависимости удастся достичь расширения полосы пропускания даже при существенном влиянии углочастотной зависимости (рисунок 5, б). Но с учетом ограничивающих факторов, связанных с использованием дифракционных максимумов, полоса пропускания устройства не превышает 20–30%.

**Четвертый раздел** посвящен вопросам увеличения информационной пропускной способности и функциональных возможностей многолучевых приборов контроля кругового и секторного обзора.

Для увеличения информационной пропускной способности многолучевых приборов кругового обзора предлагается топология акустического процессора с расположением элементов переизлучающей решетки по дуге окружности (рисунок 6, а). Предложенное топологическое решение обеспечивает обработку сигналов кольцевой АР в секторе обзора  $360^\circ$  без использования адресной избыточности. Однозначная связь элементов АР с элементами переизлучающей решетки, позволяет на 50% увеличить число элементов  $N_0$  за счет отсутствия полуторазаходной адресации и, как следствие, улучшить разрешающую способность по углу и информационную пропускную способность гидролокаторов кругового обзора. Новизна предложенного топологического решения подтверждена патентом РФ № 127943.

При выборе частоты  $\omega' = \omega_r - \omega$  обеспечивается синфазное суммирование ПАВ элементами считывающей решетки, расположенными по концентрической окружности меньшего радиуса. Волновой радиус расположения элементов считывающей решетки определяется волновым размером АР, а радиус переизлучающей решетки может быть определен из допустимого снижения отклика устройства и габаритных размеров подложки (рисунок 6, б). Использование такой решетки считывающих преобразователей ПАВ может быть связано с технологическими трудностями, поэтому регистрацию распределения поверхностных волн предлагается осуществить оптическими методами. В этом случае АЭУ будет использоваться в качестве модулятора света.

Ограничение частотного диапазона устройства связано с нарушением условия фокусировки волн. Введение частотнозависимого расстояния между элементами переизлучающей и считывающей решеток позволяет сохранить фокусировку переизлученной волны при девиации частоты, что увеличивает

полосу пропускания АЭУ в 1,5–2 раза в зависимости от волнового размера АР и отношения  $\omega_{\Gamma}/\omega_0$  (рисунок 6, в).

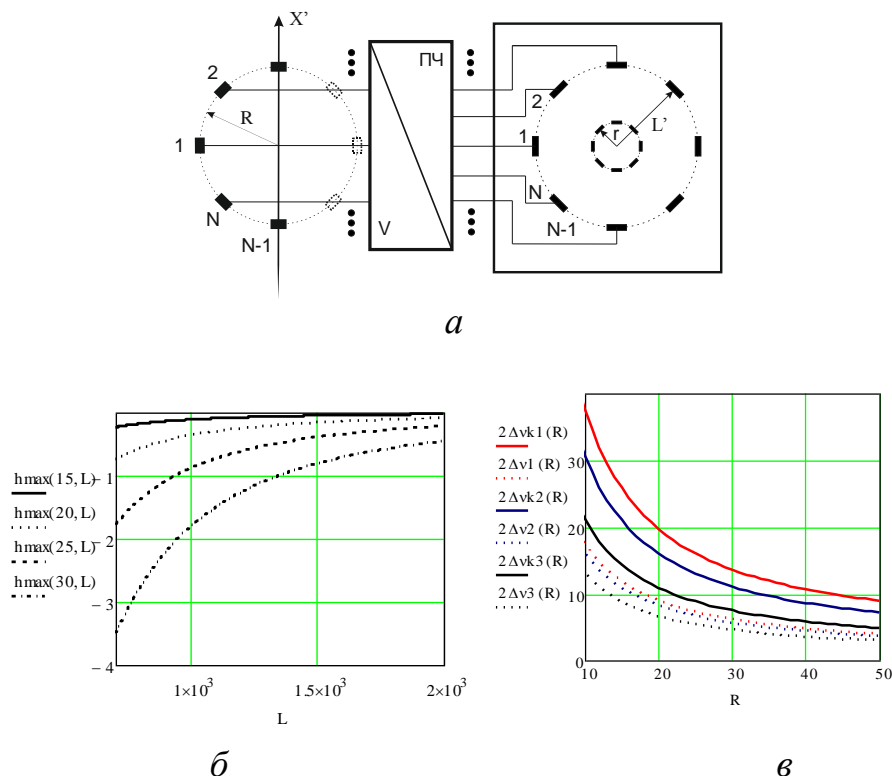


Рисунок 6 – АЭУ с круговой переизлучающей решеткой преобразователей (а), уменьшение отклика в максимуме пространственной импульсной характеристики (в дБ) в зависимости от волнового радиуса переизлучающей решетки  $L'$  при  $R=15\lambda, 20\lambda, 25\lambda, 30\lambda$  (б) и зависимость полосы пропускания АЭУ от волнового размера АР при относительной частоте гетеродина  $\gamma=11$  ( $\Delta v_1$  и  $\Delta v_{k1}$ ),  $\gamma=6$  ( $\Delta v_2$  и  $\Delta v_{k2}$ ),  $\gamma=3$  ( $\Delta v_3$  и  $\Delta v_{k3}$ ) (в)

Многоканальные устройства на ПАВ с масштабированием по скорости по своим характеристикам относятся к устройствам с временной компенсацией, что позволяет применять их в задачах пространственной обработки широкополосных сигналов. Но возможности использования данного типа устройств ограничены освоенным диапазоном частот работы акустических процессоров.

Рассмотрена система передающей и приемной АР, реализующая В-режим сканирования в режиме угол–дальность в плоскости  $XOZ$  (рисунок 7). Использование на излучение тонкой кольцевой АР позволяет формировать



структуру поля идентичную в ближней и дальней зонах контролируемого объекта. Для системы, состоящей из излучающей и приемной АР с круглой апертурой, расположенной внутри излучающей, амплитудное распределение определяется произведением их диаграмм и описывается следующими выражениями в плоскости XOZ и YOZ:

$$h(\alpha) = \left\{ \left[ \int_{-R}^R (R^2 - x^2)^{-1/2} dx \right]^{-1} \cdot \int_{-R}^R (R^2 - x^2)^{-1/2} \cdot \exp(-jkx \sin \alpha) dx \right\} \times \quad (8)$$

$$\times \left[ 2\pi \frac{R_v}{\lambda} \sin \alpha \right]^{-1} \cdot 2J_1 \left( 2\pi \frac{R_v}{\lambda} \sin \alpha \right),$$

$$h(\beta) = \left\{ [k \cdot R \cdot \sin \beta]^{-1} \cdot 2 \cdot J_1(k \cdot R \cdot \sin \beta) - 2 \cdot J_2(k \cdot R \cdot \sin \beta) \right\} \times \quad (9)$$

$$\times \left[ 2\pi \frac{R_v}{\lambda} \sin \beta \right]^{-1} \cdot 2J_1 \left( 2\pi \frac{R_v}{\lambda} \sin \beta \right)$$

где  $J_{1,2}$  – функция Бесселя первого рода, первого (второго) порядка,  $R$  – радиус излучающей АР,  $R_v$  – радиус считывающей АР. Результирующие амплитудные распределения, полученные на основании выражений (8) и (9), представлены на рисунке 8.

Формирование сигналов излучающей и приемной АР осуществляется двумя акустическими процессорами (рисунок 7). Первый акустический процессор формирует на элементах АР амплитудно-фазовое распределение, что позволяет излучать сигналы под углом к оси X. Для пространственной обработки принимаемых сигналов предлагается использовать АЭУ, фокусирующее на элементах считывающей решетки сигналы, приходящие с различных угловых направлений. За счет использования дискретной фокусировки переизлученных волн в АЭУ с временной компенсацией можно обеспечить перекрытие всей требуемой зоны контроля

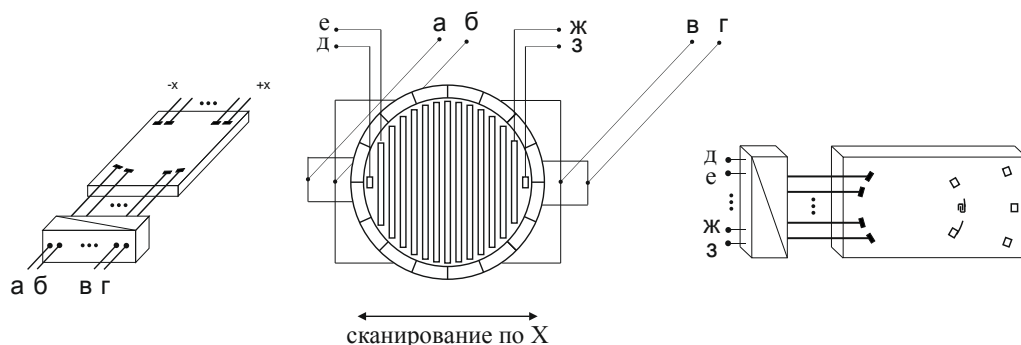


Рисунок 7 – Акустоэлектронное устройство с излучающей кольцевой АР и приемной круговой АР

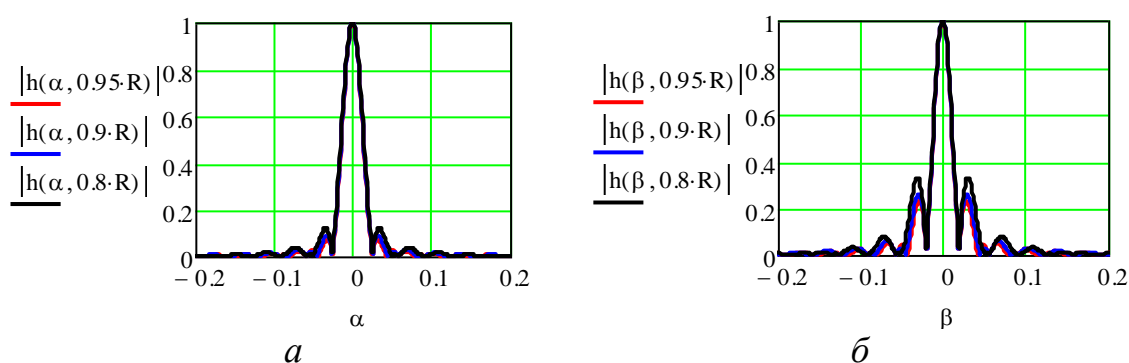


Рисунок 8 – Амплитудное распределение для системы передающей и приемной АР при относительном радиусе приемной круговой АР  $R_v=0,95R, 0,9R, 0,8R$  в плоскости  $XOZ$  ( $a$ ) и  $YOZ$  ( $b$ )

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе достигнуты основные цели: увеличена информационная пропускная способность за счет увеличения полосы пропускания и числа элементов АР и расширены функциональные возможности АЭУ обработки сигналов многолучевых приборов контроля ППТ. В работе получены следующие результаты:

1. Проведенный научно-технический анализ современных многолучевых приборов контроля пространственного положения ППТ, основанных на обработке эхолокационных сигналов, в том числе на базе АЭУ, показал, что они не в полной мере соответствуют задачам обнаружения и определения координат провисающих и оголенных участков трубопроводов малого диаметра из-за недостаточной разрешающей способности по углу и дальности.

2. Показана возможность использования в приборах многолучевого эхолокационного контроля АЭУ, реализующих метод восстановления волнового фронта и позволяющих обрабатывать широкополосные эхосигналы с высокой разрешающей способностью по дальности и углу за счет моделирования в уменьшенном масштабе полей в раскрыве АР. Проанализированы варианты топологического построения многоканальных акустических процессоров, получены выражения для пространственных импульсных характеристик АЭУ с масштабированием по частоте и скорости. Определены основные соотношения, связывающие информационную пропускную способность приборов многолучевого эхолокационного контроля с внутренними параметрами АЭУ.

3. Разработана методика расчета пространственных характеристик АЭУ, учитывающая использование взаимовлияющих малоапертурных решеток преобразователей поверхностных акустических волн, расположенных на анизотропных подложках, позволяющая определить топологию акустических процессоров и разрешающую способность по углу многолучевых приборов контроля на их основе. Экспериментально полученные результаты подтвердили основные соотношения, связанные с методикой расчета пространственных характеристик приборов многолучевого эхолокационного контроля.

4. Предложены схемотехнические решения увеличения числа элементов переизлучающих решеток АЭУ и топологические решения построения широкополосных акустических процессоров, позволяющих обрабатывать короткие широкополосные эхосигналы с высокой разрешающей способностью по углу и дальности, существенно увеличивающие информационную пропускную способность приборов эхолокационного контроля ППТ. Два предложенных схемотехнических решения позволяют использовать акустические процессоры с ограниченным числом элементов переизлучающих решеток (от 15 до 40) для пространственной обработки эхосигналов, принимаемых многоэлементными АР. Увеличение числа элементов до ста и более обеспечивает высокую угловую разрешающую способность приборов контроля (до  $0,5^\circ$ ). Предложено два

топологических решения построения АЭУ, позволяющих использовать короткие сигналы с относительной полосой до 40 % (в зависимости от параметров АР и АЭУ) и обеспечивающих улучшение разрешающей способности по дальности (до нескольких сантиметров) для определения координат оголенных и провисающих участков ППТ.

5. Предложено топологическое решение построения АЭУ, обеспечивающее как формирование зондирующих сигналов, так и пространственную обработку принимаемых широкополосных эхосигналов с одинаковой разрешающей способностью в ближней и дальней зонах АР. В последнем случае исследуются АЭУ с масштабированием по скорости.

#### **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

- 1. Захарова (Кравец), Е. В. Акустоэлектронные устройства обработки сигналов многоэлементных линейных антенных решеток / П. Н. Петров, Е. В. Захарова (Кравец) // Информационно-управляющие системы. – 2011.– №3. – С.47-51 .**
- 2. Кравец, Е. В. Увеличение широкополосности акустоэлектронных устройств обработки сигналов антенных решеток / Е. В. Кравец, П. Н. Петров // Информационно-управляющие системы. –2012. – №3 – С. 46–53.**
- 3. Кравец, Е. В. Пространственная импульсная характеристика акустоэлектронных устройств обработки сигналов антенных решеток / Е. В. Кравец, П. Н. Петров // Успехи современной радиоэлектроники. –2013. – №2. – С.93-97.**
- 4. Кравец, Е. В. Акустоэлектронное устройство обработки сигналов гидролокаторов кругового обзора для контроля подводных переходов трубопроводов / Е. В. Кравец // Датчики и системы. – 2016. – №1. – С.30 – 34.**
- 5. Пат. 127943 РФ, МПК G01S 3/00, H01Q 21/00. Устройство пространственной обработки сигналов / Е.В. Кравец, П.Н. Петров; заявитель**

и патентообладатель СПб ГУАП. – № 2012150656/08; заявл. 21.11.12 ; опубл. 10.05.13, Бюл. № 13. – 2 с.

6. Пат. 139809 РФ, МПК G01S 3/00. Устройство пространственной обработки сигналов / Е. В. Кравец, В. С. Кравец, П. Н. Петров; заявитель и патентообладатель СПб ГУАП. – №2013148692/07; заявл. 31.10.13 ; опубл. 27.04.14, Бюл.№ 12. – 2с.

7. Кравец (Захарова), Е. В. Акустоэлектронное устройство обработки сигналов кольцевой антенной решетки / Е. В. Кравец (Захарова), Т. О. Моргунова, П. Н. Петров // X научная сессия ГУАП. Часть 2. Технические науки, сб. докладов. – 2010. – С. 53 – 58.

8. Петров, П. Н. Эффекты дискретности AP и решеток преобразователей в устройствах с масштабными переизлучающими решетками / П. Н. Петров, Е. В. Захарова (Кравец), А. В. Ванде-Кирков // XI научная сессия ГУАП. Часть 2. Техн. науки, сб. докладов. – 2011. – С.48 –55.

9. Кравец, Е. В. Компенсация углочастотной зависимости переизлучаемых сигналов антенной решетки в акустоэлектронных устройствах / Е. В. Кравец, П. Н. Петров // Сборник трудов II Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы технических наук в современных условиях». –2015. – С. 197-200.

10. Kravets, E. V Acoustic electronic device for control the internal structure of objects / E. V. Kravets, P. N. Petrov // XVIII international conference for young researchers. Wave Electronics and Its Applications In Information and Telecommunication Systems. – 2015. – P.44.

---

Формат 60x84 1\16 .Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Тираж 100 экз. Заказ №.

---

Редакционно-издательский центр ГУАП  
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67