

М 87438

МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА, ордена ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
и ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. Н. Э. БАУМАНА

На правах рукописи

КАЧАНОВ Владимир Климентьевич

РАЗРАБОТКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО
КОНТРОЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Специальность 05.02.11 -
Методы контроля и диагностики в машиностроении

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Качанов

Москва

1993

Работа выполнена в Московском энергетическом институте

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Щербинский В.Г.
доктор технических наук, профессор
Потапов А.И.
доктор технических наук, нач. отделения
Гончаров В.И.

Ведущая организация: ЦНИИ специального машиностроения

Защита состоится " 7 " октября 1993 г. в _____ час.
на заседании специализированного Совета Д-053.15.07. при МГТУ им.
Н.Э.Баумана по адресу: Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью,
просим присылать по адресу: Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

С диссертацией можно ознакомиться

Автореферат разослан "

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
специализированного Сов
к.т.н., доцент

Подписано к печати 17.0
Тираж 100 экз. Типог

М 87438

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы, постановка задачи. Особенности неразрушающего контроля изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) в ракетно-космической и авиационной технике требуют одностороннего доступа, следовательно эхо-импульсного контроля этих изделий.

Аномально высокое частотнозависимое затухание ультразвуковых колебаний (УЗК) и сложная, как правило, многослойная структура ПКМ требуют обеспечения одновременно высокой чувствительности и разрешающей способности контроля, что в большинстве случаев не обеспечивается при использовании традиционных методов и устройств УЗ контроля с использованием простых немодулированных сигналов без специальной обработки эхо-импульсов. Действительно, из-за большого затухания УЗК эхо-сигналы находятся ниже порога чувствительности приемного тракта УЗ дефектоскопа (замаскированы белым шумом). С понижением частоты зондирующего сигнала удается обнаружить отраженный от дефекта импульс, однако это приводит к ухудшению разрешающей способности, что не позволяет контролировать расслоения в многослойных ПКМ. В ряде изделий многочисленные отражения от слоев создают коррелированный с зондирующим сигналом структурный шум, маскирующий эхо-сигналы от дефекта. Кроме того, после прохождения через изделие, через электроакустический тракт дефектоскопа эхо-сигналы искажаются, и возникает проблема точного определения временного положения эхо-сигнала при УЗ толщинометрии ПКМ.

Подобные проблемы обнаружения, измерения искаженных и замаскированных шумом эхо-сигналов решаются в радиолокации, технике связи. Таким образом становится очевидной задача разработки новых помехоустойчивых методов и устройств УЗ контроля ПКМ на основе использования радиолокационных сигналов с последующей их оптимальной обработкой, обеспечивающих за счет выделения эхо-сигналов из шумов и помех высокую чувствительность и одновременно высокое разрешение при контроле многослойных изделий, достоверность и точность измерения временного положения эхо-сигналов.

Научная новизна. В работе получены следующие научные результаты:

1. Исследованы вопросы выделения эхо-сигналов из шумов и помех в УЗ дефектоскопии ПКМ с большим затуханием УЗ и сложной структурой. Показана целесообразность использования методов оптимальной фильтрации сигналов для комплексного решения проблемы обнаружения, выделения эхо-сигналов из шумов и помех и измерения их параметров.

2. Показана целесообразность использования при УЗ эхо-контроле в совокупности с согласованной фильтрацией синхронного детектирования и квадратурной двухканальной обработки эхо-сигналов. Такая обработка является оптимальной при УЗ контроле ПКМ, она обеспечивает по-

И

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1087438

Качанов В.К. Разработка по



вышение чувствительности и помехоустойчивости контроля, увеличение разрешающей способности, достоверности контроля и точности измерения временного положения эхо-сигнала, а также частичное подавление сигнала электроакустической наводки (ЭАН).

3. Показано, что использование в УЗ дефектоскопии и толщинометрии оптимальной фильтрации заставляет оперировать не с временным изображением эхо-сигналов, а с их автокорреляционными (АКФ) и взаимокорреляционными функциями (ВКФ). Показано, что выбор наиболее подходящего для УЗ контроля сигнала должен производиться по виду его АКФ. Использование оптимальной фильтрации сигналов позволило создать новое направление УЗ толщинометрии изделий с большим затуханием УЗК, обеспечивающее высокую точность и достоверность измерения за счет фиксации временного положения эхо-сигнала по пику его АКФ.

4. Показана целесообразность использования при УЗ дефектоскопии ПКМ периодических пачек импульсов с последующей их обработкой в оптимальном фильтре (ОФ) - накоплением с целью повышения отношения эхо - сигнал/шум. На основе использования пачек импульсов с малой огибающей предложены новые методы УЗ толщинометрии ПКМ.

5. Показано, что акустический слой ведет себя подобно радиотехническому квазиоптимальному фильтру для пачки импульсов - рециркулятору. На основании представления слоя как рециркулятора: а) предложена модель формирования структурной помехи в многослойных регулярных средах и предложены способы выделения эхо-сигналов из такой помехи; б) предложен и реализован метод УЗ контроля многослойных сред, основанный на представлении слоя как накопителя при использовании в качестве зондирующего сигнала пачки когерентных импульсов с регулируемым периодом повторения; в) был теоретически сформулирован и экспериментально подтвержден эффект "нерезонансного" прохождения фазоманипулированных (ФМ) сигналов через слой, заключающийся в отсутствии резонансных явлений, что позволяет проводить УЗ контроль длинными ФМ сигналами без возникновения интерференционных явлений и обеспечивает достоверность информации об амплитудах сигналов в слоистых средах.

6. Исследованы различные виды сложномодулированных сигналов для задач УЗ дефектоскопии и толщинометрии, сформулированы критерии выбора для этих целей сигналов по виду их АКФ и показаны наиболее оптимальные области их применения. Предложен и впервые введен в практику УЗ дефектоскопии метод эхо-импульсного контроля изделий, использующий ФМ сигналы с последующей их согласованной фильтрацией (сжатием во времени) в совокупности с синхронным детектированием и двухканальной квадратурной обработкой. Теоретически и экспе-

риментально показано, что этот метод одновременно обеспечивает высокие значения чувствительности к обнаружению, разрешающей способности, повышает точность и достоверность измерения, исключает возникновение в слоях резонансных явлений и стоячих волн. Впервые предложен и внедрен непрерывно-импульсный метод эхо-контроля максимальной чувствительности на основе использования непрерывных ФМ М-сигналов.

7. Исследованы различные виды ансамблей сигналов применительно к задачам многоканального УЗ контроля изделий (комплементарные ФМ сигналы Баркера, Голея, ортогональные ФМ М - последовательности). Предложены и экспериментально исследованы новые методы УЗ дефектоскопии, в которых используются одновременно несколько ортогональных ФМ М-сигналов. Эти методы позволяют повысить производительность контроля, а также в теновом режиме обеспечивают определение координат дефектов, их форму, размер, т.е. обеспечивают принципиально новый способ визуализации акустических неоднородностей.

8. С целью уменьшения искажений сложномодулированных сигналов при их электроакустическом (ЭА) преобразовании и увеличения эффективности передачи таких сигналов в ЭАТ УЗ дефектоскопа разработаны и реализованы методы и устройства формирования непосредственно в контролируемой среде УЗ ФМ сигналов без предварительного формирования электрической копии возбуждающего сигнала и его ЭА преобразования. Разработаны и реализованы также устройства обработки УЗ сложномодулированных эхо-сигналов (ФМ, ЧМ, и др.) в акустических фильтрах без предварительного ЭА преобразования эхо-сигналов.

9. Показана целесообразность использования линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов с большой базой для задач УЗ дефектоскопии. Предложен и внедрен метод УЗ толщинометрии со спектральной обработкой ЛЧМ сигналов большой длительности.

10. Исследованы вопросы выделения УЗ сигналов из коррелированных помех. Теоретически и экспериментально показана целесообразность использования пространственно-временной (ПВ) обработки сигналов для выделения их из структурного шума. Разработаны алгоритмы построения ПВ ФФ для выделения эхо-сигналов из коррелированных помех.

11. С целью выделения эхо-сигналов одновременно из белого шума и из коррелированной помехи при контроле ПКМ с большим затуханием УЗ и сложной структурой были предложены и исследованы модели ПВ сигналов, реализуемых с помощью предложенных корреляционных антенных решеток, обеспечивающих узкую корреляционную диаграмму направленности (ДН) ПВ ФМ сигнала и возможность управления ею.

12. Предложено новое направление развития автоматизированных

УЗ систем, основанное на концепции адаптации параметров зондирующего сигнала и ЭАТ УЗ дефектоскопа под акустические свойства изделий из ПКМ, что обеспечивает с помощью гибких устройств автоматический анализ характеристик контролируемого изделия и автоматическую оптимизацию параметров зондирующего сигнала, ЭАТ и способа обработки эхо-сигнала для широкого спектра изделий из ПКМ.

Практическая ценность работы и ее реализация. По тематике диссертации под руководством автора были выполнены 9 х/д НИР с предприятиями авиакосмических отраслей промышленности, а также проведены фундаментальные исследования в рамках 6 г/б НИР по программам АН и МИНВУЗа. В результате были разработаны, изготовлены и переданы для опытной эксплуатации образцы УЗ дефектоскопов и толщиномеров для контроля ПКМ, два прибора приняты к серийному внедрению. В том числе:

1. Разработан и внедрен в опытное производство на предприятиях аэрокосмического комплекса (ПНИИСМ, ДНИИТМ) новый класс УЗ эхо-импульсных дефектоскопов с использованием ФМ сигналов Баркера, М-сигналов, обеспечивающих выделение эхо-сигналов из шумов, высокую разрешающую способность, отсутствие резонансных явлений при контроле многослойных сред, высокую точность измерения временного положения эхо-сигналов, повышенную помехустойчивость. Использование радиоимпульсного формирования зондирующего сигнала позволило в отличие от ударного возбуждения плавно менять параметры сигнала (f_0, T_0) для получения оптимальных параметров контроля. Дефектоскопы УЗД-ФМ после ОКР рекомендованы к серийному производству в НПО "Волна" (г. Киселев).

2. Разработаны и внедрены в опытное производство на предприятиях аэрокосмической промышленности (АНПК "МИТ" им. А.И. Микояна, АНТК им. А.Н. Туполева, ПНИИСМ, ДНИИТМ) новый класс УЗ эхо-импульсных толщиномеров авиационных материалов на основе оптимальной фильтрации сигналов и УЗ толщиномеры протяженных изделий на основе спектральной обработки ЛЧМ сигналов большой длительности.

3. Разработан новый класс УЗ автоматизированных адаптивных систем, осуществляющих адаптацию параметров дефектоскопа и зондирующего сигнала под свойства изделия. Адаптивный дефектоскоп внедрен в опытную эксплуатацию в НПО "Союз" и в серийное производство.

4. Разработаны принципы построения УЗ аппаратуры для контроля изделий с высоким уровнем структурных помех на основе ПВ обработки сигналов. Разработаны алгоритмы расчета ПВ ФМ сигналов и корреляционных антенн для формирования ПВ ФМ сигналов с управляемой узкой ДН.

Внедрение подтверждено соответствующими актами, приведенными в

Приложении к диссертации. Разработанные приборы экспонировались на выставках в нашей стране и за рубежом, автором получены серебряная и бронзовая медали ВДНХ СССР, диплом за 1 место на Всесоюзном конкурсе приборов НК композитов (1989 г.). Комплекс работ, выполненных под руководством автора, удостоен премии Гособразовании СССР (1990 г.).

Методы исследований. При разработке помехоустойчивых методов УЗ контроля ПКМ в работе использовались положения и математический аппарат теории сигналов, статистической радиотехники, теории связи. При разработке устройств УЗ контроля ПКМ использовалась современная элементная база электроники включая микропроцессоры и ПЭВМ.

Публикации и апробация результатов. По результатам исследования опубликовано 50 печатных работ, 24 отчета по НИР. Получено 17 авторских свидетельств на изобретение, а также положительные решения на выдачу 7 свидетельств. На рассмотрении находятся 6 заявок на изобретение.

Результаты исследований были представлены на международных конференциях по неразрушающему контролю в Японии (Iketani Conference, 1991), Франции (Ultrasonic International Conference, 1991), Бразилии (13 World conference on nondestructive testing, 1992), Австрии (Ultrasonics international conference, Вена, 1993), Болгарии (г.Варна, 1990; г.Торговиште, 1990), Латвии (неразрушающий контроль композитов, Рига, 1991), Москве (Московская международная конференция по композитам МСС-90). Результаты работ докладывались также на XII Всесоюзной конференции "Неразрушающие физические методы контроля" (г.Свердловск, 1990), на III Межотраслевой конференции "Неразрушающие методы контроля изделий из ПКМ" (г.Туапсе, 1989), на Всесоюзной НТ конференции "Современные проблемы радиоэлектроники" (г.Москва, 1989), на XIV Всероссийской конференции по неразрушающему контролю (г.С.-Петербург, 1992г.), на Республиканской НТ конференции "Технология производства деталей из КМ" (г.Киев, 1992), XI НТ конференции "Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов" (г.Обнинск, 1992), на Московских НТ конференциях (1974, 1976, 1979, 1980, 1990, 1991), на НТ конференциях МЭИ (1975, 1979, 1985, 1986, 1990, 1992).

Объем работы. Работа состоит из 10 разделов, списка использованной литературы и Приложения. Основная часть работы содержит 270 страниц машинописного текста и 91 страницу с рисунками. Приложение - 52 с.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе (во введении) обоснована актуальность темы и постановка задачи, определена цель работы, перечислены основные по-

ложения, выносимые на защиту, структура и состав работы.

Во второй главе обсуждаются основные проблемы УЗ контроля ПКМ, применяемых в изделиях ракетно-космической и авиационной промышленности, приводится обзор существующих методов УЗ контроля композитов, формулируются пути решения проблем контроля ПКМ.

Изделия из ПКМ в ракетно-космической технике подвергаются комплексному контролю на всех стадиях изготовления с использованием УЗ, рентгеновского, теплового и др. методов. Вместе с тем, ряд изделий на конечных стадиях изготовления, а так же готовые изделия допускают только односторонний доступ, т.е. только УЗ эхо-метод (рис.1). Однако традиционные методы и приборы УЗ эхо-импульсного контроля положительных результатов при этом не дают из-за особенностей свойств композитов, среди которых определяющими являются аномально высокое частотнозависимое затухание УЗК (рис.2) и сложная (как правило многослойная) структура. Из-за затухания эхо-сигнал от дефекта может находиться ниже порогового уровня чувствительности приемной части дефектоскопа, т.е. маскируется белым шумом (рис.3-а). Существующие методы эхо-контроля не решают проблемы выделения сигналов из шума, абсолютная чувствительность УЗ дефектоскопов ограничена "снизу" уровнем шума приемной части прибора. Увеличить амплитуду эхо-сигнала за счет увеличения зондирующего сигнала не удастся из-за ограничений, накладываемых на выходной каскад генератора, а в ряде случаев (при УЗ контроле взрывоопасных веществ) амплитуда сигнала ограничена объектом контроля. Таким образом, при УЗ эхо-контроле ПКМ возникает проблема обнаружения, выделения и измерения эхо-сигнала, замаскированного белым шумом. Для характеристики этой проблемы в работе вводится новое понятие - чувствительность к обнаружению эхо-сигнала, замаскированного шумом, которая характеризует соотношение уровней эхо-сигнала и белого шума. Эта чувствительность к обнаружению определяется энергией зондирующего сигнала и показывает, во сколько раз необходимо увеличить энергию зондирующего импульса, чтобы отношение эхо-сигнал/шум стало больше единицы. Увеличение чувствительности к обнаружению приводит также к увеличению абсолютной чувствительности контроля за счет уменьшения нижнего предела порогового уровня шума дефектоскопа.

Проблема выделения УЗ сигналов из белого шума впервые была поставлена в МЭИ в работах Аксенова В.П., Попова И.С. по использованию накопления периодических сигналов; в работах Точинского Е.Г., Питолина А.И., Рябова Г.Ю. по использованию фазированных антенных решеток, фокусирующих антенн. Другое направление, обеспечивающее выделение эхо-сигнала из шума, основанное на применении сложномодулированных импульсов - в основном ФМ сигналов - впервые (1974 г.)

было предложено автором настоящей работы [1] и активно развивается в МЭИ около 20 лет. В последние годы это направление получило активное развитие в ряде исследований в нашей стране и за рубежом.

Вторая проблема, возникающая при контроле многослойных ПКМ заключается в необходимости обеспечивать высокое разрешение по дальности отраженных от соседних слоев сигналов. Увеличить с этой целью частоту зондирующего сигнала (рис. 3, а) не удастся, т.к. при этом увеличивается затухание в изделии, уменьшается чувствительность к обнаружению. Уменьшение частоты не позволяет разрешить эхо-сигналы от соседних слоев (рис. 3, б). Следовательно, возникает противоречие между разрешающей способностью (необходимо повышать частоту) и чувствительностью к обнаружению (необходимо уменьшать частоту), которое не удастся разрешить ни при использовании накопления, ни при фокусировке, ни за счет каких либо других методов контроля. Решается эта проблема в настоящей работе за счет согласованной фильтрации (сжатии во времени) ЧМ и ФМ сигналов, а также за счет использования комплексной обработки эхо-сигналов, включающей в себя кроме согласованной фильтрации синхронное детектирование и двухканальную квадратурную обработку.

Третьей проблемой является проблема точного измерения временного положения эхо-сигнала, замаскированного шумом, возникающая, как правило, при эхо-импульсной толщинометрии авиационных ПКМ. В традиционных толщиномерах фиксация эхо-сигнала производится по переднему фронту эхо-импульса. В ПКМ из-за большого затухания УЗК форма импульса искажается, передний фронт затягивается, что приводит к появлению ошибки измерения (рис. 4, а). Ошибка также возникает из-за случайных выбросов шума (б), из-за влияния на фазу эхо-сигналов акустических сопротивлений слоев ПКМ (в) и т.д. Все это ограничивает применение существующих толщиномеров для контроля композитов. Проблема в работе решается также за счет оптимальной обработки эхо-сигналов.

Четвертая проблема заключается в появлении ошибки контроля из-за возникновения резонансных явлений (стоячих волн) при дефектоскопии многослойных изделий относительно протяженными сигналами. Эта проблема также решается за счет использования ФМ сигналов.

Еще одна проблема дефектоскопии композитов со сложной структурой заключается в выделении эхо-импульса из коррелированной с зондирующим сигналом помехи (структурного шума или ЭАН). При этом следует различать структурный шум в слоистых "регулярных" структурах и в средах со случайным распределением неоднородностей. Эхо-сигнал может быть как выше порога чувствительности дефектоскопа (рис. 5, а, в), так и ниже (б, г). При этом сигнал может замаскироваться

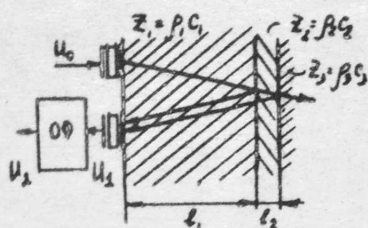


Рис. 1. Схема УЗ контроля.

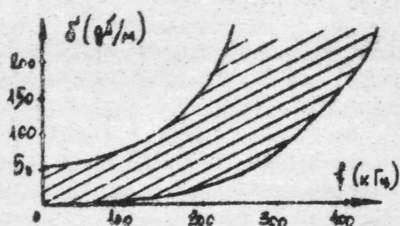


Рис. 2. Обобщенная зависимость затухания УЗК в ПКМ.

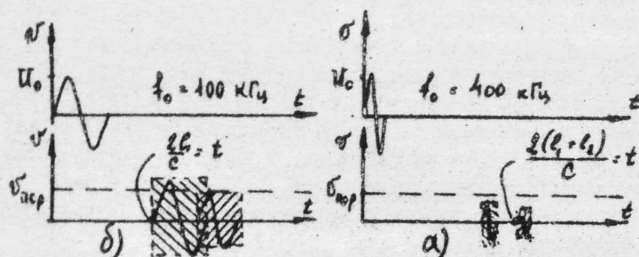


Рис. 3. Иллюстрация противоречия между чувствительностью к обнаружению и разрешающей способностью УЗ эхо-контроля ПКМ.

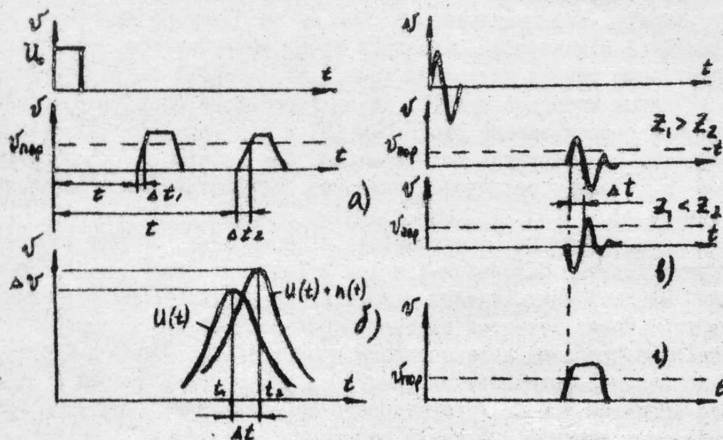


Рис. 4. Образование погрешностей при толщинометрии ПКМ за счет изменения формы сигнала (а), влияния шума (б), влияния акустических сопротивлений слоев ПКМ (в), эхо-сигнал после СД (г).

структурным шумом (в,г). Пути решения этой проблемы предлагаются в работе при использовании оптимальной ПВ обработки эхо-сигналов.

Наличие большого количества различных по характеристикам ПКМ и изделий из них, разнообразие свойств композитов приводит к появлению качественно новой проблемы - невозможности создания для каждого нового материала своего УЗ дефектоскопа и тем самым к необходимости создания многофункционального адаптивного автоматизированного прибора УЗ контроля, с помощью которого за счет гибкой адаптации параметров сигнала под характеристики контролируемого прибора возможно осуществлять контроль различных по свойствам ПКМ и изделий из них.

Решению этих проблем и посвящено содержание диссертации.

В третьей главе рассматриваются основные положения оптимальной фильтрации сигналов применительно к контролю изделий с большим затуханием УЗК и неоднородной структурой. Т.к. задача обнаружения и выделения эхо-сигнала из белого шума подобна радиотехническим задачам, то возможно для УЗ эхо-контроля воспользоваться применяемым в радиолокации критерием максимального правдоподобия, обеспечивающим минимальную вероятность ошибочного решения одновременно о наличии "ложной тревоги" и "пропуске сигнала". В теории обнаружения сигналов этот критерий реализуется через отношение правдоподобия, показывающее, насколько правдоподобнее предположение о приеме сигнала от дефекта $V_1(t)$ в принимаемом сигнале $U_1(t)$, чем предположение об его отсутствии. Для белого шума ($F_1(\omega) = N_0/2 = \text{const}$, где N_0 - спектральная интенсивность белого шума) отношение правдоподобия запишется:

$$P(u_1) = \exp \left\{ -\frac{E_1}{N_0} + \frac{2}{N_0} \int_{-\infty}^{\infty} U_1(t) u_1(t) dt \right\} \quad (1)$$

где E_1/N_0 - отношение сигнал/шум, $\int_{-\infty}^{\infty} U_1(t) u_1(t) dt = R_E(t)$ - значение ФВК сигналов $U_1(t)$ и $V_1(t)$. Из (1) следует, что оптимальный обнаружитель должен производить вычисление ФВК. Эту операцию осуществляет согласованный с сигналом ОФ, максимизирующий отношение пика сигнала к среднеквадратичному значению шума на выходе фильтра $\sqrt{V_{u_1}^2}$:

$$\frac{V_1(t)}{\sqrt{V_{u_1}^2}} = \frac{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_1(\omega) K(\omega) e^{j(\omega t_0 + \varphi_s + \varphi_k)} d\omega}{\sqrt{N_0/2\pi \int_{-\infty}^{\infty} |K(\omega)|^2 d\omega}} \quad (2)$$

Это отношение становится максимально возможным:

$$\frac{V_1(t)}{\sqrt{V_{u_1}^2}} = (2E_1/N_0)^{1/2} \quad (3)$$

и зависит только от энергии зондирующего сигнала $E_1 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S_1(\omega)|^2 d\omega = \int_0^{t_0} V_1^2(t) dt$ при выполнении двух условий:

$$\varphi_k(\omega) = -[\varphi_s + \omega t_0] \quad (4)$$

$$K(\omega) = \xi S_1(\omega), \text{ где } \xi = \text{const} \quad (5)$$

Из (4) следует, что фазовая характеристика ОФ $\varphi_k(\omega)$ должна быть такова, чтобы ОФ осуществлял компенсацию начальных фаз всех гармонических составляющих φ_s сигналов. В момент $t=t_0$ все составляющие

сигнала должны когерентно складываться (накапливаться) с образованием пика сигнала на выходе ОФ. При этом форма сигнала на выходе ОФ отличается от формы сигнала на входе и определяется АКФ $R_a(t)$:

$$V_2(t_0) = \frac{\zeta}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S_1(\omega)|^2 e^{j\omega(t-t_0)} d\omega = \zeta \int_{-\infty}^{\infty} V_1(t) V_1(t-t_0) dt = \zeta R_a(t_0) \quad (6)$$

Из (5) следует, что модуль передаточной функции ОФ $K(\omega)$ отличается от модуля спектральной характеристики сигнала только на постоянную ζ , т.е. ОФ пропускает без искажений полезный сигнал, а входной равномерно распределенный шум ограничивается, подавляется в ОФ. Таким образом из положений радиотехники следует, что УЗ дефектоскоп для контроля ПКМ с большим затуханием УЗК должен включать в себя ОФ, осуществляющий накопление полезного сигнала (4) и режекцию помехи (5) с целью обеспечения максимального отношения сигнал/шум (максимального значения чувствительности к обнаружению). При этом индикация сигнала должна производиться не по временной копии сигнала, а по его АКФ (6). Следовательно и выбор оптимального сигнала следует производить по АКФ.

Проблема разрешения двух и более эхо-сигналов на фоне шума является статистической задачей, и поэтому оптимальная фильтрация сигналов, обеспечивающая максимизацию отношения сигнал/шум, является обязательным условием для обеспечения высокого разрешения. Минимальная разность $\Delta V(t)$ разрешаемых сигналов $V_1(t)$ и $V_2(t)$ будет тем меньше, чем меньше средний квадрат разности этих сигналов:

$$(\overline{\Delta V})^2 = \int_{-\infty}^{\infty} [V_1(t) - V_2(t)]^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} V_1^2(t) dt + \int_{-\infty}^{\infty} V_2^2(t) dt - 2 \int_{-\infty}^{\infty} V_1(t) V_2(t) dt = E_1 + E_2 - 2R_g(t) \quad (7)$$

откуда видно, что максимальное разрешение два сигнала будут иметь, если они являются взаимноортогональными, т.е. если ФВК $R_g(t) \rightarrow 0$.

В случае разрешения двух одинаковых сигналов ФВК становится их АКФ, следовательно для обеспечения высокого разрешения по дальности необходимо выбирать зондирующие сигналы длительностью T_c , АКФ которых была бы максимальной только в коротком интервале - области высокой корреляции $T_k \ll T_c$ и на остальном протяжении АКФ должна быть минимальной. В этом случае можно получить высокую разрешающую способность по дальности $\Delta r = c T_k / 2 \ll c T_c / 2$. Среди различных сигналов наилучшими свойствами для целей эхо-контроля обладают ФМ и ЧМ сигналы, имеющие один четко выраженный максимум и малый уровень боковых лепестков. Для ФМ сигнала Баркера длительностью $T_c = 13 T_k$ АКФ представляет собой "сжатый" в $N_0 = 13$ раз по времени импульс с увеличением амплитуды главного максимума в $N_0 = 13$ раз (рис. 6). Эффект одновременного увеличения чувствительности и разрешающей способности эхо-контроля многослойного изделия с большим затуханием УЗК за счет сжатия ФМ сигнала показан на рис. 7, где до

ОФ эхо-сигналы не разрешались во времени и находились ниже порога(б). После ОФ эхо-сигналы выделяются из шума и разрешаются(в).

При толщинометрии изделий с большим затуханием УЗК точность измерения временного положения эхо-сигнала, замаскированного шумом тем выше, чем больше отношение сигнал/шум и чем выше эффективная ширина спектра зондирующего сигнала Пз. При этом ошибка в измерении $\hat{b}_{2m,n}^2$ определяется: $\hat{b}_{2m,n}^2 = (2E_1/N_0 \cdot T_s)^{-1}$, откуда следует алгоритм построения схемы УЗ толщинометра: необходимо использование широкополосного сигнала и его оптимальной фильтрации; т.к. на выходе ОФ индикация производится по максимуму АЧФ сигнала, то в схеме необходимо дифференцирующее устройство(ДУ), определяющее максимум и обеспечивающее на выходе схемы сравнения (СС) выделение максимума(рис.8).

Теория оптимальной обработки сигналов позволяет решить проблему увеличения отношения сигнал/шум в случае коррелированной с сигналом помехи - структурным шумом. Согласно теории В.А. Котельникова об оптимальном приемнике для небелого шума, ОФ в этом случае разбивается на два: - первый фильтр осуществляет декорреляцию сигнала и помехи, приводит помеху на выходе фильтра к белому шуму. Второй фильтр, включенный последовательно с первым, является ОФ для белого шума, накапливает полезный сигнал и подавляет помехи. Коэффициент передачи ОФ для смеси сигнала с белым шумом определится:

$$K_{\Sigma}(\omega) = K_1(\omega)K_2(\omega) = \frac{N_0 B S_1(\omega)}{2 F_1(\omega)} e^{-j\omega t_0} \quad (8)$$

ОФ должен иметь передаточную характеристику, прямо пропорциональную комплексно-сопряженной спектральной плотности сигнала и обратно пропорциональную энергетическому спектру входного шума. В том случае, когда энергетический спектр структурного шума совпадает с энергетическим спектром зондирующего сигнала $F(\omega) = [S(\omega)]^2$, мы имеем дело с помехой, полностью коррелированной с эхо-сигналом от дефекта. Выделение "полезного" эхо-сигнала от дефекта из такой помехи без предварительной декорреляции сигнала и помехи невозможно. На примере простейшего зондирующего сигнала - прямоугольного видеопульса показано, что декорреляция сводится при одноканальном контроле к укорочению эхо-сигналов во времени, позволяющему разделить и различить эхо-сигналы от дефекта и отражения от структурных неоднородностей. Однако укорочение сигналов, являясь необходимым условием, не является достаточным, т.к. при одноканальном контроле не учитывается пространственный характер структурного шума и поэтому не обеспечивается выделение эхо-сигнала из структурного шума (рис.9). Приведенные в главе положения оптимальной фильтрации применительно к задачам эхо-контроля ПКМ определили направление в развитии методов и устройств УЗ контроля изделий с большим затуханием

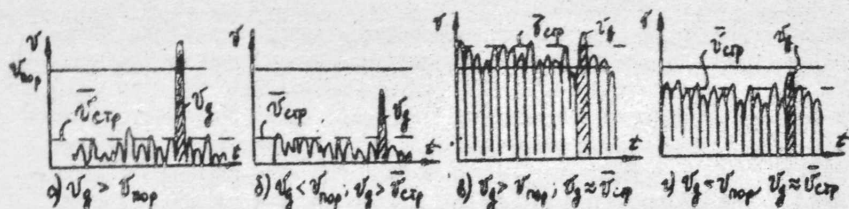


Рис. 5. Различные варианты соотношения амплитуды эхо-сигнала от дефекта, напряжения порога дефектоскопа и среднего уровня структурного шума $\bar{V}_{ср}$ при УЗ контроле ПКМ.

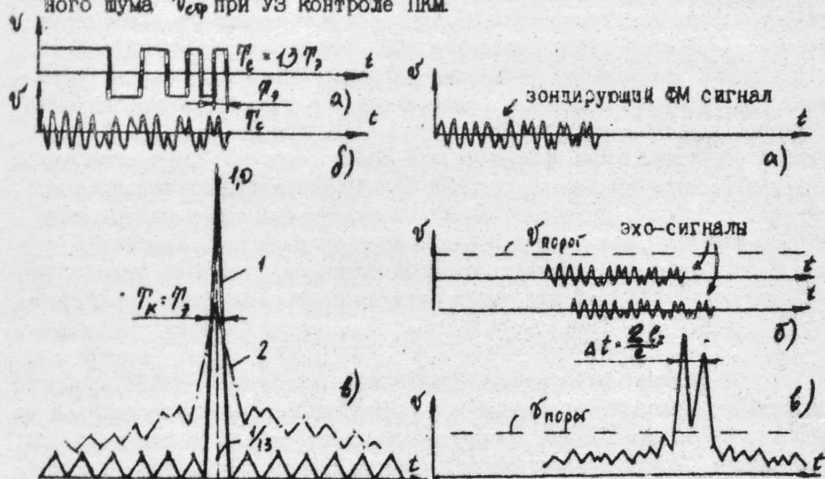


Рис. 6. Видеокод баркера $N=13$ (а), ФМ сигнал (б), АКФ сигнала (в).

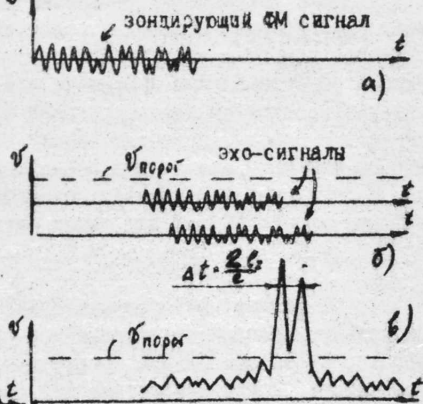


Рис. 7. разрешение сжатых ФМ эхо-сигналов и выделение их из шума.

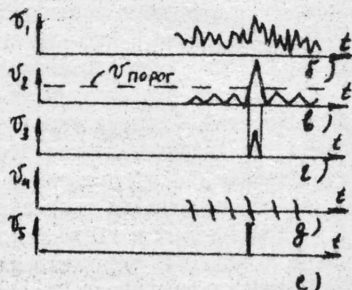
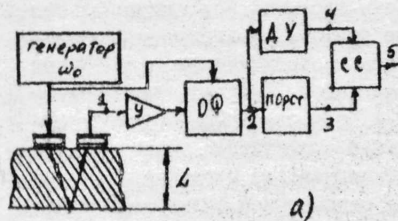


Рис. 8. Структурная схема УЗ эхо-импульсного толщиномера с оптимальной фильтрацией эхо-сигнала (а) и временные диаграммы (б-е).

УЗК и сложной структурой, составивших содержание последующих глав.

В четвертой главе рассматриваются вопросы использования положений оптимальной фильтрации для простых, узкополосных ($\Delta f \ll 1/T_c$) немодулированных сигналов с базой $B = \Delta f T_c \gg 1$. Показывается, что наибольший эффект достигается при комплексной оптимальной обработке, включающей наряду с согласованной фильтрацией синхронное детектирование и двухканальную квадратурную обработку, что обеспечивает выделение эхо-сигнала из помех, расположенных вне спектра сигнала, переносит обработку сигнала на видеочастоту, устраняет информацию о начальной фазе эхо-сигнала. Использование комплексной оптимальной обработки позволило предложить и реализовать:

а/ методы контроля, обеспечивающие частичное подавление коррелированной помехи - ЭАН с улучшением отношения сигнал/шум не менее чем в два раза (рис. 10). В этом случае спектр сигнала $S_s(w)$, излучаемого в изделие с большим затуханием УЗК соответствует спектру ЭАН $S_n(w)$, образуемой при просачивании части сигнала с излучающего преобразователя на приемный (а). При относительно низкой частоте сигнала (100 кГц) сигнал наводки имеет большую длительность и маскирует эхо-сигналы от дефектов. При большом затухании УЗК в изделии спектр эхо-сигнала $S_l(w)$ не соответствует спектру $S_n(w)$ из-за ослабления ВЧ составляющих эхо-сигнала (б), максимум спектра эхо-сигнала перемещается на частоту $w_1 < w_0$. Таким образом, в среде происходит из-за частотнозависимого затухания сигнала разделение (декорреляция) эхо-сигнала и помехи. После СД и фильтра с граничной частотой w_{cp} спектр эхо-сигнала не ослабляется, а спектр ЭАН частично подавляется (г), что увеличивает отношение сигнал/помеха.

б/ методы сверхвысокого разрешения частично перекрывающихся эхо-сигналов, что позволяет однозначно идентифицировать эхо-сигналы от групп близко расположенных дефектов и увеличивает разрешающую способность по дальности не менее, чем в 2 раза по сравнению с предельными значениями, получаемыми при эхо-контроле сигналами без оптимальной обработки. Частично перекрывающиеся во времени эхо-сигналы от близко расположенных слоев в традиционных УЗ эхо-импульсных дефектоскопах без оптимальной обработки однозначно не разрешаются из-за интерференции этих сигналов. Если два эхо-сигнала (рис. 11, а) синфазны ($\Delta \varphi = 0^\circ$), то их сумма (б) имеет вид "одногорбого" импульса. Когда фазы сигналов отличаются на 180° , то их сумма (в) имеет вид "двугорбого" импульса - тем самым в зависимости от соотношения фаз эхо-сигналов могут быть различные суждения о разрешении эхо-сигналов и о наличии дефектов. Из зависимости относительной величины "провала" $V_{сн} = \frac{\Delta V}{V_0}$ от величины сдвига фазы двух эхо-сигналов (г, кривая 1) видно, что однозначно разрешить два

частично перекрывающихся АМ сигнала не удается (на рис.11, д показан типичный вид эхо-сигналов в УЗ дефектоскопах без оптимальной обработки). Для разрешения частично перекрывающихся импульсов используется комплексная обработка эхосигналов. При этом (г, кривая 2) сигналы разрешаются практически при любом φ . Для частично перекрывающихся импульсов треугольной формы разрешающая способность становится еще выше (кривая 3). Еще больший эффект ($\Delta\tau \approx \lambda/2$) получается при использовании ФМ сигналов (рис.11, е.).

в/ методы толщинометрии многослойных сред, в которых устраняется ошибка, возникающая из-за переворота фазы эхо-сигналов, отражающихся от слоев с различными акустическими сопротивлениями, т.к. при комплексной обработке эхо-сигнала устраняется информация о начальной фазе эхо-сигнала. В результате эхо-сигналы от границ раздела сред с различными акустическими сопротивлениями Z_1 и Z_2 (рис.4, в) не будут зависеть от начальной фазы (φ), тем самым решается проблема точности измерения временного положения сигнала.

г/ разработать и внедрить ряд методов и устройств УЗ толщинометрии многослойных авиационных изделий из ПКМ, основанных на оптимальной фильтрации АМ импульсов, пачек импульсов малой скважности, ФМ импульсов, обеспечивающих повышение точности измерения временного положения эхо-сигнала за счет индикации по максимуму АКФ сигнала. На примере для ФМ сигнала видно (рис.6, в), что при искажении эхо-сигнала его АКФ также искажается, но временное положение пика при определенных условиях неизменно (кривая 2). Точность измерения временного положения при этом тем выше, чем больше база зондирующего сигнала. Из этого следует принцип построения схем УЗ толщиномеров (рис.8), обеспечивающих решение проблем, показанных на рис.4, а, б, в.

В пятой главе рассматриваются вопросы применения накопителей периодических немодулированных сигналов при УЗ контроле ПКМ. Показывается необходимость использования накопления сигналов для выделения сигналов, замаскированных шумом. Приводятся результаты применения предложенных и реализованных цифровых компьютерных накопителей, обеспечивающих накопление большого числа импульсов ($n \approx 1000$), что улучшает выделение эхо-сигнала из шума в $\sqrt{n}$ раз. На рис.12 показаны результаты выделения из шума УЗ АМ эхо-сигналов (400 КГц) после накопления в $n = 8$ раз в разработанном компьютерном дефектоскопе.

С целью увеличения чувствительности и точности измерения временного положения эхо-сигнала при толщинометрии протяженных изделий (рис.13, а) предложено использование накопления короткой пачки АМ импульсов с малой скважностью-малым периодом повторения T_p (б).

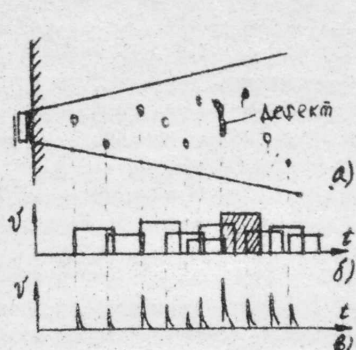


Рис. 9. Упрощенная одноканальная модель формирования структурного шума (а), структурный шум до (б) и после (в) декоррелирующего фильтра.

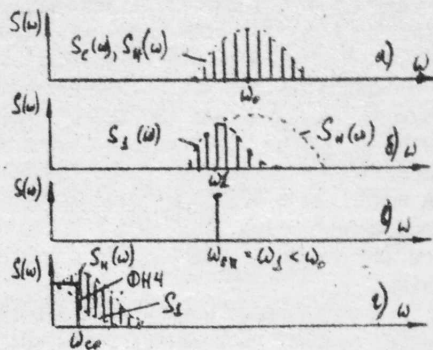


Рис. 10. Декорреляция и подавление части сигнала эл. электроакустической наводки с помощью синхронного детектирования.

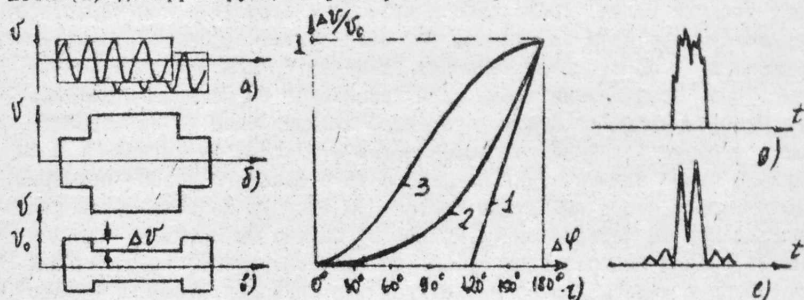


Рис. 11. Разрешение частично перекрывающихся сигналов (а) при синфазном (б) и противофазном (в) сложении, зависимость $\Delta V/V_0$ от фазы перекрывающихся сигналов (г), вид частично перекрывающихся сигналов АМ (д) и сжатый ФМ (е).

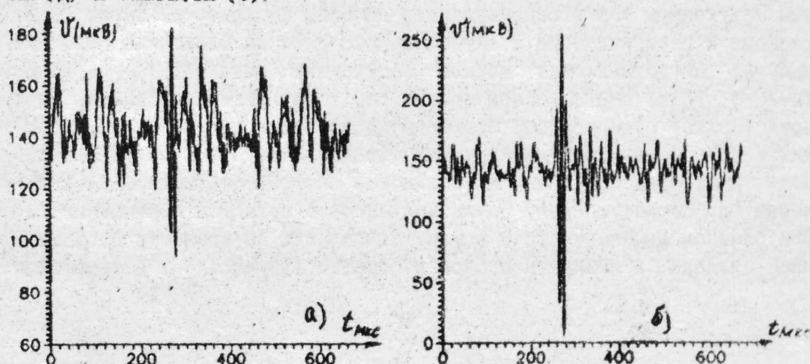


Рис. 12. Эхо-сигналы до накопления (а) и после (б) в компьютерном дефектоскопе (число циклов накопления $n=8$)

Эхосигналы до ОФ находятся ниже порога чувствительности (в), после накопления в ОФ сигнал выделяется из шума. Толщина изделия L определяется по времени $T=2L/C$ от конца пачки до максимума АКФ (г).

Приведены результаты исследований по контролю слоистых сред пачками периодических импульсов. Показано, что акустический слой ведет себя (рис.14,а) подобно известной в радиотехнике схеме рециркулятора-квазиоптимального фильтра для пачки импульсов (б). Пачка импульсов с периодом T_p после прохождения рециркулятора и после прохождения слоя $l_{сл} = cT_p/2$ имеет одинаковый вид (в). Таким образом, для описания слоя следует использовать характеристики рециркулятора.

Использование модели слоя в виде рециркулятора позволило провести анализ прохождения различных сигналов через слои. В частности, это позволило сформулировать, обосновать и практически подтвердить эффект "нерезонансного" прохождения через слой ФМ сигналов. При прохождении через слой относительно "длинного" гармонического сигнала из-за интерференции внутри слоя (рис.15,а) возникают стоячие волны, приводящие к известной периодической частотной характеристике слоя (в, кривая 1). Именно этот эффект ограничивает применение в УЗ эхо-дефектоскопии "длинных" гармонических сигналов. При прохождении через слой "длинного" ФМ сигнала отдельные его части никогда не будут когерентно складываться (б) и образовывать стоячие волны из-за особенностей структуры ФМ сигнала - в ФМ сигнале число элементарных импульсов T_z с фазами 0° и 180° примерно одинаковое. В итоге амплитуда сжатого ФМ сигнала не искажается после прохождения ФМ через слой (в, кривая 2). Сжатые ФМ сигналы, отраженные от границ многослойной среды не интерferируют, обеспечивая достоверную информацию об амплитудах эхо-сигналов. Эффект нерезонансного прохождения ФМ сигналов через слои объясняет преимущества использования ФМ сигналов при УЗ эхо-контроле многослойных изделий.

Использование этой модели слоя позволило создать модель структурного шума, возникающего в многослойной среде (при $\lambda < L$) с малым затуханием УЗК и рекомендовать способы УЗ контроля таких сред. Реакция и рециркулятора, и акустического слоя на одиночный короткий импульс представляется пачкой затухающих импульсов с периодом $T_p=2L/C$. Для многослойной среды (рис.16,а) сигнал на выходе слоя представляет суперпозицию большого числа таких пачек, накладывающихся друг на друга и маскирующих отражения от дефекта. Для контроля таких сред предложен и реализован способ, основанный на излучении в слоистую среду пачки импульсов с периодом повторения T_p . При плавном изменении T_p в момент совпадения со временем прохождения сигнала в конкретном слое и обратно ($T_{p1}=2L_1/C_1$) в этом слое

происходит резонансное накопление импульсов пакки с виделением максимума накопленного сигнала из структурного шума (8). Дальнейшее адаптивное изменение T_p приводит к резонансному совпадению $T_{p2} = 2L_2/C_2(n)$ и т.д. Сравнение этого метода с известным спектральным методом контроля многослойных сред показало преимущество предложенного способа при числе слоев $n > 3$.

В шестой главе обсуждаются свойства ФМ сигналов, устройства формирования и обработки ФМ сигналов и результаты контроля разработанной аппаратурой различных изделий.

У ФМ сигналов база $B_{FM} = T_c \Delta f_{FM} = T_c / T_{сж} = N \gg 1$. База определяет и чувствительность к обнаружению и точность измерения временного положения эхо-сигнала. ФМ сигнал является широкополосным, полоса сигнала $\Delta f_{FM} \ll 1/T_{сж} = 1/T_z \gg 1/T_c$. Следовательно для неискаженной передачи ФМ сигналов в ЭАТ дефектоскопа необходимо обеспечить соответствующую полосу пропускания преобразователей. Анализ искажений ФМ сигналов в ЭАТ показывает, что при $\Delta f_{FM} / \Delta f_{ЭАТ} \ll 1$ происходит искажение максимума АКФ сигнала, возрастают боковые лепестки, однако временное положение максимума АКФ неизменно (кривая 2 на рис. 6, в), что позволяет получить высокую точность измерений при использовании ФМ сигналов в УЗ эхо-толщинометрии. Сравнение сигналов показывает, что ФМ сигнал является наиболее помехоустойчивым по сравнению с ЧМ и АМ сигналами.

С учетом сказанного на рис. 17 приведена структурная схема УЗ дефектоскопов УЗД-ФМ-1 - УЗД-ФМ-5 со сжатием ФМ сигналов Варкера (имеющих наилучшие соотношения главного и бокового лепестков $1/N$), ФМ М-сигналов, а так же ^{используемых} элементарных пары сигналов Варкера ($N_6 = 11$ и $N_6 = 13$) и Голея ($N_7 = 8$), обеспечивающих при попарном сложении идеальный вид АКФ без боковых лепестков с увеличением динамического диапазона амплитуд сигналов (УЗД-ФМ-4 и УЗД-ФМ-5).

Из процедуры сжатия видеокода Варкера $N_6 = 13$ (рис. 18) видно, что образование максимума ФМ сигнала происходит при когерентном сложении элементарных импульсов. Все N элементарных импульсов складываются арифметически, а шумы суммируются геометрически с увеличением отношения сигнал/шум в $\sqrt{N}$ раз. При этом в ФМ происходит "внутриимпульсное накопление" N импульсов. Таким образом, механизм сжатия ФМ сигнала подобен механизму накопления периодических сигналов с периодом T_p , однако при внутриимпульсном накоплении ФМ сигнала действие в T_p/T_z раз больше. Использование ФМ сигналов Варкера позволило увеличить чувствительность к обнаружению в $\sqrt{N}$ раз, понизить порог чувствительности дефектоскопа и увеличить абсолютную чувствительность на эту же величину. В том случае, когда эхо-сигнал выше уровня шума, то сжатие ФМ сигнала эквивалентно усилению

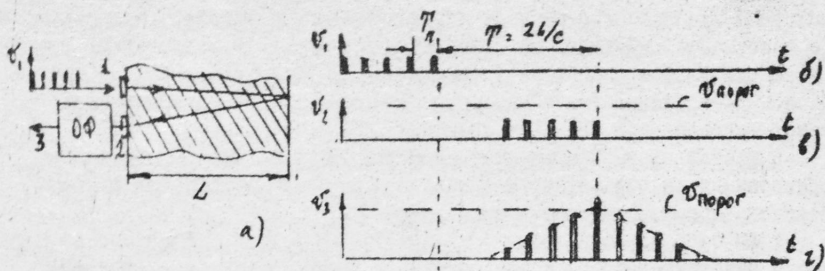


Рис. 13. Измерение толщины протяженного изделия пачкой импульсов с малым периодом повторения T_n с использованием ОФ - накопителя.

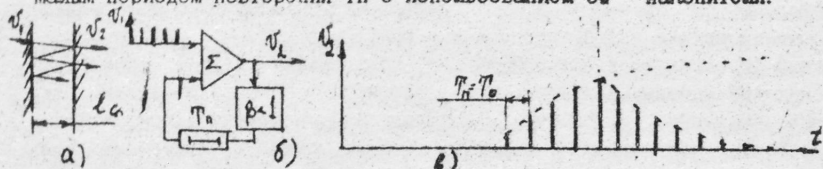


Рис. 14. Представление акустического слоя (а) в качестве накопителя (рециркулятора) (б), накопленный сигнал на выходе слоя (в).

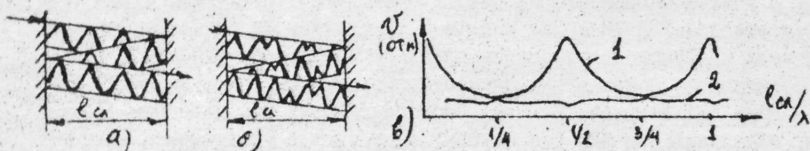


Рис. 15. Прохождение через слой гармонического (а) и ФМ (б) сигналов. Зависимость амплитуд гармонического (1) и сжатого ФМ (2) сигналов на выходе слоя.

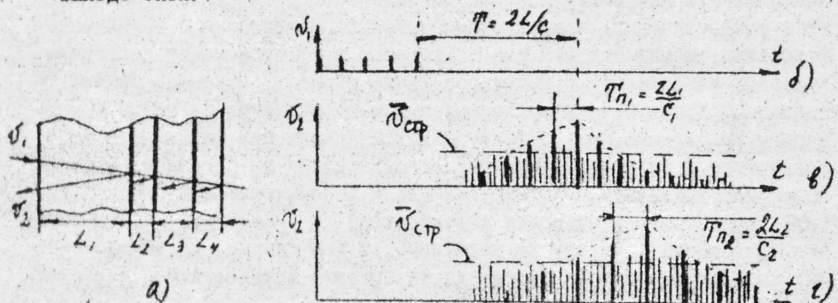


Рис. 16. Контроль многослойного изделия пачкой импульсов с регулируемым периодом повторения T_n .

сигнала в N раз и во столько же раз увеличивается абсолютная чувствительность. Преимущества использования ФМ сигналов иллюстрируются на временных диаграммах рис.19, полученных в компьютерном дефектоскопе до сжатия сигнала, когда сигнал замаскирован шумом (а) и после сжатия в ОФ (б,в). При этом на (б) показано сжатие радиосигнала, на (в) - сжатый ФМ сигнал после комплексной оптимальной обработки по схеме рис.17. Сигналы Баркера, имеющие наилучший для УЗ контроля вид АКФ, имеет максимальную базу $N_0=13$. Значительно увеличить базу сигнала позволяют ФМ М-сигналы. База М-кода равна $M-2^N-1$. Для $n=5$ код М-31 имеет вид: 1000010010110011111000110111010. АКФ М-сигнала имеет соотношение главного и бокового лепестков $1/\sqrt{N}$, однако использование непрерывного периодического режима следования сигнала позволяет получить АКФ с соотношением лепестков $1/N$. Использование М-сигналов в непрерывном режиме генерации позволило впервые создать свособразный УЗ эхо-импульсный способ контроля при излучении в изделие непрерывного колебания (рис.20) - (первая публикация автора - 1978 г. [4], первая публикация за границей - 1982 г.). При совпадении $T_c = M T_z$ и периода развертки осциллографа T_p для фиксированной амплитуды V_0 в изделие излучается сигнал с максимальной энергией $E = V_0^2 T_c$, что обеспечивает максимальную чувствительность. Для $M=121$ в УЗД-ФМ-3 чувствительность к обнаружению возросла в $\sqrt{121}$ раз. В главе приводятся результаты экспериментов по толщинометрии ПКМ, по контролю изделий с аномально высоким затуханием, по контролю многослойных изделий (в том числе с обеспечением сверхвысокого разрешения частично перекрывающихся эхо-сигналов от близко расположенных слоев ПКМ), которые свидетельствуют о преимуществах использования ФМ сигналов с оптимальной обработкой эхо-сигналов в УЗ дефектоскопии.

В главе рассматривается применение ортогональных сигналов в УЗ дефектоскопии (т.е. сигналов, у которых $F_{BK}=0$; эти сигналы являются статистически независимыми, они различаются от друга с помощью ОФ для каждого из сигналов). Использование ортогональных сигналов позволяет создавать многоканальные методы УЗ контроля, в которых излучаются (принимаются) ансамбли сигналов по независимым каналам одновременно. Для увеличения числа каналов автором внедрены в практику контроля ансамбли взаимноортогональных ФМ М-сигналов с одинаковыми базами, различающиеся законом кодирующих последовательностей. У двух ортогональных ФМ сигналов нормированная ФБК: $R_6(t) = \frac{1}{\sqrt{B_1 B_2}} \int V_1(t) V_2(t - \tau) dt \sim \frac{1}{\sqrt{N N_2}} = 1/N = 1/B$. При больших базах $B \rightarrow \infty, R_6(t) \rightarrow 0$, за счет этого сигналы становятся взаимноортогональными и их можно различить при одновременном излучении по одному или по соседним близко расположенным каналам.

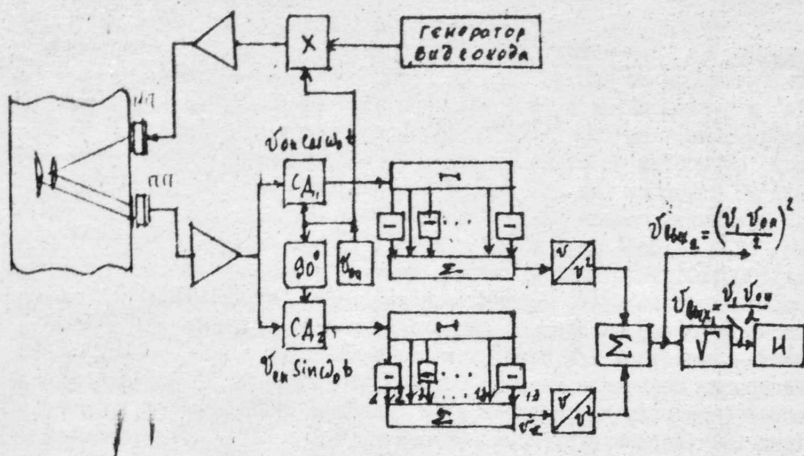


Рис. 17. Структурная схема УЗ эхо-импульсного дефектоскопа с оптимальной обработкой ФМ сигнала.

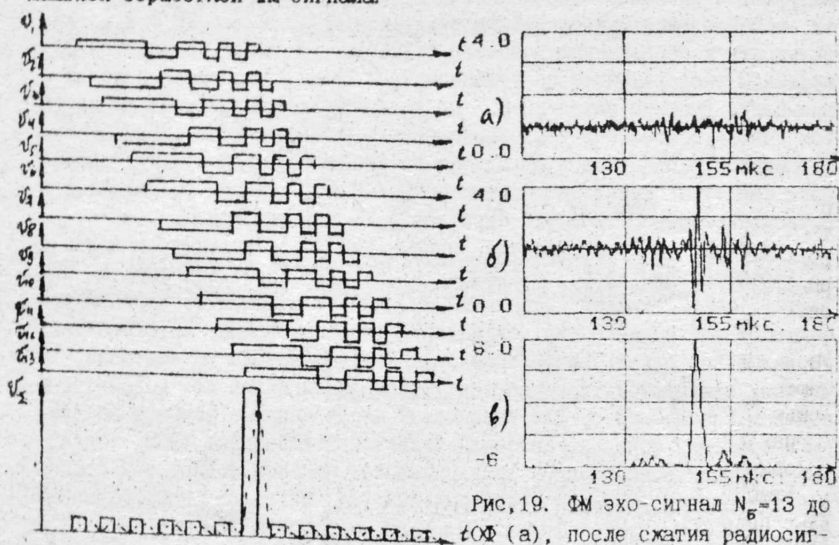


Рис. 18. Процедура сжатия видеоскода Баркера в согласованном фильтре.

Рис. 19. ФМ эхо-сигнал $N_6=13$ до сжатия радиосигнала (а), после сжатия радиосигнала (б), после оптимальной обработки в компьютерном дефектоскопе по алгоритму рис. 17- (в)

Использование ансамблей ортогональных ФМ М-сигналов позволило создать ряд методов и устройств многоканального контроля с целью увеличения производительности контроля (рис. 21,22) и для создания новых методов визуализации дефектов (рис.22). Предложен и внедрен метод контроля качества адгезии многослойных ПКМ, заключающийся в синхронном использовании двух ортогональных сигналов - низкочастотного "удара" (под действием которого в результате мембранного резонанса выявляется плотноприжатый непоклей между слоями ПКМ) и высокочастотного ФМ сигнала (с помощью которого в момент выявления непоклей производится зондирование ПКМ). Преимущество ФМ сигнала в этом случае проявляется также за счет помехоустойчивости ФМ сигнала к импульсным помехам, возникающим при НЧ "ударе". В разделе приведены оригинальные устройства формирования УЗ ФМ сигналов непосредственно в контролируемой среде, а так же ряд устройств, в которых УЗ ФМ и ЧМ сигналы обрабатываются в акустических ОФ для этих сигналов без промежуточного ЭА преобразования акустического эхо-сигнала в электрический, что увеличивает эффективность обработки сигналов (рис.23).

В седьмой главе рассматриваются свойства ЧМ сигналов применительно к задачам УЗ контроля, методы и устройства контроля ПКМ, основанные на использовании ЧМ сигналов. ЛЧМ так же, как и ФМ сигналы сжимаются в ОФ до импульсов малой длительности с увеличением амплитуды главного максимума АЧФ. Как правило для сжатия ЛЧМ сигналов используется аналоговый ОФ - дисперсионная УЗ линия задержки (ДУЛЗ), в которой все частотные гармоники ЛЧМ сигнала, задерживаясь на равное время, складываются в фазе с образованием максимума сжатого сигнала (рис.23,а). ДУЛЗ представляет собой звуковод в виде алюминиевого стержня с естественной дисперсией с пьезопреобразователями на торцах. На рис.23,б показана предложенная схема обработки УЗ ЛЧМ сигнала в ДУЛЗ без промежуточного двойного ЭА преобразования. Аналогичные решения были реализованы с ОФ для ФМ и ЧМ сигналов на ПАВ.

К недостаткам и ФМ и ЧМ сигналов можно отнести сложность в построении ОФ для сигналов с большой базой $B > 100$. Для использования сигналов с большой базой в работе был предложен и внедрен способ УЗ эхо-контроля, в котором используются ЛЧМ сигналы большой длительности со "спектральной" обработкой эхо-сигнала. В этом методе в изделие излучается ЛЧМ сигнал большой длительности (рис.24) с девиацией частоты Δf_d . Эхо-сигнал (пунктир на рис.24,а) сравнивается в СД с зондирующим сигналом, на выходе СД выделяется разностная частота - частота биений $F_b = f_1 - f_2$ (б). Величина F_b прямо пропорциональна толщине измеряемого изделия: $F_b = \frac{84 \Delta f_z}{C T_M}$ выделяется

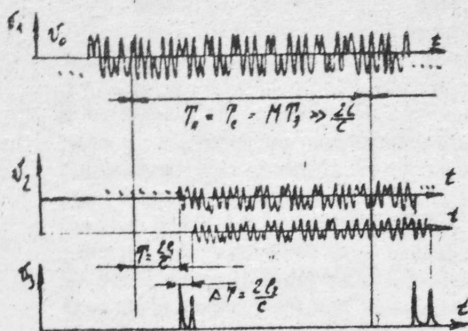


Рис. 20. Эхо-контроль двухслойной среды непрерывными ФМ М-сигналами (а), эхо-сигналы до (б) и после (в) ОФ.

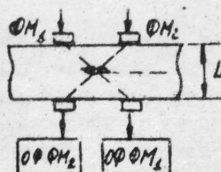
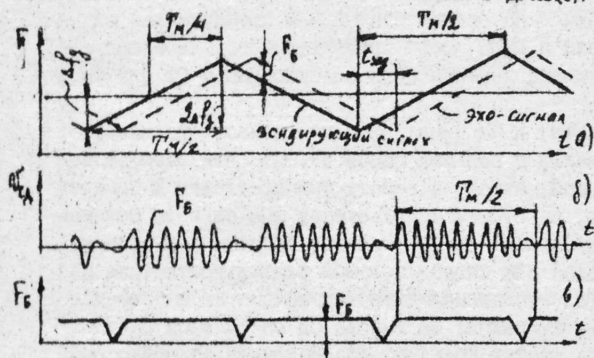


Рис. 21. Определение координат дефекта при теневом контроле (Х-метод) ортогональными ФМ сигналами.



24. Бременные диаграммы УЗ толщиномера со спектральной обработкой ЛЧМ сигнала.

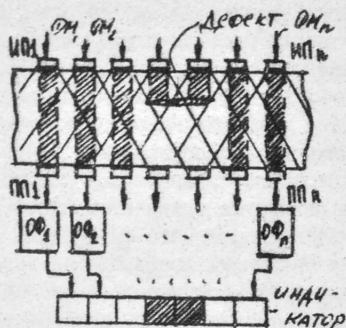


Рис. 22. Увеличение производительности контроля, визуализация дефектов при одновременном излучении ортогональных ФМ сигналов.

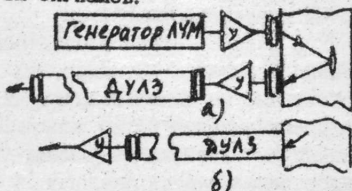


Рис. 23. Структурная схема УЗ дефектоскопа со сжатием ЛЧМ сигнала (а) и с непосредственным сжатием УЗ ЛЧМ сигнала в ДУЗ (б).

$$L = \frac{CF_0}{8\Delta f_g F_m} = K F_0$$

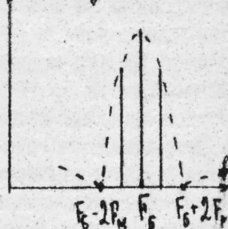


Рис. 25. Спектр биений эхо-сигнала на экране спектроанализатора.

спектроанализатором и представляет собой спектр последовательности импульсов, следующих с периодом $T_m/2$ со средней частотой F_0 (в). Задача измерения толщины изделия сводится к измерению F_0 : $L = \frac{c F_0}{8 \Delta f F_m} = k F_0$. В разработанном толщиномере точность определения толщины определяется расстоянием между спектральными линиями F_0 и $F_0 + F_m$ (рис. 25), т.е. при дискретном спектре определяется величиной $1/T_m$ и при большом T_m (т.е. при больших базах) дискретность измерения практически не проявляется и точность измерения может быть легко увеличена. В реализованном толщиномере с ЛЧМ сигналом с $B_{\text{экв}} = 10^3$, $T_m = 0,01$ с, $2\Delta f_d = 100$ кГц, $f_0 = 200$ кГц, погрешность измерения не превышала 4% и была выше, чем у эхо-толщиномеров.

В восьмой главе обсуждается вопрос выделения эхо-сигналов из коррелированных помех. В предыдущих главах показывалось применение оптимальной обработки для выделения эхо-сигнала из коррелированной с ним ЭАН (рис. 10), а также из структурного шума регулярной (многогослойной) среды. В обоих этих случаях проводился одноканальный контроль, декорреляция эхо-сигнала от дефекта и помехи осуществлялась в контролируемом изделии за счет частотной зависимости коэффициента передачи контролируемой среды. Полученные при контроле ПКМ результаты позволили сформулировать принципы выделения эхо-сигналов из коррелированных помех: - декорреляция эхо-сигнала и помехи, накопление полезного сигнала, подавление помехи. Эти принципы верны и для изделий со случайным распределением в объеме акустических неоднородностей.

Традиционные методы УЗ дефектоскопии рекомендуют использовать для таких сред короткие сигналы и преобразователи с узкой ДН, однако эти рекомендации не всегда дают эффект, т.к. в них не учитываются требования оптимальной обработки сигналов. Структурный шум в таких изделиях (в основном в металлах) носит пространственно-временной характер и эхо-контроль должен осуществляться пространственно разнесенными преобразователями (рис. 26) или при относительном перемещении дефекта (изделия) и аппаратуры контроля. В том случае, когда дефект находится в поле ДН каждого из преобразователей с шириной ДН $\theta(a, b)$, реализации структурного шума в каждом из каналов независимы. При накоплении в сумматоре за счет когерентного суммирования эхо-сигналов от дефекта удается увеличить отношение сигнал/шум. На рис. 26 показаны результаты накопления в двух каналах (в) и в N каналах (г). Условий сложения в сумматоре менее жестки, если складываются (накапливаются) видеосигналы, что обеспечивается при оптимальной обработке в каждом канале до суммирования (рис. 27). Оптимальным построением антенны является симметричная схема (д) расположения приемных преобразователей (ПП1-4) относи-

тельно излучающего (ИП). Такая N-элементная антенна обладает фокусирующим действием ($\Delta\theta < \theta$), что вместе с обработкой эхо-импульсов в ОФ позволяет обеспечить выделение эхо-сигнала из структурного шума. ПВ обработка сигнала может быть осуществлена не только антенной из N приемных элементов, но и посредством последовательного перемещения по N позициям одного приемника с промежуточным запоминанием информации для каждого измерения и последующим суммированием (накоплением) сигналов по N каналам.

Проведенное качественное построение структурной схемы подтверждается результатами предложенной теории построения алгоритма ПВ обработки сигналов на фоне коррелированных помех, основанной на применении критерия максимального правдоподобия для ПВ сигнала $S(t, \vec{r}, \lambda)$ в присутствии ПВ помехи $n(t, \vec{r})$. Для ПВ сигнала, принимаемого N-элементной антенной решеткой, реализация алгоритма максимального правдоподобия сводится к поиску максимума решающей функции

$$R(\lambda) = -\ln(\lambda) + q(\lambda) \quad (9)$$

где λ - информационный параметр, например, координаты дефекта, $\ln(\lambda)$ - энергетическое соотношение сигнал/шум, $q(\lambda)$ корреляционный интеграл:

$$p(\lambda) = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} S_m(t_1, \lambda) V_m(t_1, \lambda) dt_1 \quad (10)$$

$$q(\lambda) = \sum_{m=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} U_m(t_1, \lambda) V_m(t_1, \lambda) dt_1 \quad (11)$$

где $U_m(t_1, \lambda)$ - опорный сигнал, $V_m(t_1, \lambda) = \sum_{k=1}^N R_{mk}^{-1}(t_1, t_2) S_k(t_2, \lambda) dt_2$, где $R_{mk}^{-1}(t_1, t_2)$ элементы обратной корреляционной матрицы $[R^{-1}(t_1, t_2)]$, которая связана с корреляционной матрицей помех $[R(t_1, t_2)]$ соотношением: $\sum_{k=1}^N R_{ke}^{-1}(t_1, t_2) R_{em}(t_2, t_3) = \delta_{km}$ где δ_{km} символ Кронекера.

Алгоритм максимального правдоподобия сводится к поиску максимума корреляционного интеграла (11). Процедуру вычисления $q(\lambda)$ можно представить как прохождение компонентов вектора сигнала $U_1(t, \lambda)$ через линейные фильтры в каждом канале с импульсными характеристиками $h_i(t, \lambda) = V_1(t - t_0, \lambda)$ и последующее суммирование (рис. 27, а).

При наличии ПВ шума, соответствующего мелкоструктурной среде в работе была решена задача оптимального обнаружения ПВ сигнала. Алгоритм обнаружения сводится к появлению выбеливающего фильтра в каждом канале (б), который при одинаковом составе спектрального шума во всех каналах может быть общим (в). Если эффект "выбеливания", декорреляции для разделения во времени сигналов от дефекта и структурных помех сводится к укорочению эхо-сигнала, то эту операцию может выполнять ОФ для ФМ сигнала в каждом канале. Сочетание согласованной обработки ФМ сигнала с ПВ обработкой (б, в) позволяет также обеспечить выделения эхо-сигнала, замаскированного структурным шумом и находящегося ниже порога чувствительности УЗ дефек-

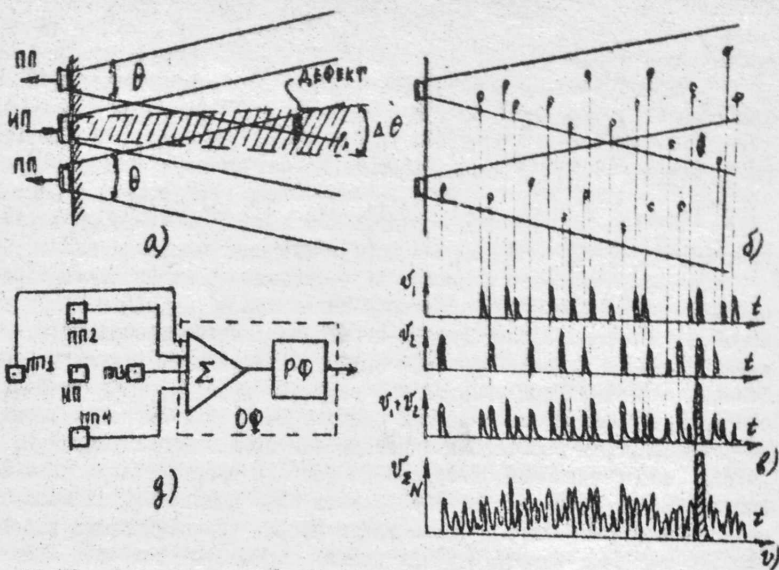


Рис. 26. УЗ контроль изделий со структурными неоднородностями пространственно-разнесенными преобразователями. Схема контроля (а), упрощенная многоканальная модель формирования структурного шума (б), результаты накопления в двух каналах (в) и в N каналах (г), структурная схема ПВ обработки (д).

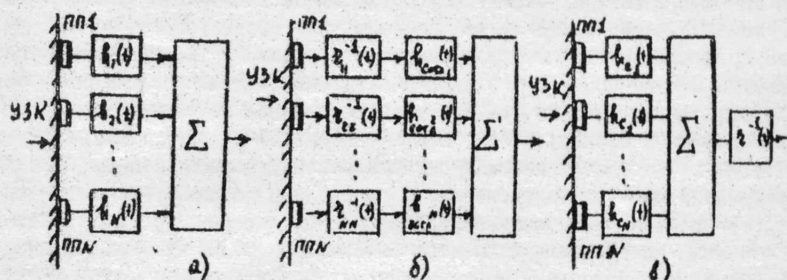


Рис. 27. Структурные схемы устройств ПВ обработки эхо-сигналов с согласованными фильтрами в каждом канале: без выбеливающего фильтра (а), с выбеливающими фильтрами в каждом канале (б) и с общим выбеливающим фильтром $Z^{-1}(u)$ (в).

тоскопа (рис. 5, г).

Качество зондирующего ПВ сигнала $S(t, \vec{r}, \lambda)$ характеризуется ПВ автокорреляционной функцией:

$$\Psi(\lambda_1, \lambda_2) = C \iiint S(t_1, \vec{r}_1, \lambda) R^{-1}(t_1, t_2, \vec{r}_1, \lambda_2) dt_1 dt_2 d\vec{r}_1 d\vec{r}_2 \quad (12)$$

где $R^{-1}(t_1, t_2, \vec{r}_1, \vec{r}_2)$ - обратная корреляционная функция помех:

$$\iint R^{-1}(t_1, t_2, \vec{r}_1, \vec{r}_2) R(t_2, t_3, \vec{r}_2, \vec{r}_3) dt_2 dt_3 = \delta(t_1 - t_3) \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_3) \quad (13)$$

где $R(t_2, t_3, \vec{r}_2, \vec{r}_3)$ - ПВ корреляционная функция помех.

ПВ АКФ показывает возможность разрешения двух сигналов с различными значениями информационного параметра λ_1, λ_2 . Для получения хорошей разрешающей способности необходимо, чтобы функция $\Psi(\lambda_1, \lambda_2)$ имела бы узкий главный максимум при $\lambda_1 = \lambda_2$ и близкий к нулю уровень боковых лепестков при существенно различающихся λ_1 и λ_2 . В этом отношении ПВ АКФ аналогична АКФ обычных временных сигналов. С учетом сказанного в работе был синтезирован принципиально новый ПВ ФМ сигнал, обеспечивающий одновременно высокую чувствительность к обнаружению и разрешающую способность по дальности (благодаря свойствам ФМ сигнала), а также узкую ПВ ДН, обеспечивающую выделение эхо-сигналов из структурных помех. Помехоустойчивость ПВ ФМ сигнала к структурной помехе обеспечивается тем, что каждый элементарный импульс ФМ сигнала формируется (принимается) "своим" элементарным излучателем (приемником) матричной антенны. Т.к. элементы антенны пространственно разнесены (рис. 28), то и каждый элементарный импульс ФМ сигнала при излучении (приеме) проходит "свой" путь в контролируемом пространстве, ему соответствует "своя" реализация структурной помехи. Таким образом, если в определенной точке пространства соединятся все элементарные импульсы ФМ сигнала, то при последующей оптимальной фильтрации (сжатии) ФМ сигнала произойдет выделение сигнала из структурного шума. На рис. 28, а показан процесс формирования в пространстве ПВ ФМ сигнала Варкера №6=7 с помощью 7 элементной антенны. В направлениях X_1, X_2, X_4, X_5 сформированный в пространстве сигнал не соответствует ФМ Варкеробскому сигналу (б, г). ФВК на выходе ОФ в этих направлениях (д, ж) не соответствует АКФ сигнала, реализуемого на выходе ОФ для ФМ сигнала №6=7 в направлении X_3 (е). Таким образом формируется корреляционная ДН с помощью корреляционной антенны. При определенном законе возбуждения элементов антенны (рис. 29, а) происходит сканирование - изменение направления излучения корреляционной ДН ПВ ФМ сигнала. Для улучшения ДН используется перекрестный порядок возбуждения элементов антенны (рис. 29, б). Корреляционная ДН становится еще более качественной для двумерной крестообразной корреляционной антенны (рис. 29, в), для которой на рис. 30 приведена корреляционная

В девятой главе рассматривается концепция построения адаптивных УЗ дефектоскопов и приводятся характеристики созданного и внедренного в серийное производство автоматизированного МП адаптивного дефектоскопа для теневого иммерсионного режима контроля крупногабаритных изделий из ПКМ. Задача разработки адаптивной аппаратуры обусловлена многообразием свойств ПКМ и изделий из них. Многолетний опыт разработки аппаратуры контроля показывает, что практически для каждого нового класса изделий необходимо разрабатывать новый прибор контроля с определенными параметрами зондирующего сигнала (f_0 , T_p , T_c и др.) и способами обработки. Альтернативой этому и служит переход от жесткой логики построения аппаратуры к гибкой, где автоматически осуществляется адаптация параметров зондирующего сигнала и способов его обработки и характеристик самого прибора под свойства и параметры контролируемого изделия. В главе обсуждаются вопросы построения аппаратуры на базе ЭВМ, в которой адаптивно меняются (рис. 31) параметры зондирующего сигнала, закон модуляции частоты, амплитуды, фазы, коэффициенты передачи передающего и приемного усилителей, резонансные частоты и полосы пропускания преобразователей, а также методы обработки эхо-сигналов. В реализованном дефектоскопе осуществлялась адаптация частоты в диапазоне 80-320 кГц под параметры контролируемого изделия, а также производился автоматический выбор оптимальных коэффициентов передачи программноуправляемых передающего и приемного усилителей с целью беззатонной настройки прибора. Необходимость подстройки (адаптации) частоты сигнала определяется наличием частотнозависимых элементов контролируемой среды или ЗАТ дефектоскопа (в основном пьезопреобразователей). В адаптивном дефектоскопе осуществляется выбор оптимальной частоты импульса по максимуму амплитуды эхо-сигнала в процессе изменения частоты излучаемого сигнала во время настройки и в процессе контроля. Управляющее устройство анализирует значения амплитуды на выходе для каждого значения изменяемой частоты, находит максимум амплитуды и устанавливает окончательно в генераторе соответствующее максимуму коэффициента передачи ЗАТ значение несущей частоты зондирующего сигнала. Это значение частоты запоминается и в процессе контроля периодически сравнивается с текущим значением. В случае появления ошибки вырабатывается сигнал коррекции на управляющий вход генератора. Аналогично осуществляется автоматический контроль коэффициента передачи ЗАТ и его поддержание в процессе контроля, что означает его беззатонную подстройку перед контролем и в процессе контроля.

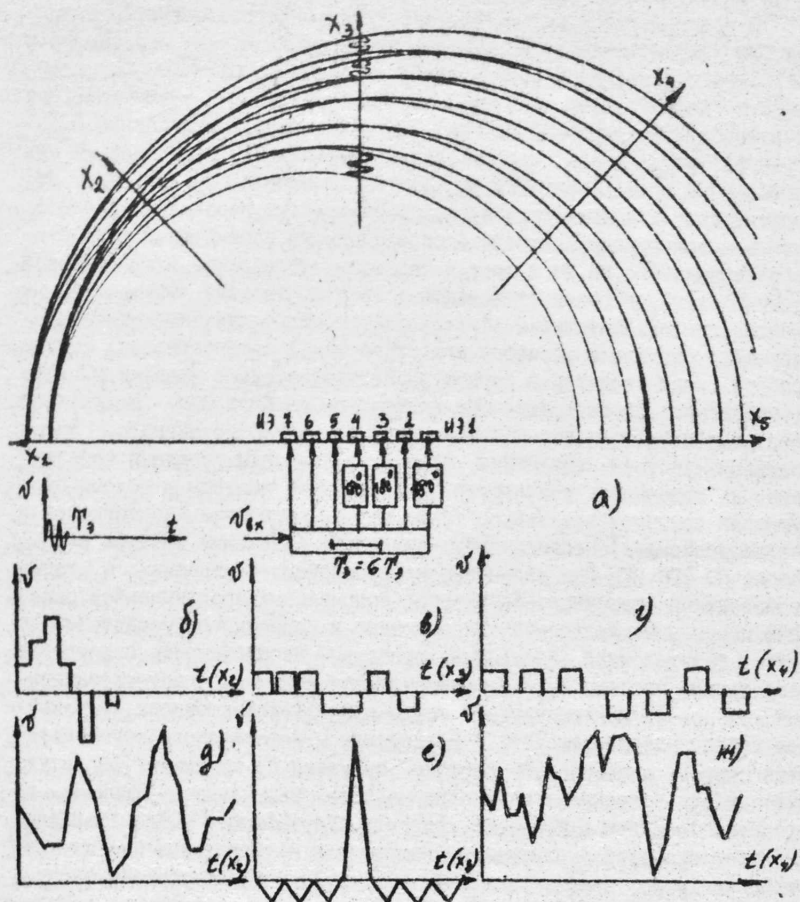


Рис. 28. Формирование ПВ ФМ сигнала N_7 корреляционной антенной (а), форма ФМ сигнала в направлениях X_2 - X_3 - X_4 (б, в, г), ВКФ ФМ сигналов в направлениях X_2 - X_3 - X_4 (д, е, ж).

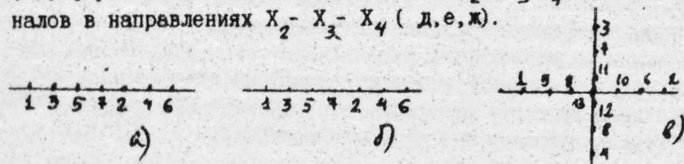


Рис. 29. Порядок возбуждения элементов корреляционных антенн: (а) - одномерная антенна со сканированием ДН, (б) - одномерная антенна с перекрестным возбуждением, (в) - двумерная крестообразная антенна.

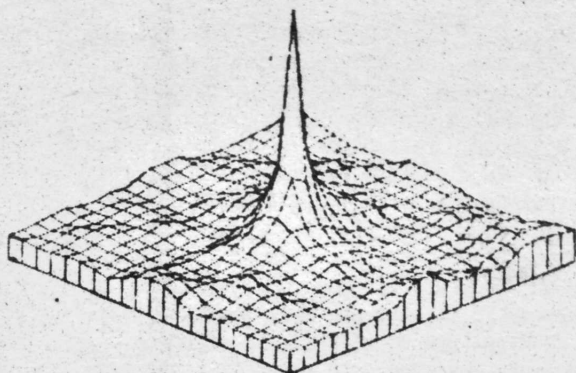


Рис.30 Трехмерное изображение ДН ПВ ФМ сигнала №-13 (нормированная амплитуда главного максимума сжатого сигнала).

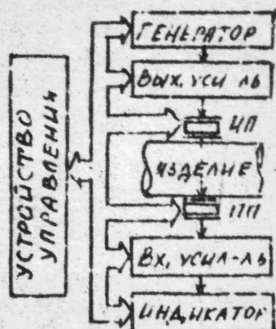


Рис.31 Структурная схема адаптивного УЗ дефектоскопа.

В десятой главе - Заключении - перечисляются результаты исследований и намечаются пути дальнейшего развития предлагаемых автором направлений. Отмечается, что разработанные в диссертации методы и устройства УЗ контроля ПКМ позволили создать новое направление в УЗ дефектоскопии, основанное на использовании статистических методов обнаружения и выделения эхо-сигналов из шумов и помех, на применении с этой целью сложномодулированных сигналов и их оптимальной обработки. Внедрение результатов работы в промышленности обеспечило большой экономический и научно-технический эффект.

В Приложении приведены акты, подтверждающие научные положения, выдвинутые в диссертации, и акты, подтверждающие результаты внедрения созданной в настоящей работе аппаратуры УЗ контроля.

Основные выводы и результаты

1. Создано новое направление в УЗ дефектоскопии ПКМ с большим затуханием УЗК и сложной структурой, основанное на использовании помехоустойчивых сложномодулированных сигналов и их оптимальной обработки. Показано, что оптимальная обработка позволяет решить проблемы обнаружения и выделения УЗ эхо-сигналов из шумов и помех, существенно повышает чувствительность, разрешающую способность, достоверность контроля, точность измерения временного положения эхо-сигнала.

2. Впервые введены в практику УЗ контроля помехоустойчивые ФМ сигналы (сигналы Баркера, М-сигналы, ансамбли ортогональных сигналов и др.) с последующей их обработкой. Сформулированы критерии выбора сигналов (по виду их АКФ, БКФ) и способов их обработки для решения конкретных задач УЗ контроля. Разработан и внедрен новый класс приборов УЗ эхо-контроля ПКМ с большим затуханием УЗК и сложной структурой, в которых используются помехоустойчивые ФМ сигналы.

3. На основе использования оптимальной фильтрации сигналов созданы новые методы и устройства УЗ толщинометрии изделий с большим затуханием УЗ за счет фиксации временного положения эхо-сигнала по пику его АКФ. Созданы и внедрены УЗ толщинометры с оптимальной фильтрацией АМ, ФМ сигналов, со спектральной обработкой ЛЧМ сигналов.

4. На основании представления акустического слоя как рециркулятора предложена модель формирования структурной помехи в многослойных средах и предложены способы выделения эхо-сигналов из такой помехи. Теоретически сформулирован и экспериментально подтвержден эффект "нерезонансного" прохождения ФМ сигналов через слои, заключающийся в отсутствии резонансных явлений и стоячих волн, что позволяет производить контроль длинными ФМ сигналами без опасения возникновения интерференционных явлений, обеспечивает достоверность информации об амплитуде эхо-сигналов в слоистых средах.

5. Теоретически и экспериментально показана целесообразность использования пространственно-временной оптимальной обработки сигналов для выделения эхо-сигналов из коррелированных помех. С целью выделения эхо-сигналов одновременно из белого шума и из структурных помех синтезированы ПВ ФМ сигналы с узкой и управляемой ДН.

6. Предложено и реализовано новое направление развития автоматизированных систем УЗ контроля (на базе ПЭВМ), основанное на адаптации параметров зондирующего сигнала, параметров ЭАТ и способа обработки сигнала под характеристики контролируемого изделия из ПКМ.

Ниже приведены основные публикации автора по теме диссертации:

1. Качанов В.К. О возможности применения методов сжатия импульсов в УЗ дефектоскопии//Тр.Моск.энерг.ин-та.-1974-Вып.192-С.121-129.

2. Качанов В.К. Генерация и прием ФМ УЗ сигналов// Тр. Моск.энерг. ин-та.-1975.-Вып.279.- С.125-128.

3. Качанов В.К. и др.Применение ФМ сигналов при контроле многослойных сред//Тр.Моск.энерг.ин-та.-1977.-Вып.335.- С.45-47.

4. Качанов В.К. Оптимальные фильтры фазоманипулированных сигналов в УЗ дефектоскопии//Тр.Моск.энерг.ин-та.-1978-Вып.382.-С.65-69.

5. А.с.834501 (СССР). Способ УЗ контроля изделий /В.К.Качанов и др.//В.И.-1981.- N20.

6. Качанов В.К. Оптимальный фильтр для ультразвукового ФМ сигнала на основе электроакустического пьезопреобразователя//Межвуз. сб. трудов. М.: Моск. энерг. ин-т.-1984. N 46. -С.141-146.
7. А.с.1167496 (СССР). Устройство возбуждения УЗ пьезопреобразователя дефектоскопа /В.К. Качанов и др.// Б.И.-1985.-N 26.
8. А.с.1262362 (СССР).Способ УЗ теневого контроля изделий//Качанов В.К.и др.//Б.И.-1986.-N 37.
- 9 А.с.1397830 (СССР). Устройство ультразвукового контроля материалов и изделий.//Качанов В.К.и др.//Открытия.Изобретения.-1988-N19
10. А.с.1460698 (СССР).Устройство УЗ теневого контроля// Качанов В.К.и др.//Открытия. Изобретения.- 1989.-N 7.
11. А.с.1458804 (СССР).Устройство для ультразвукового контроля//Качанов В.К. и др.//Открытия. Изобретения.-1989.-N 6.
12. А.с.1499116 (СССР).Ультразвуковой толщиномер// Алатырев Г.А., Качанов В.К.и др.//Открытия.Изобретения.-1989.-N 29.
13. А.с.1529923 (СССР).Способ УЗ теневого контроля изделий//Качанов В.К. и др.//Открытия.Изобретения.-1989.-N7.
14. А.с.1504512 (СССР).Ультразвуковой способ определения толщины//Качанов В.К.и др.//Открытия.Изобретения.-1989.-N32.
15. Качанов В.К., Рапопорт Д.А., Мозговой А.В. Разработка новых методов ультразвукового контроля ПКМ на основе использования радиолокационных сигналов(обзор)//Дефектоскопия.-1990.-N9.-С.3-20.
16. Качанов В.К., Мозговой А.В. Новые направления контроля композитов// Диагностика на машина и сооружения и безразрушительни контроль:Доклад/2 нац.и т. конф., г.Варна, окт.1990 г,Т. II,С.142-147.
17. Качанов В.К. Разработка новых способов и устройств УЗ контроля ПКМ на основе использования методов оптимальной обработки сигналов// Неразрушающие физические методы контроля: Тез.докл. XII Всесоюз. науч. конф., сент.1990г., -Свердловск,-1990.-Том II-С.103-104.
18. Качанов В.К., Казанцев О.А.и др.Разработка ультразвуковых адаптивных методов и устройств для контроля полимерных материалов. //Дефектоскопия.- 1990.- N 9.- С.52-56.
19. Качанов В.К. Применение ортогональных фазоманипулированных сигналов в УЗ дефектоскопии.//Дефектоскопия.- 1990.- N 9.- С.39-46.
20. Новые тенденции в развитии ультразвуковой дефектоскопии/ В.К.Качанов и др.// Электротехника.-1990.-N 11.-С.62-68.
21. Kachanov V.K., Rapoport D.A. Application of radiolocation methods of signal processing in ultrasonic non-destructive testing of polimer compozite materials/ MICC-90. Elsevier applied science, London and New-York, 1990, P.377-385.
22. А.с.1562846 (СССР).Способ УЗ теневой дефектоскопии многослойных изделий/В.К.Качанов и др.//Открытия.Изобретения.-1990.N17.

23. Качанов В.К. и др. Применение ФМ сигналов в УЗ дефектоскопии//Сб. науч. трудов "Неразрушающий контроль КМ" под ред. Качанова В.К./-М.: Моск. энерг. ин-т. -1991. -Вып. 642. -С.44-62.

24. Качанов В.К. Применение методов оптимальной обработки УЗ сигналов// Новые информационные технологии в народном хозяйстве и образовании: Тез. докл. Всесоюз. науч. конф., дек. 90г., -М., -1991. -С.50.

25. Применение методов оптимальной обработки сигналов при УЗ контроле ПКМ / В.К.Качанов и др. / Неразрушающий контроль и диагностика свойств композитов и изделий из них: Тез. докл. Междунар. науч. конф., г. Рига, 22-24.X.1991 г., Т.1. -С.367-374.

26. Kachenov V.K., Mozgvoi A.V. Application on Complexly Simulated Signals in Ultrasonic Echo-Control of Articles Made of Polymer Composite Materials/Iketani Conference. The 5-th Symposium in Nondestructive testing of materials, Japan. 27-30.05.1991, P.98-99.

27. А.с.1702294 (СССР). Ультразвуковой адаптивный дефектоскоп/ В.К.Качанов и др. // Открытия.Изобретения. -1991. -N19.

28. А.с.1619163 (СССР). Устройство для УЗ контроля / В.К.Качанов и др. //Открытия.Изобретения. -1991. - N 1.

29. А.с.1640631 (СССР).УЗ способ контроля дефектов изделий /В.К. Качанов и др.// Открытия.Изобретения. -1991. -N13.

30. Качанов В.К. Применение методов оптимальной обработки сигналов при УЗ контроле ПКМ//Сб. науч. трудов "Неразрушающий контроль композиционных материалов" под ред. Качанова В.К./-М.: Моск. энерг. ин-т. -1991. -Вып. 642. -С.60-80.

31. А.с.1024826 (СССР). Устройство для ультразвукового контроля / В.К.Качанов и др. // Открытия.Изобретения. -1991. -N48.

32. Alatirev G.A., Zorin A.Y., Kachenov V.K., Pitolyn A.I., Popko V.P., Ryabov G.Y. "New method of Ultrasonic control of items" /"Know-how", 1992, N 1, p.65-87.

33. Карташев В.Г., Качанов В.К. Оптимальное выделение сигналов на фоне структурного шума в ультразвуковой дефектоскопии// Дефектоскопия. - 1992. - N 7. - С.14-24.

34. А.с. 1748049 (СССР). Устройство для контроля материалов и изделий / В.К.Качанов и др.//Открытия.Изобретения. -1992. - N26.

35. А.с. 1778678 (СССР). Ультразвуковой дефектоскоп / В.К.Качанов и др.//Открытия.Изобретения. -1992. - N 44.