

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ РОБАСТНЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ И НЕКОНТАКТНОГО ХИРУРГИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ ИНОРОДНОСТЕЙ МЯГКИХ ТКАНЕЙ

В.И. Неволин

I. Предполагаемый ультразвуковой оперативный диагностический и корректирующий (хирургический) комплекс (УДОКХ), предназначенный для идентификации и последующей внутренней неконтактной хирургической дезинтеграции малоразмерных и крупных инородных и опухолевых образований, основывается на использовании энергии акустических продольных и поперечных упругих колебаний. В настоящее время ультразвуковые диагностические методы чрезвычайно широко используются в интроскопии различных неоднородных сред и, в том числе, в медицине при диагностировании для человека состояния различных, прежде всего, внутренних органов.

Однако существующая ультразвуковая диагностическая аппаратура обладает недостаточной разрешающей способностью вследствие большого частотно зависимого затухания акустических колебаний в такой специфической неоднородной среде как внутренние ткани и органы человека. И в особенности недостаточные идентификационные способности известных методов обработки сигналов, в том числе акустических, на фоне помех как типа белого шума, так и более сложных структурных помех, существенно ограничивают ареал применения в медицине относительно наиболее безопасной излучающей ультразвуковой акустической аппаратуры для диагностики и профилактики внутренних заболеваний на ранних стадиях. Так как

на этих ранних стадиях, например, холестериновые бляшки в кровеносных сосудах сердца, а также другие инородные и опухолевые новообразования являются малоразмерными и недоступными для приемлемой их идентификации.

Чрезвычайная насущность в более эффективных методах идентификации также становится актуальной, если внедрять новые локальные (щадящие) способы, в том числе ультразвуковые, дезинтеграции инородных внутренних, прежде всего, малоразмерных новообразований. Так как эти инородные новообразования рассредоточены, как правило, среди здоровых тканей, то необходимы перманентный контроль и коррекция или, в целом, управление процессом дезинтеграции. Тем более, что дезинтеграция должна проводиться по крайней мере квантовано и эти интервалы квантования (шаги дезинтеграции) будут еще более мелкими, чем размеры неоднородностей.

Новые предлагаемые принципы построения УДОКХ основываются на новейших научных результатах и базируются на предложенном автором подходе создания информационных систем с применением условно-параметрического робастного нелинейного метода фильтрации информационных сигналов из помех. Этот метод создан на основе теории робастных статистик, марковских случайных процессов, стохастических нелинейных систем и использует слабые условия полученного автором критерия оптимального робастного обнаружения нестационарных информационных сигналов на фоне помех.

Предлагаемый подход функционально может состоять из 2-х разделов: 1-я часть – система идентификации малоразмерных инородных образований; 2-я часть – система ультразвуковой дезинтеграции в составе комплексной системы управления процессом дезинтеграции инородных образований (автоматизированной системы адаптируемого локального синтезируемого облучения).

II. Обоснование первого раздела

1. Научно-техническая задача, на решение которой направлен 1-й раздел проекта. Результатом первого раздела является разработка универсального асинхронного сканирующего ультразвукового дефектоскопа нового поколения, обладающего существенно лучшими характеристиками, а именно, ультразвуковой диагностической, идентифицирующей и визуализирующей системой, в том числе с развитыми сервисными функциями, для использования в разнообразных медико-технических задачах неразрушающего контроля (интроскопии) состояния внутренних органов человека как, например, в кардиологии, онкологии и т. п.

Причем, в отличие от существующих в настоящее время разнообразных ультразвуковых диагностических систем (УДС) предлагаемая система робастного ультразвукового зондирования – дефектоскоп нового поколения (робастный асинхронный ультразвуковой дефектоскоп – РАУД) – будет

иметь существенно лучшие параметры и характеристики и при этом может быть универсальным. Поэтому эксплуатация такого робастного дефектоскопа будет более интенсивной и в различных применениях практически по единой методике, что существенно повысит его экономическую эффективность как для крупных, так тем более для малых медицинских предприятий.

В настоящее время для различных медицинских задач кроме ультразвуковой дефектоскопии используются другие методы, среди которых наиболее эффективной и распространенной является рентгеноскопия, прежде всего ПЭТ (изотопная позитронная томография). Более широкой применимости ультразвуковой диагностирующей аппаратуры, существенно экологичной по сравнению с рентгеноскопией, препятствуют именно невысокие уровни идентифицируемости и разрешаемости. Кроме того, при диагностике (визуализации) кровеносных сердечных сосудов следует учитывать колебательное динамическое состояние сердечных тканей с амплитудами, превышающими размеры сосудов. Поэтому создание *нового поколения* УДС со значительно более лучшими отмеченными характеристиками – РАУД позволит во многих применениях как заменить ими рентгеноскопию, так и решить новые задачи в кардиологии, а именно при лечении ИБС.

Таким образом, проект производства эффективных и одновременно более удобных в эксплуатационном плане и экологичных робастных сканирующих дефектоскопов социально весьма актуален, и даже поэтому инновационен.

2. Научная новизна предлагаемых решений. Кардинальное улучшение и совершенствование характеристик дефектоскопов нового поколения основывается на предложенном и разработанном под руководством доктора технических наук Неволена В.И. условно-параметрическом подходе. Теоретически (алгоритмически) этот подход реализован в виде робастного нелинейного метода выделения информационных сигналов из мощных помех.

Принципиальная новизна предложенных условно-параметрического подхода, а также робастных нелинейных методов фильтрации сигналов из помех заключается в многомерной асинхронной нелинейной обработке наблюдаемой (фильтруемой) смеси информационных (случайных) сигналов и помех. Неволениным В.И. предложен робастный вариант леммы Неймана-Пирсона (робастная лемма Неймана-Пирсона). В условиях априорной неопределенности как относительно сигналов, так и помех, а также при мощных помехах, при которых функции правдоподобия становятся многомодовыми, обычные байесовские методы фильтрации (синтеза алгоритмов обработки), использующие обычную лемму Неймана-Пирсона, не работают. Синтезированные для этих условий алгоритмы обработки, а также технические устройства их реализации, выполнены с использованием метода пробных функций Калашникова, методов марковских процессов, функции

влияния Хэмпбела теории робастных статистик и в классе структур стохастических нелинейных дифференциальных уравнений со случайной правой частью.

Полученные теоретические оценки, а также экспериментальные научные результаты, а также проведенные измерения на реальных образцах с использованием современных УД, в том числе последних цифровых модификаций с компьютеризированной обработкой данных показывают, что на этой основе возможно создание нового поколения технических систем и приборов с существенно лучшими характеристиками. Основными такими характеристиками являются существенно более высокие помехоустойчивость, разрешающая способность и другие аналогичные соответствующие характеристики.

В системах, использующих съем информации с помощью зондирующих сигналов типа радиоимпульсов с неизвестными частотой и начальной фазой (по таким принципам будут работать предполагаемые ультразвуковые дефектоскопы – РАУД), полученные методы позволят создавать приборы с соответствующими разрабатываемыми алгоритмами обработки и извлекать информационные сигналы из помех, по сравнению с известными методами и приборами, в условиях, когда отношение сигнал/шум значительно меньше единицы. А именно, в существующих аналогичных приборах для повышения помехоустойчивости используются уже сложившиеся традиционные методы формирования пространственной селекции. Поэтому в последнем поколении подобных приборов уже реализуют как микропроцессорную обработку, но традиционными алгоритмами в совокупности с цифровыми принципами отображения информации, так и увеличение помехоустойчивости и разрешающей способности за счет формирования узких диаграмм направленности.

Внедрение предложенных методов позволит существенно улучшить качественные и количественные характеристики перечисленных выше систем и приборов на основе новых алгоритмических принципах робастной нелинейной обработки информационных сигналов при извлечении их из мощных, совпадающих по спектру шумов и помех.

Как было отмечено выше, основные характеристики выпускаемых и существующих УДС определяются традиционными используемыми алгоритмическими принципами и уже не вполне удовлетворяют потребностям настоящей социальной и научно-технической практики.

Поэтому проблема создания качественно новых ультразвуковых диагностических систем может решаться только на основе новейших теоретических результатов, прежде всего по принципиально новым методам обработки и идентификации отраженных ультразвуковых сигналов.

3. Современное состояние исследований и разработок по данному направлению. К настоящему времени в авторском коллективе выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований по направле-

нию помехоустойчивого обнаружения радиоимпульсных сигналов. Проведено моделирование как основных алгоритмов, так и тех алгоритмов, по которым предполагается реализация проекта. При этом разработаны как общие принципы, так и конкретные алгоритмы и устройства для создания ультразвуковых диагностических систем *нового поколения – робастных дефектоскопов* со значительно лучшими характеристиками.

Основными такими характеристиками в ультразвуковых дефектоскопах являются существенно более высокие помехоустойчивость и помехозащищенность (обычно под первым понимают функциональную устойчивость системы или устройства при действии помех одного типа, например, белого гауссова шума – электронный шум, а под вторым – для разнообразных помех, например, в ультразвуковых дефектоскопах – к структурным шумам), а также разрешающая способность и аналогичные соответствующие характеристики. Увеличению помехоустойчивости робастных дефектоскопов в проекте можно охарактеризовать также в рамках общепринятых критериев, а именно с помощью характеристик обнаружения. Применение робастных алгоритмов позволяет существенно увеличить помехозащищенность (примерно на порядок и более) именно на начальном участке характеристик обнаружения, т. е., в той области, которая наиболее специфична для практических приложений и использования ультразвуковых дефектоскопов, а именно, в медицине.

Эта область в ультразвуковой дефектоскопии обусловлена так называемыми структурными шумами, которые, в свою очередь, проявляются вследствие **сильно выраженного частотно-зависимого затухания зондирующих сигналов** при их распространении в акустически упругой поглощающей среде, особенно в тканях человека, от излучающего датчика до соответствующего идентифицируемого дефекта и далее отраженного от дефекта информационного сигнала до приемного датчика. Причем для требующихся в настоящее время количественных характеристик разрешаемости (разрешения) несущие частоты зондирующих сигналов должны быть высокими, но при этом отраженные сигналы получают небольшой мощности и полностью скрыты в структурных шумах. Существующие же дефектоскопы (УДС) эффективно работают лишь на пологих участках характеристик обнаружения, т. е., в условиях, когда сигнал/шум много больше единицы. В требуемых практических случаях, особенно в кардиологии, качество обследования фактически определяется субъективными навыками операторов, что является недостаточно эффективным и поэтому неприемлемым.

4. Существующими аналогами, в том числе мировые. Уровень современного состояния техники по первому разделу можно охарактеризовать как установившийся. Ультразвуковую диагностическую аппаратуру удобнее оценить на примере обычных ультразвуковых дефектоскопов (УД), так как существующая медицинская ультразвуковая диагностическая

аппаратуры в основном отражает известные характеристики УД. На предприятиях различных направлений, например, в России используется большое число устаревших типов УД, в основном, молдавского производства, г. Кишинев УД-2 и его модификации УД2-12, УД2П-Р, УД2В-П45 и т. п. В настоящее время производятся в России и за рубежом различного типа и назначения ультразвуковые дефектоскопы по указанным выше традиционным принципам функционирования, а именно УД А1212, «ЕРОСН 3», «ЕРОСН 4», из них наиболее распространен, например, дефектоскопы УД-70, УД4-130 и их модификации, выпускаемые фирмами ООО «НПК ЛУЧ», СП НПП РДМ, г. Москва. Функционально подобные УД производят, например, фирмы НПК АВЭК, ОАО «Интротест» г. Екатеринбург; НПК АЛТЕК, ВИМАТЕК, ООО «ИНТЕК г. Санкт-Петербург; АЛТЕС-КОНСТРУКЦИЯ, АО «ВОТУМ», ООО «НПП ВИГОР», «ДИАМЕХ 2000» и др., г. Москва; и в других городах. За рубежом существенно более дорогие технически подобные, но с улучшенным сервисом, УД производятся, например, фирмами R/D Tech, Panametrics-NTD, Magnaflux, Elcometer, National instruments и другие.

Таким образом, создание новой системы робастного ультразвукового зондирования возможно за счет внедрения предложенных методов на основе новых алгоритмических принципах робастной нелинейной обработки информационных сигналов.

Предлагаемая система робастного ультразвукового зондирования позволит идентифицировать мелкоразмерные элементы внутренних тканей человека при линейных размерах (0,1–0,3) мм на расстояниях до 200 мм, а с некоторой потерей качества и сохранением основных функциональных характеристик – ориентировочно на расстояниях до 400 мм.

Таким образом, разработка и производство предлагаемых приборов позволит действительно повсеместно распространить принципы экологически безопасной интроскопии.

III. Обоснование раздела 2. Автоматизированная система синтезируемого локального адаптирующегося облучения (дезинтеграции)

1. Научно-техническая задача, на решение которой направлен 2-й раздел проекта. Ультразвуковая система дезинтеграции, т. е., разрушение с каким-либо последующим удалением из внутренних органов инородных образований без каких-либо вскрытий, а с помощью локальной сконцентрированной колебательной акустической энергии, как было отмечено в первом разделе, реализационно возможно и в медицинском, и в техническом аспектах только при наличии соответствующей эффективности контроля процессом дезинтеграции. Поэтому система дезинтеграции должна иметь соответствующие: а) энергетические и экологические показатели сформированного локального акустического поля; б) характеристики оперативного измерения и идентификации параметров этого неоднородного поля в анизотропной среде внутренних органов, а именно, как ос-

нованную на научно-технических принципах 1-го раздела, систему акустической диагностики, так и другие дополняющие системы; например, использующие тепловые датчики; в) динамические и точностные параметры комплексной автоматизированной системы управления, прежде всего для расчета и изменения параметров дезинтегрирующего синтезированного локального акустического поля.

1. Энергетические характеристики синтезируемого акустического поля. Оценочные расчеты плотности энергии дезинтегрирующего акустического поля можно провести, например, ориентируясь на завышенную величину прочности на разрыв дезинтегрируемой ткани порядка 5–10 кГ/кв. см. В этом случае плотность энергии (в 1 кубическом миллиметре) акустического поля должна быть около 0,5 Дж/куб.мм., а именно, мощность этого поля должна быть порядка 0,5 Вт. Подобная мощность (и даже более высокие значения) может быть вполне сформирована при использовании (5–10) излучателей с парциальной мощностью каждого около 50 мВт при синфазном суммировании в требуемой пространственной точке парциальных акустических полей. Несмотря на то, что парциальные мощности являются достаточно малыми, для обеспечения более гарантированной безопасности следует использовать локализацию акустических полей, например, как пространственную, так и временную. При этом пространственная локализация обеспечивается за счет использования излучателей с узкими диаграммами направленности порядка 10 градусов телесного угла. Таким образом, синтезирование акустического поля с наибольшей (максимальной) плотностью энергии будет реализовываться именно в элементарном объеме дезинтегрируемой точки. Размеры элементарных объемов порядка 1-го кубического миллиметра, а также меньших – для пошаговых итераций при выполнении процесса дезинтеграции, также обеспечиваются использованием высоких частот зондирования, диагностирования и измерения порядка (1–10) МГц и более – для обработки мелких кровеносных сосудов.

2. Характеристики измерения и идентификации параметров неоднородного синтезированного акустического поля должны обеспечиваться, например, при использовании парциальных акустических излучателей как в режимах зондирования, так и измерений, т. е., при работе этих излучателей на прием. А именно, система измерений должна базироваться на оригинальных принципах обработки сигналов, отмеченных в разделе 1.

3. Общее функционирование оперативного диагностико-хирургического комплекса в целом обеспечивается автоматизированной и компьютеризированной аналитической системой управления. Эта система должна как моделировать предполагаемую ситуацию, так и обеспечивать необходимые результаты процессов диагностики и дезинтеграции. Моделирование базируется на соответствующих исходных вводимых данных и должно обеспечивать формирование адекватных структуры и схемы проводимых оперативных медицинских процедур. Главная же задача комплексной системы

управления – это выполнение процесса дезинтеграции, которое гарантированно должно проводиться, как правило, в автоматическом режиме. И это должно обеспечиваться как соответствующими точностными характеристиками систем по 1-му и 2-му разделам, так динамическими и информационными параметрами самой системы управления. В настоящее время существует необходимая вычислительная цифровая техника (хотя и зарубежного производства), которая может обеспечить необходимые технические характеристики комплекса с приемлемой себестоимостью медицинского прибора.

2. Современное состояние исследований по данному направлению.

В настоящее время в данном направлении достигнуты значительные результаты по формированию приемно-передающих излучателей с узкими диаграммами направленности, в том числе и для акустических антенных систем. Таким образом, создание неоднородного акустического поля с требуемой плотностью энергии может быть достигнуто, однако, получение для парциальных излучателей соответствующего пространственного управляемого электронным образом пространственного вектора интенсивности акустической волны требует дополнительных исследований.

Проблема синтеза неоднородного акустического поля с существенно выраженным экстремальным максимумом плотности энергии поля в требуемом элементе объема также требует проведения соответствующих научных теоретико-экспериментальных исследований. Так как подобные задачи мало рассматривались в известных публикациях, а для разрабатываемого комплекса это одна из главных проблем, то решение данной отмеченной задачи также потребует значительных интеллектуальных и временных затрат.

В техническом аспекте основным ожидаемым результатом является система синтеза неоднородного поля, у которого объемная функция плотности интенсивности колебательной энергии акустического поля должна иметь только один главный лепесток, существенно превышающий боковые. Такие параметры неоднородного акустического поля могут быть обеспечены соответствующим векторным пространственным суммированием (синтезом) полей отдельных (парциальных) излучателей.