
УДК 620.179

А.С. Огир, д-р техн. наук,

В.В. Тарапата, А.А. Чемерис, кандидаты техн. наук, **Е.А. Огир**

Ин-т проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины
(Украина, 03164, Киев, ул. Генерала Наумова, 15,

тел. 4242296, e-mail: a.a.chemeris@gmail.com, lenaogir@gmail.com)

Система ультразвуковой диагностики с использованием фазовой информации отраженного звукового поля

Рассмотрена реализация системы ультразвукового сканирования оптически непрозрачных сред. Приведена модель формирования изображений, на основе которой разработана структурная схема ультразвукового сканера. Описаны отдельные блоки сканера и программной части на основе вычислений в графическом адаптере компьютера. Ультразвуковой сканер предназначен для создания портативного мобильного устройства с пониженным энергопотреблением.

Розглянуто реалізацію системи ультразвукового сканування оптично непрозорих середовищ. Наведено модель формування зображень, на основі якої розроблено структурну схему ультразвукового сканера. Описано окремі блоки сканера та програмної частини на основі обчислень в графічному адаптері комп'ютера. Ультразвуковий сканер розраховано на створення портативного мобільного пристрою зі зниженим енергоспоживанням.

К л ю ч е в ы е с л о в а: когерентная система, эхоскопия, формирование изображений, пространственное и контрастное разрешение.

Использование отраженного звукового поля в качестве информационного параметра фазовой информации в когерентных (голографических) системах диагностики повышает пространственную и контрастную разрешающую способность на порядок и позволяет наблюдать изображения дефектов, близкие к реальным, на развертках типа *B*-скан, *C*-скан. Например, фронтальное разрешение таких систем в металлических конструкциях на частоте 3 МГц составляет 2,5 мм, точность измерения размеров дефектов — менее половины длины ультразвуковой (*УЗ*) волны [1, 2].

Голографические системы контроля материалов широко используются за рубежом. В Швеции с помощью таких систем осуществляется *УЗ*

© А.С. Огир, В.В. Тарапата, А.А. Чемерис, Е.А. Огир, 2016

ISSN 0204–3572. Электрон. моделирование. 2016. Т. 38. № 1

контроль медных хранилищ (сварных швов между корпусом и крышкой) отработанного ядерного топлива с толщиной стенки 90 мм. В России разработана комплексная технология анализа качества сварных соединений с применением когерентных систем «Авгур» для определения длины, высоты и профиля дефектов.

Разработанная в Финляндии когерентная система контроля аустенитных сварных соединений толщиной 28 мм позволяет с высокой точностью контролировать практически все типы аустенитных сварных труб и емкостей в контурах тепловых и атомных станций.

В США и Франции разработаны голографические системы УЗ контроля биметаллических сварных соединений с промежуточными и антикоррозионными наплавками. Эти технологии используются при создании энергетического оборудования тепловых и атомных станций и в других отраслях энергетического машиностроения [1, 2].

Преимущества голографических систем УЗ контроля материалов заключаются в следующем: они позволяют создавать изображения дефектов с сохранением их реальных параметров (формы, размеров и местоположения в материале), обладают высоким пространственным и контрастным разрешением при отображении микро- и макродефектов материалов.

Амплитуда и фаза спектральных составляющих эхосигналов, представленных с помощью преобразования Фурье, играют различную роль в формировании изображений дефектов. В некоторых ситуациях можно сохранить многие важные свойства реконструируемого изображения, учитывая лишь фазовую информацию, а при конечной длительности сигнала одной фазовой информации оказывается достаточно для полного восстановления изображений с точностью до постоянного множителя [3].

Аналогичное утверждение не может быть сделано относительно амплитуды спектральных составляющих. Значение фазовой информации исследовалось для различных сигналов, включая одномерные, двумерные и трехмерные сигналы. Например, были изучены чисто фазовые и чисто амплитудные акустические и оптические голограммы. В случае чисто фазовых оптических голограмм записывается только фаза рассеянного волнового фронта, а амплитуда остается постоянной, тогда как для чисто амплитудных голограмм фаза принимается нулевой, а записывается только амплитуда рассеянного волнового фронта.

Модель формирования изображений. Как правило, восстановленный по чисто амплитудным голограммам объект имеет мало общего с оригиналом, тогда как восстановление по чисто фазовой голограмме поз-

воляет сохранить многие важные свойства оригинала [3]. С чисто фазовыми и чисто амплитудными голограммами однозначно связаны фазовые и амплитудные изображения. Фазовое изображение имеет фазу преобразования Фурье, равную фазе для исходного изображения, тогда как амплитуда его преобразования Фурье равна единице, либо, в более общем случае, соответствует спектральной амплитуде некоторых изображений, например средней амплитуде ансамбля изображений, не связанных с данным. Многие признаки исходного изображения, достаточно мелкие его детали, ясно различимы в фазовом изображении, но не обнаруживаются в амплитудном изображении.

Согласно одному из условий, обеспечивающих точное (до масштабного множителя) восстановление, требуется, чтобы длительность сигнала была конечной. Следует заметить, что это не относится к пространственному сигналу звуковой голограммы, где сигнал с нулевой пространственной частотой моделирует точечный источник колебаний на акустической оси звукового луча в пространственном спектре голограммы, а начальная фаза восстанавливаемого точечного источника в алгоритме реконструкции может принимать любое значение.

Уравнения скалярной теории дифракции представляют математическую основу для описания волнового поля в любой точке замкнутого, свободного от помех пространства через его значения на поверхности, замыкающей это пространство в некоторый объем [4].

Рассмотрим случай, когда базовой математической моделью звуковой голограммы является дифракционный интеграл Рэля—Зоммерфельда:

$$U(P_0) = \frac{1}{j\lambda} \iint_{S_{д.о}} U(P_1) \frac{e^{jKr_{01}}}{r_{01}} \cos(\bar{n}, \bar{r}_{01}) dS_{д.о}. \quad (1)$$

Выражение (1) устанавливает зависимость между значениями поля в точках P_0 внутри объема и значениями поля в точках P_1 на поверхности дифракционного отверстия $S_{д.о.}$, представляющими возмущение в виде сферических волн, распространяющихся от точек P_1 к точкам P_0 [5].

Несмотря на то, что выражение (1) описывает математическую зависимость комплексных амплитуд сферических волн в полном объеме звукового импульса, невозможно осуществить его преобразование для решения основной задачи — получения акустического изображения, т.е. получения значений интенсивности эхосигналов точечных дефектов-неоднородностей материала в объеме звукового зондирующего импульса.

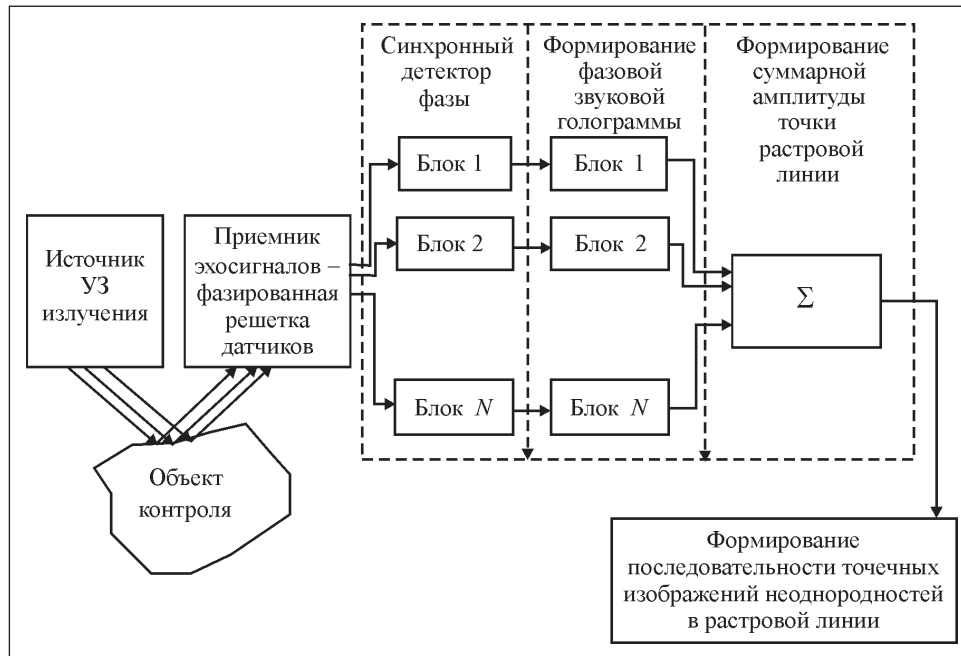


Рис. 1. Структура голографической системы УЗ эхоскопии

В результате аппроксимации исходного уравнения (1) получены взаимные преобразования между функциями $U(x_0)$ и $U(x_1)$:

$$U(x_0) = A \sum_{x_1} U(x_1) e^{\frac{j\omega}{cz} x_1^2} e^{-j2\pi f_{x_0} x_1} \Delta x_1, \quad (2)$$

$$U(x_1) = A^{-1} \sum_{x_0} U(x_0) e^{\frac{j\omega}{2cz} x_0^2} e^{-j2\pi f_{x_0} x_1} \Delta f_{x_0}, \quad (3)$$

где x_1 — координаты точек на объектной линии; x_0 — координаты точек (датчиков) на линии голографирования; z — расстояние между плоскостью голографирования и объектной плоскостью; λ — длина волны; c — скорость звука; $\omega = 2\pi f_{x_0}$ — пространственные частоты в спектре сигнала голограммы.

Выражение (2) — объектная функция, соответствующая неоднородности диагностируемой среды. Выражение (3) — функция звуковой голограммы, соответствующая акустическому изображению неоднородности.

Более подробно математическая модель реконструкции изображения на основе звуковой голограммы описана в работе [6].

Реализация системы УЗ эхоскопии. Разработанная структура системы УЗ эхоскопии представлена на рис. 1. Объект контроля облучается УЗ зондирующим импульсом с помощью источника УЗ излучения. Отраженный эхосигнал фиксируется решеткой N датчиков. По информации от каждого датчика по временному ряду принятых значений в блоках синхронного детектора вычисляется фаза принятого эхосигнала. Далее, в блоках формирователя фазовой звуковой голограммы выполняется расчет компоненты фазовой голограммы. Блок расчета амплитуды колебания точки растровой линии из полученных значений компонент фазовой голограммы формирует яркость полученной точки.

Входными данными системы можно считать информацию, поступающую с 64 или 128 датчиков — приемников эхосигнала. Разрядность аналого-цифрового преобразователя (АЦП) составляет 12 разрядов. Частота тонального сигнала 3 МГц, на одном периоде эхосигнала необходимо регистрировать шесть значений датчиков. Данные для формирования каждой компоненты фазовой голограммы отраженного эхосигнала регистрируются на протяжении трех периодов, т.е. регистрируется 18 значений эхосигнала.

Оценим величину потоков информации, передаваемых между блоками системы для $N = 64$. Считывание данных происходит шесть раз за период, т.е. с частотой 18 МГц, 64 двенадцатиразрядных АЦП формируют 640 бит данных за один опрос. Таким образом, суммарный поток данных, поступающих в блоки вычисления синхронного детектора, составляет 13,82 Гбит информации за одну секунду. Величина суммарного потока с выхода синхронного детектора составляет 1,28 Гбит в секунду. Такой же поток информации идет к блоку вычисления точки растровой линии. Только в блок формирования и вывода изображения в компьютер поступает с частотой 1 МГц одно значение, равное 10 бит — интенсивность точки растровой линии, величина потока составляет 10 Мбит/с.

Возникает вопрос, на каком этапе возможен ввод в компьютер такого объема информации и его последующая обработка. В современных компьютерах параллельные PCI-X и последовательные PCI Express шины обеспечивают возможность ввода необходимого потока информации. Однако производительность, требуемая для выполнения операций, связанных с расчетом параметров амплитудно-фазовой характеристики принятых эхосигналов, значительно превышает возможности современных компьютеров.

Таким образом, для реализации блоков синхронного детектирования необходимо специализированное устройство. Вычисления хорошо поддаются распараллеливанию от двух до 64 вычислительных потоков. Оценим объем вычислений в одном блоке. При частоте опроса 18 МГц необходимо находить значения синуса и косинуса фазы, умножать их на полученное от АЦП значение и добавлять в накопительные регистры. Один раз за 18 шагов необходимо отсылать значения регистров следующим блокам. При реализации на цифровых сигнальных процессорах такие преобразования займут от 12 до 28 тактов на выполнение одного шага, что при частоте 18 МГц составит требуемую скорость для обработки одного канала 216 — 504 МГц.

Для реализации приемного тракта голографической системы эхоскопии разработан многоканальный детектор фаз в виде специализированного устройства, реализованного на микросхемах ПЛИС. Сигнал с принимающего ультразвукового датчика поступает на вход соответствующего АЦП. Далее поток данных поступает на соответствующий датчику канал специализированного вычислительного устройства. Данные на выходе всех каналов суммируются и подаются в персональный компьютер для дальнейшей обработки.

Структура каждого канала представлена на рис. 2. Синхронный детектор фазы посредством умножения на опорные значения синусов и косинусов (считываемых из двух постоянных запоминающих устройств) вычисляет фазовые компоненты принятого каналом сигнала. Затем вычисляется фаза сигнала как модуль вектора с координатами, равными фазовым компонентам. Разработка структуры и алгоритма работы специализированного устройства выполнена с использованием языка VHDL и САПР Xilinx ISE Design Suite WebPack. Результаты расчетов показали, что для 64-канального устройства достаточно использования микросхемы Xilinx XC3S400-4FT256 типа Spartan 3.

Таким образом, входными данными для обрабатывающего компьютера является массив принятых фаз эхосигналов, пропорциональный значениям, на основе которых необходимо построить акустическое изображение сканируемого объекта.

На стадии компьютерной обработки и вывода полученного изображения на видеозэкран необходимо решить две задачи:

1. Расчет координат выводимых пикселей в соответствии с направлением распространения зондирующих импульсов и форматом представления данных в системе.

2. Улучшение качества изображения с помощью различных операций преобразования растрового изображения — интерполяции, наложения

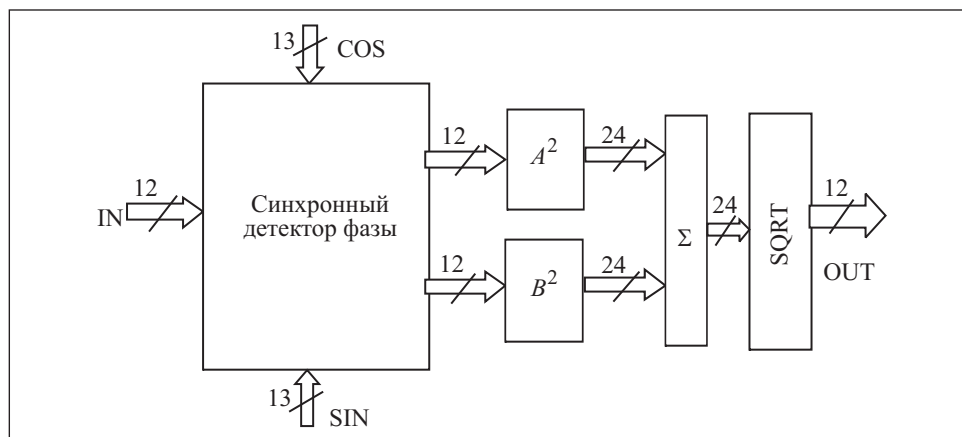


Рис. 2. Структура канала обработки данных

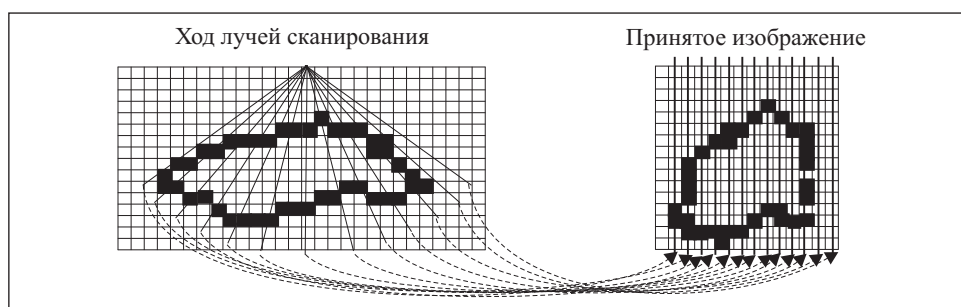


Рис. 3. Искажение геометрии изображения

фильтров резкости (подчеркивания границ, других специфических фильтров, изменения яркости и контрастности изображения). В рамки этой задачи также входит колоризация (добавление цветности) изображения, которая существенно улучшает качество восприятия изображения неоднородностей.

Суть первой задачи поясняет изображение на рис. 3. Поскольку зондирующие импульсы посылаются под углом друг к другу, а цифровая система обработки информации оперирует прямоугольным массивом (соответственно растровые линии параллельны), изображение «растягивается» вверх и «сжимается» вниз. Для вывода изображений неоднородностей на видеоскрин необходимо провести обратное преобразование координат выводимых пикселей изображений.

Вторая задача состоит в улучшении качества изображения при выводе его на экран оператора. Обычно разрешение видеомонитора значительно

превышает размеры описанного выше массива яркостей точек растровых линий. При выводе изображения на экран его необходимо увеличивать до размеров окна вывода. Такое увеличение ведет к существенной потере качества изображения, для компенсации которого, а также для увеличения информативности выводимого изображения, используют различные методы, например изменение яркости, контраста, применение бикубической и билинейной интерполяции, наложение различных фильтров и цифровых операторов.

Алгоритмы обработки и восстановления изображения сканируемого объекта приведены в [7]. Основной их особенностью является использование графического адаптера компьютера для вычислений. Указанные задачи были решены с использованием языка программирования HLSL для графических адаптеров, что позволило использовать для обработки и вывода изображений любой персональный компьютер, видеокарта которого поддерживает DirectX API.

Выводы

Таким образом, в результате экспериментов установлено, что в голографических УЗ системах дефектоскопии пространственная и контрастная разрешающая способность, при неплотном прилегании части датчиков к поверхности объекта, ухудшается незначительно. Голографические системы нечувствительны к флуктуациям скорости распространения ультразвука в зондируемой среде и практически не зависят от плотности размещения датчиков на апертуре, что делает их значительно более технологичными в производстве и эксплуатации. Разработанное ультразвуковое сканирующее устройство обладает характеристиками премиум-класса при невысокой стоимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бархатов В.А. Развитие методов ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений // Дефектоскопия. — 2003. — № 1. — С. 28—55.
2. Ермолов И.А. Наиболее перспективные направления развития ультразвукового контроля металлов (по материалам 7-й Европейской конференции) // Дефектоскопия. — 2003. — № 4. — С. 71—100.
3. Оппенхайм А.В., Лим Дж.С. Важность фазы при обработке сигналов // ТИИЭР.— 1981. — 69, № 5. — С. 39—53.
4. Иродов И.Е. Волновые процессы. Основные законы. — М. : Лаборатория базовых знаний, 1999. — 256 с.
5. Кайно Г. Акустические волны: устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов / Под редакцией О.В. Руденко. — М.: Мир, 1990. — 656 с.

6. Евдокимов В.Ф., Огир А.С., Чемерис А.А. и др. Математическая модель формирования изображения дефектов материалов в голографической системе дефектоскопии // Электрон. моделирование. — 2008. — 30, № 2. — С. 3—17.
7. Евдокимов В.Ф., Огир А.С., Чемерис А.А. и др. Методы обработки эхосигналов, используемые в медицинских голографических системах визуализации // Там же. — 2011. — 33, № 1. — С. 99—114.

O.S. Ogir, V.V. Tarapata, A.A. Chemeris, O.O. Ogir

SYSTEM OF ULTRASONIC DIAGNOSTICS WITH THE USE OF PHASE INFORMATION OF REFLECTED SOUND FIELD

Realization of the system of ultrasonic scanning of optically opaque media has been considered. The image formation model is presented, which served as a basis for the proposed block diagram of an ultrasound scanner. Separate units of the scanner and the software part, realized on the basis of calculations in the graphic adapters of the computer have been described. The ultrasonic scanner is designed for creating a portable mobile device with reduced energy consumption for medical and industrial purposes.

Keywords: coherent system, echoscopy, formation of images, spatial and contrast resolution.

REFERENCES

1. Barkhatov, V.A. (2003), "Development of methods of ultrasonic testing of welds", *Defektoskopiya*, no. 1, pp. 28-55.
2. Ermolov, I.A. (2003), "The most promising directions of development of ultrasonic testing of metals (by the data of the 7th European Conference)", *Defektoskopiya*, no. 4, pp. 71-100.
3. Oppenheim, A.V. and Lim, J. S. (1981), "Importance of phase with the signal processing", *TIIEP*, Vol. 69, no. 5, pp. 39-53.
4. Irodov, I.E. (1999), *Volnovyie protsessy. Osnovnyie zakony* [Wave processes. The basic laws], Laboratory of Basic Knowledge, Moscow, Russia.
5. Kayno, G. (1990), *Akusticheskiye volny: ustroistva, vizualizatsiya i analogovaya obrabotka signalov* [Acoustic waves: devices, visualization and processing of analog signals], Edited by Rudenko, O.V., Mir, Moscow, Russia.
6. Evdokimov, V.F., Ogir, A.S., Chemeris, A.A. et al. (2008), "A mathematical model of the imaging defects of material in the holographic system", *Elektronnoe modelirovanie*, Vol. 30, no. 2, pp. 3-17.
7. Evdokimov, V.F., Ogir, A.S., Chemeris, A.A. et al. (2011), "Methods of processing echo signals which are used in medical holographic imaging systems", *Elektronnoe modelirovanie*, Vol. 33, no. 1, pp. 99-114.

Поступила 08.12.15

ОГИР Александр Степанович, д-р техн. наук, гл. науч. сотр. Ин-та проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины. В 1972 г. окончил Киевский ин-т инженеров гражданской авиации. Область научных исследований — цифровая обработка сигналов и акустическая голография.

ТАРАПАТА Валерий Владимирович, канд. техн. наук, мл. науч. сотр. Ин-та проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины. В 2001 г. окончил Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический ин-т». Область научных исследований — разработка алгоритмов и программ для систем ультразвуковой дефектоскопии.

ЧЕМЕРИС Александр Анатольевич, канд. техн. наук, уч. секретарь Ин-та проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины. В 1982 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — архитектура и методы проектирование специализированных многопроцессорных вычислительных устройств.

ОГИР Елена Александровна, мл. науч. сотр. Ин-та проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины. В 2003 г. окончила Национальный авиационный университет (г. Киев). Область научных исследований — математическое и компьютерное моделирование в области ультразвуковой диагностики материалов и сред.