

А.С.Огир, В.В.Тарапата, А.А.Чемерис, Е. А.Огир, Киев, Украина

СИСТЕМА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗОВОЙ ИНФОРМАЦИИ ОТРАЖЕННОГО ЗВУКОВОГО ПОЛЯ

The modeling of the spatial and contrast resolution of the system, reliability, immunity to interference, error of the intensity at generating the acoustic image was carried out. Holographic systems are also insensitive to ultrasound propagation speed fluctuations in the sounded medium, and virtually do not depend on sensors packing density in the aperture, what makes holographic systems significantly more manufacturable in production and operation. The tasks to provide the required response rate were solved through programming the graphic adapters in the HLSL language, which allowed using any PC with video card supporting DirectX API for image processing and output.

Использование в когерентных системах диагностики в качестве информационного параметра фазовой информации отраженного звукового поля повышает пространственную и контрастную разрешающую способность на порядок и позволяет наблюдать изображения дефектов, близкие к реальным, на развертках типа В-скан, С-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 (когерентные) системы контроля материалов широко используются за рубежом. В Швеции с помощью таких систем осуществляется УЗ 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: 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 макро-дефектов материалов.

О значении фазовой информации эхосигналов, отраженных дефектами внутренней структуры 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, изучались 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.

Как правило, восстановленный по чисто амплитудным голограммам объект имеет мало общего с оригиналом, тогда как восстановление по чисто фазовой голограмме позволяет 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].

В нашем случае базовой математической моделью звуковой голограммы

служит дифракционный интеграл Рэля-Зоммерфельда (1).

$$U(P_0) = \frac{1}{j\lambda} \iint_{S_{o.o.}} U(P_1) \cdot \frac{e^{jK\bar{r}_{01}}}{r_{01}} \cdot \text{Cos}(\bar{n}, \bar{r}_{01}) dS_{o.o.} \quad (1)$$

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

Выражение (1), хотя и отражает математическую зависимость комплексных амплитуд сферических волн в полном объеме звукового импульса, однако не дает возможности осуществить его обращение с целью решения основной задачи – получения акустического изображения, т.е. получения значения интенсивности эхосигналов точечных дефектов-неоднородностей материала в объеме звукового зондирующего импульса.

После проведения некоторых аппроксимаций исходного уравнения (1), была получена пара взаимных преобразований между объектной функцией, соответствующей неоднородности диагностируемой среды, и функцией звуковой голограммы, соответствующей акустическому изображению неоднородности:

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

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

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; $U(x_1)$ – объектная функция; $U(x_0)$ – функция звуковой голограммы.

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

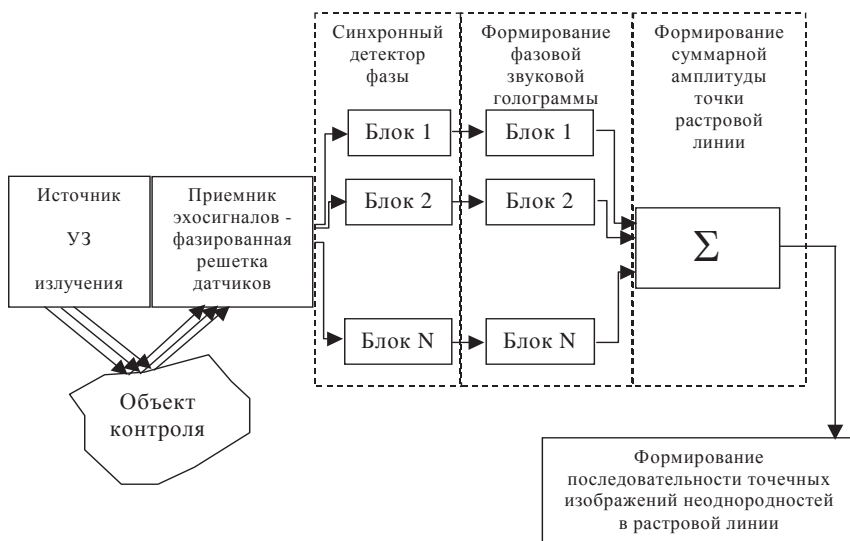


Рис. 1. Структура голографической системы эхоскопии

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 аналого-цифрового преобразователя (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 путем умножения на опорные значения синусов и косинусов (считываемых из двух постоянных запоминающих устройств) вычисляет фазовые компоненты принятого каналом сигнала. Далее вычисляется фаза сигнала, как модуль вектора с координатами, равными фазовым компонентам.

Разработка структуры и алгоритма работы специализированного устройства велась с использованием языка VHDL и САПР Xilinx ISE Design Suite WebPack, расчеты показали, что для 64-канального устройства достаточно использования относительно недорогой микросхемы Xilinx XC3S400-4FT256 типа Spartan 3.

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

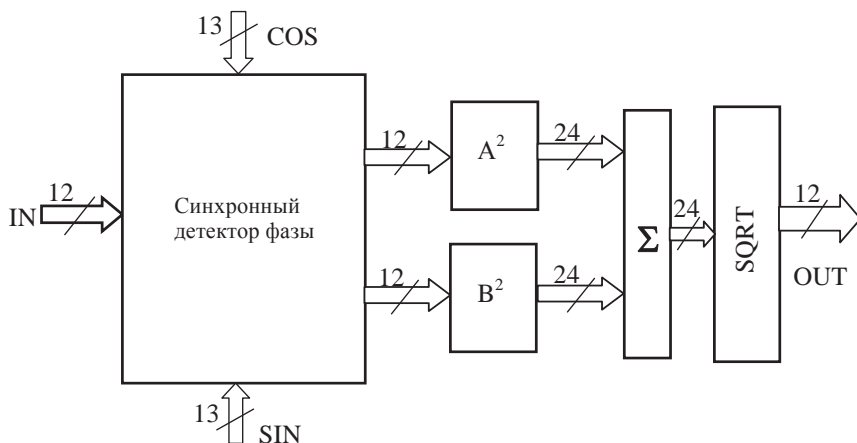


Рис. 2. Структура канала обработки данных

На стадии компьютерной обработки и вывода полученного изображения на видеоскрин необходимо решать две задачи:

1. Задачу расчета координат выводимых пикселей в соответствии с направлением распространения зондирующих импульсов и форматом представления данных в системе.
2. Задачу улучшения качества изображения с помощью различных операций преобразования растрового изображения – интерполяции, наложение 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.

Ход лучей сканирования

Принятое изображение

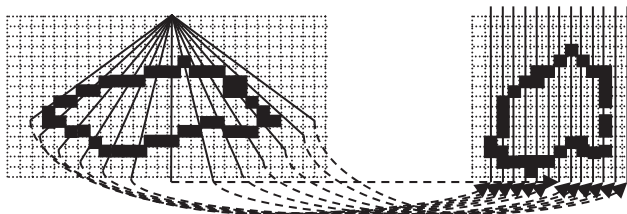


Рис. 3. Искажение геометрии изображения

Суть первой задачи поясняется рис.3. Из-за того, что зондирующие импульсы посылаются под углом друг к другу, а цифровая система обработки

информации оперирует прямоугольным массивом (соответственно, растровые линии расположены параллельно друг другу), изображение «растягивается» вверх и «сжимается» вниз. Для вывода изображений неоднородностей на видеозэкран необходимо провести обратное преобразование координат выводимых пикселей изображений.

Второй задачей при выводе изображения неоднородности на экран оператора является улучшение качества изображения. 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 изображения, применение бикубической и билинейной интерполяции, наложение различных фильтров и цифровых операторов.

Для обеспечения быстродействия преобразований изображений в реальном времени, указанные задачи были решены с помощью программирования графических адаптеров на языке HLSL, что позволило использовать для обработки и вывода изображений любой персональный компьютер, видеокарта которого поддерживает DirectX API.

Было проведено моделирование пространственного и контрастного разрешения системы, надежности, помехоустойчивости, погрешности интенсивности при создании акустического изображения. Экспериментально показано, что в голографических УЗ системах дефектоскопии пространственная и контрастная разрешающая способность при неплотном прилегании части датчиков к поверхности объекта ухудшается незначительно. Голографические системы также являются нечувствительными к флуктуациям скорости распространения ультразвука в зондируемой среде, и практически не зависят от плотности размещения датчиков на апертуре, что делает голографические системы значительно более технологичными в производстве и эксплуатации.

1. Бархатов В. А. Развитие методов ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений // Дефектоскопия. № 1, 2003. - С. 28-55.
2. Ермолов И. А. Наиболее перспективные направления развития ультразвукового контроля металлов (по материалам 7-й Европейской конференции) // Дефектоскопия. №4, 2003. - С.71-100.
3. Оппенхайм А. В., Лим Дж. С. Важность фазы при обработке сигналов // ТИИЭР, т.69, № 5, 1981. - 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.

Поступила 1.9.2015г.