



УДК 620.179

В. Ф. Евдокимов, чл-кор. НАН Украины,
А. С. Огир, д-р техн. Наук, **В. В. Тарапата**, аспирант
Ин-т проблем моделирования
в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины
(Украина, 03164, Киев, ул. Генерала Наумова, 15,
тел.: (044) 4242296; E-mail: svetlana@ipme.kiev.ua)

Математические модели процессов формирования изображений в системах ультразвуковой дефектоскопии неголографического типа

Приведен краткий обзор работ, посвященных математическим моделям и алгоритмам формирования акустических изображений дефектов в системах дефектоскопии неголографического типа, в которых используется входная информация в виде пространственного распределения амплитуды отраженного волнового поля. Проанализированы факторы, влияющие на качество получаемых изображений дефектов по пространственному и контрастному разрешению.

Наведено короткий огляд робіт, присвячених математичним моделям і алгоритмам формування акустичних зображень дефектів у системах дефектоскопії неголографічного типу, у яких використовують вхідну інформацію у вигляді просторового розподілу амплітуди відбитого хвильового поля. Проаналізовано фактори, що впливають на якість отриманих зображень дефектів по просторовому та контрастному розрізненню.

К л ю ч е в ы е с л о в а: дефектоскопия, голография, акустическое изображение.

Рассмотрим физические и алгоритмические закономерности, характерные для неголографических систем дефектоскопии и факторы, влияющие на качество изображений дефектов.

В современных зарубежных системах дефектоскопии используются когерентные (голографические) методы формирования изображений неоднородностей в структуре материалов.

Ультразвуковые (УЗ) системы дефектоскопии формируют оптический аналог акустического изображения внутренней структуры оптически непрозрачных сред, материалов и объектов. При этом решающим фактором, обеспечивающим достоверность и информативность воссоздаваемых акустических изображений являются характеристики пространственного разрешения и точности воссоздания интенсивности эхосигналов в пикселях изображения при наличии мощных реверберационных помех и собственных шумов системы дефектоскопии. Современные системы, используемые для решения

задач УЗ неразрушающего контроля, реализуют процессы формирования изображений дефектов внутренней структуры на основе различных способов фокусировки рассеянных объектом эхосигналов.

Преимуществом методов формирования акустических изображений является возможность использования очень коротких зондирующих импульсов, длительность которых составляет несколько периодов колебаний УЗ волны, что дает возможность высокого пространственного разрешения вдоль линии распределения звукового зондирующего импульса. Таким образом можно выделять слои объекта, расположенные на разных расстояниях от приемника эхосигналов и осуществлять визуализацию объекта послойно, используя методы электронного сканирования [1].

Методы формирования акустических изображений основаны на регистрации и обработке когерентного или некогерентного излучения, получаемого в результате взаимодействия падающей волны с объектом контроля. Акустическое изображение находят в результате превращения амплитуды интенсивности принятого суммарного вторичного излучения в пропорциональную яркость оптического изображения.

Будем рассматривать физические и алгоритмические закономерности формирования моделей эхосигналов, используемых в задачах построения акустических изображений дефектов материалов.

С помощью модели прозвучивания изделий на основе точных решений волнового уравнения можно решать задачи для всех эффектов в волновых процессах: излучение и отражение волн, явление интерференции и дифракции волн, трансформация типа волны при отражении, возбуждение затухающих и бегущих волн на границе раздела сплошной среды и др. [2—4]. Однако накопленный опыт точного решения волновых акустических задач практически невозможно использовать в рассматриваемом случае, так как еще не доказано существование и единственность решения обратной задачи, а известные способы приближенных решений не обладают универсальностью.

В теории рассеяния решена задача получения информации о неоднородностях среды по откликам на воздействия различной природы — оптическое и радиационное излучение, электромагнитные волны, УЗ волны [5—7]. Особенностью предлагаемого метода является условие, согласно которому размер области наблюдения во много раз превышает размер неоднородности среды. Вводится оператор рассеяния, связывающий волновые потоки, поступающие в область наблюдения, и выходящие из нее. В этом операторе заключена вся информация о внутренней структуре среды. Обычно неоднородность представляют в виде распределения плотности среды $\rho(x, y, z)$ или скорости звука $C(x, y, z)$ в пространстве.

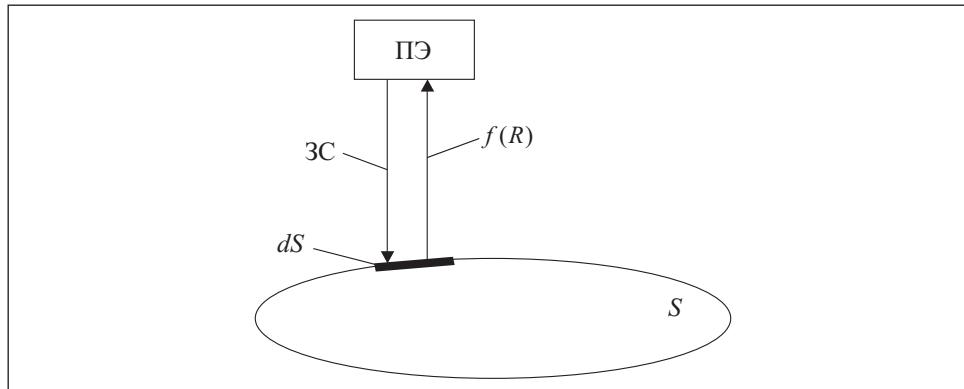


Рис. 1

Доказано, что в среде, имеющей один тип акустических волн (газ, жидкость), где оператор рассеяния является полным и однозначным, существует единственный обратный оператор [8]. К сожалению, до настоящего времени не найдены конструктивные пути решения обратной волновой задачи в виде, пригодном для восстановления поверхностей дефектов в металле.

Существующая неоднозначность интерпретации эхосигналов от различных отражателей связана со сложной динамикой волнового уравнения для твердых тел с несколькими границами или с криволинейными границами. По этой причине, используя волновое уравнение, невозможно теоретически сформулировать и решить задачу восстановления отражающих границ по данным прозвучивания (обратную задачу). Приходится идти на серьезные упрощения теоретической модели для того, чтобы появилась возможность решения обратной задачи.

На рис. 1 представлена схема зондирования объекта, на которой обозначено: ПЭ — приемник эхосигналов; ЗС — зондирующий сигнал; S — поверхность дефекта; dS — элемент поверхности дефекта; R — расстояние от излучателя-приемника (пьезоэлемента (ППЭ)) до элементарной поверхности dS ; $f(R)$ — эхосигнал от элемента dS , регистрируемый ПЭ.

Особенности формирования модели эхосигналов следующие.

1. Амплитуда эхосигнала зависит от расположения и ориентации элемента dS в пространстве. Следовательно, функцию $f(R)$ можно указать только с точностью до постоянного множителя. Вследствие этого нестабильность амплитуды эхосигнала от элементарной поверхности дефекта является основным источником ошибок интерпретации поверхности дефектов в формируемых неголографической системой изображениях внутренней структуры контролируемого материала.

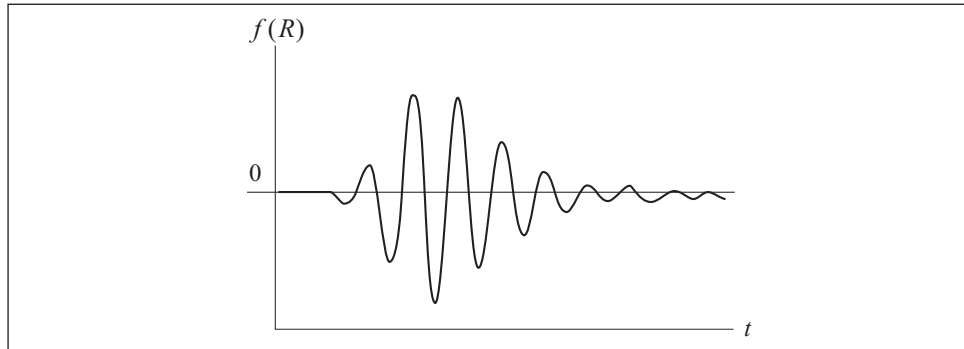


Рис. 2

2. Известно, что диаграмма направленности УЗ преобразователя существенно зависит от длины волны. Чем больше длина волны, тем шире диаграмма направленности. Спектральная характеристика чувствительности системы к эхосигналу $f(R)$ изменяется в зависимости от угла излучения и приема волн. При этом спектр функции $f(R)$ также искажается, что проявляется одновременно в изменении чувствительности системы и в искажениях $f(R)$. Указанные связи ослабевают, если $f(R)$ имеет узкий спектр. Модельные представления в этом случае относятся только к схемам прозвучивания, в которых используются относительно узкополосные сигналы.

Математически функция $f(R)$ представляет собой импульсный отклик системы при воздействии на бесконечно малый отражатель. Эхосигнал $f(R)$ ограничен во времени и в пространстве. Он отличен от нуля в интервале времени от нуля до t_0 и, соответственно, в пространстве в интервале от нуля до Ct_0 , где C — скорость звука. Вид данного сигнала непосредственно связан с характеристиками электроакустического тракта УЗ прибора. По традиции назовем $f(R)$ функцией отклика точечного источника (ФОТИ). Пример ФОТИ показан на рис. 2 в виде кривой эхосигнала от плоскодонного отражателя диаметром 1,2 мм в стальном образце; преобразователь WB2N45; УЗ дефектоскоп PCUS-10 [1]. Полагая, что акустические характеристики объекта плавно изменяются в пространстве [7], выбирают распределение скорости звука, затухание или коэффициент отражения по объекту. Затем выбранное распределение реконструируют по данным прозвучивания. Такой подход реализован в медицинских УЗ приборах.

Теоретические расчеты и практика использования эхометода показывают, что на формирование эхосигналов значительное влияние оказывает геометрический фактор, т. е. расположение и форма отражателей, а кроме того, — интерференция волн, трансформация типа волны, переизлучение.

В некоторых случаях эти эффекты существенно искажают эхосигналы, а иногда не оказывают существенного влияния. Можно определенно сказать, что если дефект имеет прозвучиваемые поверхности с достаточным для регистрации коэффициентом отражения, то будет наблюдаться эхосигнал и, следовательно, будет формироваться его изображение. Трансформированные и переизлученные волны могут создавать дополнительные сигналы, которые, в конечном счете, будут показаны системой визуализации как ложные изображения дефектов. В алгоритмах реконструкции изображений обычно принимаются меры для подавления «несанкционированных» сигналов.

Более детальную информацию об отражателях получают посредством прозвучивания объекта контроля в различных направлениях, или сканированием. В результате получают набор распределений эхосигналов $F_i(L)$, где i — характеристика положения сканера на поверхности изделия или индекс схемы прозвучивания, если используется блок преобразователей; L — суммарная длина пробега волн от излучателя до дефекта и обратно. Затем проводят обработку функции $F_i(L)$ для реконструкции изображения отражателей.

Рассмотрим возможность решения обратной задачи с применением описанной модели. Основное значение имеет функция отклика точечного источника. В узкополосном и широкополосном приближениях ФОТИ является ядром оператора преобразования объекта контроля в эхосигналы. Если имеется определенное число различных схем прозвучивания какой-либо области материала с одной и той же ФОТИ, то можно считать, что существует оператор прозвучивания, который обозначим Q . Данный оператор выполняет преобразование функции объекта контроля O в бесконечный набор эхосигналов F [2]: $F(R) = Q[O]$, где Q — линейный приближенный интегральный оператор. При этом Q обладает следующими свойствами:

линейность, $Q[KO] = KQ[O]$, где K — постоянный множитель;

аддитивность, $Q[O_1 + O_2] = Q[O_1] + Q[O_2]$, где O_1 и O_2 — непересекающиеся неоднородности в материале;

однозначность, если любому объекту O соответствуют определенные оригинальные эхосигналы F ; в этом случае оператор Q — полный.

Если оператор Q обладает указанными свойствами, то существует оператор обратного преобразования Q^{-1} такой, что $O = Q^{-1}[F]$. Оператор Q^{-1} также является интегральным и обладает свойствами линейности, аддитивности и полноты. Доказательство существования и единственности оператора Q^{-1} вытекает из теории групп.

Следует заметить, что в большинстве способов решения обратной задачи, основанных на теоретическом подходе, используется свойство линейности, аддитивности и полноты оператора Q [2, 9, 10]. Именно эти

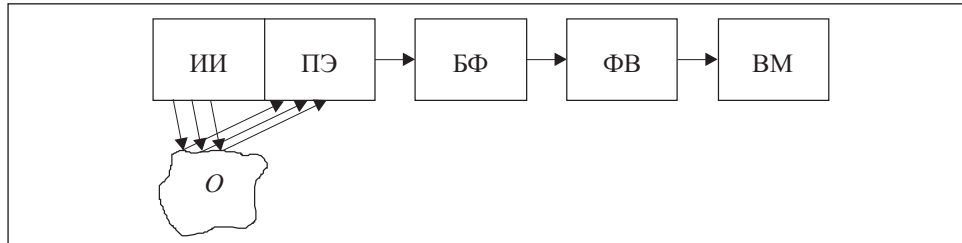


Рис. 3

свойства оператора Q обеспечивают возможность построения изображений дефектов.

Ряд приближений связан со свойством аддитивности операторов Q и Q^{-1} . Аддитивность сигналов по отношению к отражающим поверхностям выполняется, если УЗ волны отражаются в объекте контроля один раз, т. е. отсутствуют эхосигналы, двукратно и многократно отраженных волн. В противном случае возникает неоднозначность интерпретации сигналов.

Свойство аддитивности операторов дополнительно требует отсутствия теней от неоднородностей (дефектов). Ясно, что если один дефект препятствует прозвучиванию второго дефекта или границы изделия, то информация об отражателях в тени не появляется на изображении. Когда проводят реконструкцию изображения с помощью оператора Q^{-1} , то полагают, что все отражающие поверхности полупрозрачны, не создают теней и, более того, не ослабляют волн, проникающих через поверхность.

Процесс формирования акустических изображений включает следующие операции [2, 6]:

- облучение объекта контроля;
- регистрация рассеянных эхосигналов (амплитудных значений);
- обработка эхосигналов для фокусировки изображений;
- преобразование суммарного эхосигнала в эквивалентный видеосигнал и отображение его на видеомониторе.

Блок-схема формирования изображения в системе дефектоскопии представлена на рис. 3, где обозначено: ИИ — источник УЗ излучения; БФ — блок фокусировки изображения; ФВ — формирователь видеосигналов; ВМ — видеомонитор; O — объект контроля.

Для случая формирования двумерного изображения описание параметра, акустическое изображение которого формируется системой, представляется двумерной функцией $f(x, y)$, где x, y — пространственные координаты объектной сканируемой плоскости. Функцию $f(x, y)$ будем называть функцией исходного изображения объекта контроля O .

Если изображение на экране обозначить $g(\xi, \eta)$, то обобщенный оператор формирования акустического изображения можно записать в виде [2, 4] $g(\xi, \eta) = A\{f(x, y)\} + n(\xi, \eta)$, где ξ, η — пространственные координаты на индикаторе; $n(\xi, \eta)$ — шумы, искажающие изображение в точке ξ, η . Оператор A может быть достаточно сложным, поскольку он отображает цепочку различных по характеру операций, соответствующих назначению каждого из блоков блок-схемы (см. рис. 3). В дефектоскопии этот оператор имеет вид операции свертки:

$$g(\xi, \eta) = \iint_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \times h(\xi, \eta, x, y) dx dy + n(\xi, \eta),$$

где $h(\xi, \eta, x, y)$ — весовая, аппаратная функция.

Следует заметить, что один и тот же объект контроля может дать различные акустические изображения, если в системе дефектоскопии при сканировании объекта будут зарегистрированы различные акустические параметры, характеризующие среду (материал) объекта: скорость звука, коэффициент отражения (градиент акустического импеданса), коэффициент поглощения (затухания) [4].

Обработка эхосигналов в системах формирования акустических изображений, в которых в качестве приемника используется фазированная решетка пьезоэлементов, сводится к фокусировке. С помощью этих методов решается задача получения сильного отклика фокусируемой точки объекта на линии сканирования суммированием сигналов от различных точек апертуры измерений с такими величинами задержки во времени, при которых суммируются сигналы фокусируемой точки с одной и той же начальной фазой. Суммарный отклик эхосигналов от других точек звукового импульса, приходящих на сумматор не в фазе, будет эквивалентным стохастическому колебанию (см. рис. 2).

Блок-схема фокусирующей системы представлена на рис. 4, где обозначено: У — усилитель с устройством временного автоматического регулирования усиления (ВАРУ); ППЭ — приемные пьезоэлементы измерительной решетки; ЛЗ — линия задержки; Σ — сумматор; БФИ — блок формирования видеосигнала; S_{Σ} — суммарный эхосигнал.

Фокусирующие системы, в которых используются физические линзы или пьезокерамические преобразователи со сферической поверхностью, а также системы, в которых используются различные эквиваленты физической линзы, можно отнести к классу согласованных пространственных фильтров для обработки пространственно-временных сигналов. Практически, все УЗ системы интроскопии, осуществляющие фокусировку пространственно-рассеянных сигналов, являются согласованными простран-

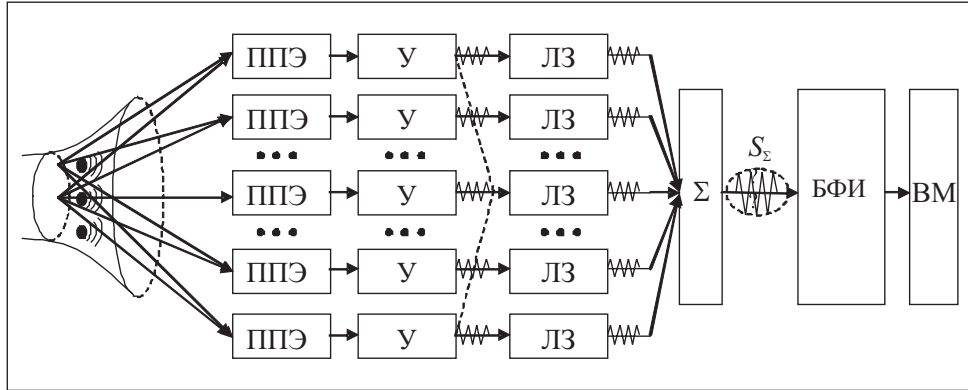


Рис. 4

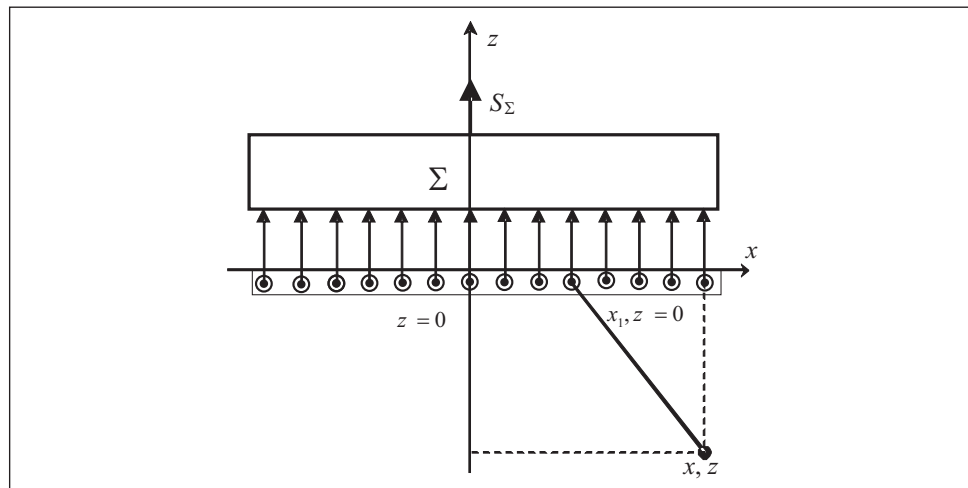


Рис. 5

венными фильтрами и могут быть описаны в рамках теории согласованной фильтрации [4]. В любой системе с откликом на δ -импульс, равным $f(t)$, оптимальное соотношение сигнал — шум и максимальное значение пикового сигнала на выходе фильтра можно получить, если пропустить выходной сигнал системы через согласованный фильтр с откликом, равным $f^*(-t)$.

Допустим, что в плоскости $Z_0 = 0$ расположена измерительная линейная решетка системы УЗ эхоскопии бесконечно малой ширины (рис. 5). Обозначим координаты некоторой произвольной точки на апертуре измерений $x_1, z = 0$. Сигнал, приходящий в точку $x_1, z = 0$ от линейного источника, находящегося в точке x, z , имеет вид $f(x - x_1, z - z_0) = f(x - x_1, z)$. Соответствующий максимальный выходной сигнал даст согласованный

фильтр с откликом $f^*(x-x_1, z)$. Считая измерительную апертуру непрерывной структурой с откликом $g(x_1)$, можно показать, что выходной сигнал от точки $x_1, 0$ на выходе S_Σ максимален, если отклик $g(x_1)$ выбран так, что система представляет согласованный пространственный фильтр для пространственно изменяющегося сигнала $f(x_1, z_0, x, z)$. Расстояние от точки $x_1, z_0 = 0$ до точки x, z запишем в виде

$$R = \sqrt{(x-x_1)^2 + (z-z_0)^2} = \sqrt{(x-x_1)^2 + z^2}.$$

Сигнал точечно-подобного источника в точке x, z , изменяющийся по закону $e^{j\omega t}$ в предположении $R \gg \lambda$, или $KR \gg 2\pi$, где K — волновое число $2\pi/\lambda$, а λ — длина волны, имеет вид [4]

$$f(t, R) = \frac{e^{j\omega t} e^{jKR}}{R},$$

где ω — круговая частота; $j = \sqrt{-1}$. Предполагая, что отклик приемной системы в интервале x_1 и $x_1 + dx_1$ имеет вид $g(x_1) dx_1$ и сигналы всех приемных элементов суммируются с весовым коэффициентом, равным отклику $g(x_1)$, выходной сигнал всей приемной системы представим в виде функции пространственных координат

$$y(x, z) = \int_x f(x_1, z) g(x-x_1) dx_1,$$

где dx_1 — интервал дискретизации x . Для случая, когда $g(x-x_1)$ выбран равным $f^*(-x_1, z)$, выходной сигнал согласованного фильтра имеет вид

$$y(x_1 z=0) = \alpha \int_x f(x_1, z) f^*(-x_1, z) dx_1 = \alpha \int_x [a(x_1, z)]^2 dx_1,$$

где $a(x_1, z)$ — амплитуда эхосигнала в точке x_1, z ; α — масштабный коэффициент.

Линейный фильтр, делающий отношение мощности отраженного сигнала к шуму максимальным, является согласованным фильтром. Выходной сигнал согласованного фильтра — узкий импульс, представляющий автокорреляционную функцию входного сигнала. Поскольку согласованный фильтр настроен на поиск и выделение из аддитивной смеси своего собственного сигнала, он является оптимальным для работы как в условиях когерентных помех, так и для случайного шума [4]. Идеальный обратный фильтр требует бесконечной ширины полосы частот, которую реальная система обеспечить не может, что отражается на качестве восстанавливаемых изображений.

Основное значение в системе дефектоскопии неголографического типа при формировании акустического изображения имеет диаграмма направленности звукового луча на излучение и на прием. Качество формируемого изображения определяется поперечным сечением звукового луча в режимах излучения звукового импульса и приема эхосигналов.

В режиме излучения границы луча определяют область, в которой сосредоточена основная часть излучаемой мощности. За пределами зоны луча излучаемая мощность уменьшается при удалении от акустической оси луча и при удалении вдоль луча от точки фокуса. Обычно диаграммы направленности звукового луча на излучение и на прием идентичны. Акустическое изображение в этом случае формируется из отметок, зерен и пятен различной яркости и различных размеров для одного и того же точечного объекта, как из элементов мозаики. Причиной этого является различная поперечная и продольная разрешающая способность луча на различных глубинах зондирования. Чем меньше элементы мозаики, тем более четкое и менее зернистое формируемое акустическое изображение [3, 4, 10].

Продольное разрешение в системах дефектоскопии определяется в виде [4, 9, 11]

$$\Delta L \cong (C\Delta\tau)/2,$$

где $\Delta\tau$ — длительность зондирующего сигнала; C — скорость распространения продольной волны.

Потенциальная поперечная разрешающая способность систем интроскопии согласно критерию Рэля определяется в виде $L_{\min} \geq \lambda/2$, что для систем УЗ контроля металлов на частотах 3,5 МГц и 5 МГц составляет соответственно 0,86 мм и 0,6 мм.

Таким образом, реальная поперечная разрешающая способность неголографических систем формирования акустических изображений ограничена в результате влияния методологических аспектов формирования изображений, аппаратных ограничений по формированию диаграммы направленности звукового луча, а также собственных шумов системы и сигналов реверберации, возбуждаемых при зондировании объекта контроля.

О функции приемно-передающего тракта системы можно заметить следующее. Одним из факторов, определяющих отношение сигнал — шум (исключая шум реверберации), является амплитуда зондирующего импульса. Однако она ограничена возможностью:

- а) появления нелинейных эффектов при распространении в среде исследуемого объекта;
- б) появления нелинейных эффектов в работе пьезопреобразователя решетки.

Затухание сигналов в зондируемой среде пропорционально глубине зондирования и компенсируется с помощью устройства временного автоматического регулирования усиления (ВАРУ). Приближенная компенсация амплитуд эхосигналов в эхоимпульсных системах с помощью ВАРУ не позволяет получать данные с различных глубин, которые можно было бы считать количественно обоснованными в метрологическом смысле. Акустическое затухание действует как дисперсионный фильтр, селективно ослабляющий высокочастотные составляющие спектра излучаемого импульса. Следовательно, области изображения, отображающие объекты на разных глубинах, формируются эхосигналами с различным спектром огибающей, что также влияет на качество акустического изображения [4, 11].

Дифракционный предел разрешения ограничивает диаграмму направленности преобразователя на излучение.

Рассмотрим аспект формирования изображения, связанный с восприятием контраста и контрастным разрешением. Для любой электронно-лучевой трубки отношение максимальной яркости к минимальной составляет приблизительно 100. Определим пространственное распределение сигнала изображения, возникающее от точечного тест-сигнала, как функцию рассеяния точки, а возникающее от линейного тест-сигнала как функцию рассеяния линии [4, 9].

Зрение человека лучше всего воспринимает частоты от одного до пяти линий на градус. Другая важная характеристика зрения, связанная с разрешением, — способность к восприятию контраста. Восприятие контраста зависит от резкости его границы. Предел достижимого оптического контраста, равный 60 линий на градус, может быть достигнут при больших уровнях освещенности и низком уровне шумов. Оба эти фактора важны для разрешения по контрасту, т.е. способности различать соседние области по яркости изображения.

Глаз человека в идеальных условиях (резкая граница между двумя полубесконечными областями и яркое освещение) способен различить уровни яркости, отличающиеся лишь на 1%, т.е. диапазон градаций контраста, воспринимаемый глазом человека, равен приблизительно 40 дБ. На практике ситуация резко ухудшается из-за действия следующих факторов [4, 12]:

- использования освещенности ниже оптимальной;
- отсутствия резких границ;
- недостаточной площади тест-объекта;
- наличия шумов и помех.

Влияние шума изображения на его восприятие было детально исследовано в связи с задачами электрооптической визуализации и проблемой фотографического зерна, в которых используется понятие сосредоточенной помехи (термин имеет более общее значение, чем нежелательный

сигнал). Важное различие между шумом и помехой состоит в том, что шум имеет некогерентную природу, а помеха может быть частично когерентна с сигналом. В системе формирования акустических изображений частично когерентную помеху по отношению к эхосигналу фокусируемой точки составляют эхосигналы точек в звуковом импульсном объеме, соседних с фокусируемой точкой на акустической оси звукового луча.

В результате исследований установлено, что шум (помеха) оказывает наибольшее воздействие на понижение способности распознавания, если это происходит при пространственных частотах, для которых модуляционная передаточная функция (МПФ) имеет большое значение. МПФ системы определяет отношение амплитуд множества пространственных гармоник, соответствующих изображению и оригиналу. Для многозвенной системы визуализации МПФ представляет произведение всех ее отдельных звеньев.

При проектировании систем формирования изображений часто используют динамический диапазон эхосигналов, принимаемых от различных рассеивающих структур, равный 40 дБ. Этот диапазон определяется логарифмом отношения максимального полезного эхосигнала к слабому эхосигналу (на уровне шума). Однако обычно эта величина почти вдвое превышает динамический диапазон, свойственный самым высококачественным устройствам отображения (по интенсивности). Поэтому для улучшения распознавания слабо рассеивающих структур необходимо осуществлять сжатие сигналов по амплитуде, что представляет собой особый вид нелинейного усиления сигналов различного уровня. В общем случае нелинейное усиление требуется и по причине необходимости адекватного согласования уровней сигнала в изображении с характеристиками зрения человека [3, 4, 11, 12].

Таким образом, можно утверждать, что в системе УЗ дефектоскопии процедуры сканирования УЗ лучом исследуемой среды, измерения эхосигналов, фокусировки сигналов должны быть согласованы с процессом формирования и отображения на экране видеомонитора видеосигналов, эквивалентных сфокусированным эхосигналам.

Выводы. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что ограниченное пространственное и контрастное разрешение неолографических систем дефектоскопии объясняется влиянием следующих методологических и технологических факторов на процесс формирования акустического изображения внутренней структуры материалов.

1. При формировании изображений невозможна постановка и решение обратной задачи, основанной на точных решениях волнового уравнения. Это связано с неоднозначностью интерпретации амплитудных характеристик эхосигналов от различных отражателей. Одному и тому же набору эхо-

сигналов могут соответствовать совершенно разные комбинации отражающих поверхностей в зависимости от местоположения и формы дефекта.

Упрощенные модели эхосигналов в принципе позволяют сформулировать обратную задачу и решить ее. Однако в рассматриваемых моделях учитывается в основном интерференция волн. В них не учитывается физическое явление дифракции, имеется большое число допущений и разного рода приближений.

2. Ограниченное поперечное разрешение неголографических систем дефектоскопии определяется размерами поперечного сечения звукового луча на различной глубине зондирования объекта.

3. В объеме ультразвукового импульса все эхосигналы, отраженные неоднородностями среды, имеют практически равное усиление в связи формируемой диаграммой направленности на излучение. В этом случае эхосигналы фокусируемых точек на акустической оси звукового луча (растровой линии акустического изображения) могут быть полностью или частично маскированы эхосигналами соседних точек в объеме звукового импульса при их суммировании, несмотря на выполняемую операцию фокусировки (задержки эхосигналов фокусируемой точки на величину, пропорциональную разности длин траекторий распространения). Отображение среды на экране осуществляется по принципу мозаики с элементами различной яркости, определяемой как полезными эхосигналами, так и сигналами-помехами, имеющими реверберационную природу.

4. При распространении коротких зондирующих сигналов и отраженных от неоднородностей среды эхосигналов фронты сигналов изменяют свою форму в сторону увеличения длительности в результате преимущественного поглощения средой высокочастотных составляющих спектра эхосигналов. При этом амплитуда огибающей суммарного эхосигнала флуктуирует и вносит искажения в формируемое акустическое изображение.

5. Наиболее существенные достижения в создании современных систем дефектоскопии связаны с использованием голографических (когерентных) методов формирования эхоимпульсных ультразвуковых изображений дефектов материалов, а также с применением линейных измерительных решеток регистрации эхосигналов и алгоритмов гомоморфной фильтрации для улучшения качества акустических изображений [1, 13].

The brief review of publication is given for mathematical models and forming algorithms acoustic images of defects in the flaw detection systems unholographic type. The input data for that system is a spatial distribution of reflected wave field amplitude. The factors are analysed which influence on the quality of defect images obtained on spatial and contrasting resolution.

1. Ермолов И. Н. Достижения в теоретических вопросах ультразвуковой дефектоскопии. Задачи и перспективы. — Дефектоскопия. — 2004. — № 11. — С. 13—47.
2. Бархатов В. А. Модели формирования ультразвуковых сигналов в задачах реконструкции изображений. — Дефектоскопия. — 2005. — № 2. — С. 10—19.
3. Corl P. D., Kino G. S., DeSilets C. S., Grant P. M. A digital synthetic focus acoustic imaging system// Acoustical Imaging. — Vol. 8./ A.F.Metherell. Ed. — N Y : Plenum, 1980.
4. Кайно Г. Акустические волны: устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов /Под ред. О. В. Руденко. — М. : Мир, 1990. — 656 с.
5. Питер Д. Лаке, Ральф С. Филипс. Теория рассеяния/ Под ред. М. Ш. Бирмана. Пер. с англ. — М. : Мир, 1971. — 312 с.
6. Рид М., Саймон Б. Методы современной математической физики. Т. 3. Теория рассеяния/Пер. с англ. — М. : Мир, 1982. — 443 с.
7. Рид М., Саймон Б. Методы современной математической физики. Т. 4. Анализ операторов. /Пер. с англ. — М. : Мир, 1982. — 428 с.
8. Данилов В.Н., Самокрутов А.А. Моделирование работы пьезопреобразователей с сухим точечным контактом в режиме излучения. — Дефектоскопия. — 2003. — № 8. — С. 11—23.
9. Бабак В.П. Обробка сигналів при формуванні зображень об'єктів. — К. : Либідь, 1994. — 192 с.
10. Бархатов В. А. Развитие методов ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений. — Дефектоскопия. — 2003, № 1. — С. 28—55.
11. Физика визуализации изображений в медицине. В 2-х томах./ Под ред. С. Уэбба. Пер. с англ. — М. : Мир, 1991.
12. Хуанг Т. Цифровая голография // ТИИЭР. — 1971. — 59, № 9. — С. 68 — 81.
13. Бадалян В. Г., Базулин Е. Г. Применение гомоморфной фильтрации для повышения качества изображений дефектов при экспертном контроле сварных швов трубопроводов. — Дефектоскопия. — 2003. — № 4. — С. 15—22.

Поступила 09.07.07

ЕВДОКИМОВ Виктор Федорович, чл.-кор. НАН Украины, директор Ин-та проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова НАН Украины. В 1963 г. окончил Харьковский политехнический ин-т. Область научных исследований — методы и устройства для математического моделирования, математическое и компьютерное моделирование энергетических систем.

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, аспирант Ин-та проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины. В 2001 г. окончил Национальный технический университет «КПИ». Область научных исследований — разработка алгоритмов и программ для систем ультразвуковой дефектоскопии.