

В.Ф. Евдокимов, Киев

В.В. Душеба, Киев

Е.А. Огир, Киев

МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

Abstract. The abstract review of works that are devoted to mathematical models and algorithms of generation of acoustic pictures of defects, which formed in the systems of fault detection, using entrance information as a spatial distributing of amplitude of the reflected wave field is resulted in the article. The analysis of reasons, influencing on quality of the result images of defects on spatial and contrast resolution is conducted.

Актуальность. Настоящая работа посвящена исследованию методов и алгоритмов обработки эхосигналов в системах дефектоскопии, использующих в качестве входной информации амплитудное распределение отраженного от объекта волнового поля.

Постановка задачи. Целью работы является исследование физических и алгоритмических закономерностей, характерных для систем отмеченного типа и причин, влияющих на качество создаваемых изображений дефектов.

В современных зарубежных системах дефектоскопии используются когерентные (голографические) методы формирования изображений неоднородностей в структуре материалов. В цикле следующих работ предполагается отразить результаты исследований по разработке математических моделей, алгоритмов и измерительно-вычислительных структур голографических систем, формирующих акустические изображения типа В-скан, С-скан с высоким пространственным и контрастным разрешением на основе регистрации амплитудно-фазовых характеристик поля отраженной волны.

Решение задачи. 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 создаваемых акустических изображений являются характеристики пространственного разрешения и точности воссоздания интенсивности эхосигналов в пикселях изображения в присутствии 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 [13].

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

В данной работе рассмотрены физические и алгоритмические закономерности формирования моделей эхосигналов, используемых в задачах построения акустических изображений дефектов материалов.

Можно создать модель прозвучивания изделий на основе точных решений волнового уравнения. Такая модель будет давать решение 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 границах раздела сплошной среды и т.д. [1, 9, 10]

Однако накопленный опыт в точном решении волновых акустических задач практически невозможно использовать для наших целей, так как в самом общем случае не доказано существование и единственность решения обратной задачи, а известные способы приближенных решений не обладают универсальностью, так как математическое описание в каждом случае является оригинальным.

Существует раздел математики – теория рассеяния, в котором решается задача получения информации о неоднородностях среды по откликам на воздействия различной природы – оптическое и радиационное излучение, электромагнитные волны, УЗ волны [4, 5, 6]. **Особенностью данного метода является условие, что 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 операторе рассеяния заключена вся информация о внутренней структуре среды.** Обычно неоднородность представляют в виде распределения плотности среды $p(x, y, z)$ или скорости звука $C(x, y, z)$ в пространстве.

Доказано, что в среде с одним типом акустических волн (газ, жидкость), где оператор рассеяния является полным и однозначным, существует

единственный обратный оператор [3]. К сожалению, в настоящее время не найдено конструктивных путей 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.

При использовании схемы зондирования объекта рис. 1 приняты обозначения:

ЗС – зондирующий сигнал

S – поверхность дефекта, dS – элемент поверхности дефекта

R – расстояние от излучателя-приемника (пьезоэлемента ПЭ) до элементарной поверхности dS .

$f(R)$ – эхосигнал, регистрируемый ПЭ от элемента dS .

ПЭ – приемник эхосигналов

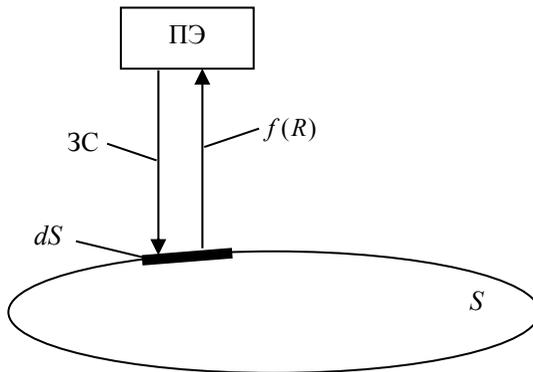


Рис. 1. Схема зондирования объекта

Здесь нужно отметить следующие особенности формирования модели эхосигналов.

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 в интерпретации

поверхности дефектов в формируемых неголографической системой изображениях внутренней структуры контролируемого материала.

2. Известно, что диаграмма направленности УЗ преобразователя сильно зависит от длины волны. Чем больше длина волны, тем шире диаграмма направленности. Спектральная характеристика чувствительности системы к эхосигналу $f(R)$ меняется 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 0 до t_0 , соответственно, в пространстве в интервале $0 \div Ct_0$, 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). В качестве примера ФОТИ на рис. 2 показан эхосигнал от плоскодонного отражателя диаметром 1,2 мм в стальном образце. Преобразователь WB2N45. УЗ дефектоскоп PCUS-10 [1].

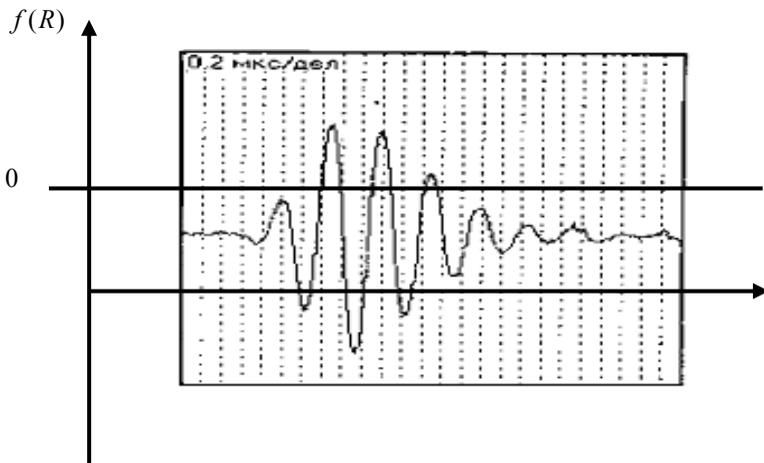


Рис. 2. Эхосигнал от плоскодонного отражателя

Считая, что акустические характеристики объекта плавно изменяются в пространстве [6], выделяют распределение скорости звука, затухание или,

чаще всего, коэффициента 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 значительно оказывает влияние геометрический фактор – расположение и форма отражателей. Во вторую очередь влияет интерференция волн, трансформация типа волны, переизлучение. В некоторых случаях эти эффекты сильно искажают эхосигналы, в некоторых – они не существенны. 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 путем сканирования. В результате получают набор распределений эхосигналов $F_i(L)$, i – индекс, характеризующий положение сканера на поверхности изделия или индекс схемы прозвучивания, если используется блок преобразователей, L – суммарная длина пробега волн от излучателя до дефекта и обратно. Затем производят обработку функций $F_i(L)$ с целью реконструкции изображения отражателей.

Рассмотрим вопрос о возможности решения обратной задачи в рамках приведенной модели. Ключевую роль здесь играет функция отклика точечного источника. В узкополосном и широкополосном приближениях ФОТИ является ядром оператора преобразования объекта контроля в эхосигналы.

Если имеется определенное количество разных схем прозвучивания какой-либо области материала с одной и той же ФОТИ, то можно говорить о существовании оператора прозвучивания, обозначим его \mathfrak{Z} . Данный оператор производит преобразование функции объекта контроля (O) в бесконечный набор эхосигналов F [1].

$$F(R) = \mathfrak{Z}[O] \quad (1)$$

Оператор \mathfrak{Z} является линейным приближенным интегральным оператором. Тогда \mathfrak{Z} обладает следующими свойствами:

- линейность $\mathfrak{Z}[K \cdot O] = K \cdot \mathfrak{Z}[O]$, K – постоянный множитель;
- аддитивность $\mathfrak{Z}[O_1 + O_2] = \mathfrak{Z}[O_1] + \mathfrak{Z}[O_2]$, O_1 и O_2 – две непересекающиеся неоднородности в материале;

- однозначность, если любому объекту O соответствуют свои оригинальные эхосигналы F . В этом случае, оператор \mathfrak{Z} – полный.

Если оператор прозвучивания \mathfrak{Z} обладает указанными свойствами, то существует оператор обратного преобразования \mathfrak{Z}^{-1} , такой что

$$O = \mathfrak{Z}^{-1}[F] \quad (2)$$

Оператор обратного преобразования \mathfrak{Z}^{-1} тоже является линейным и интегральным. Он также обладает свойствами линейности, аддитивности и полноты. Доказательство существования и единственности оператора \mathfrak{Z}^{-1} следует из теории групп.

Отметим, что большинство способов решения обратной задачи, основанных на теоретическом подходе, использует свойство линейности, аддитивности и полноты оператора \mathfrak{Z} [1, 2, 7]. Именно эти свойства оператора прозвучивания \mathfrak{Z} обеспечивают возможность построения изображений дефектов.

Целый ряд приближений связан со свойством аддитивности операторов \mathfrak{Z} и \mathfrak{Z}^{-1} . Аддитивность сигналов по отношению к отражающим поверхностям выполняется, если УЗ волны отражаются в объекте контроля только один раз, то есть отсутствуют эхосигналы, двукратно и многократно отраженных волн. В противном случае возникает неоднозначность интерпретации сигналов.

Дополнительно свойство аддитивности операторов требует отсутствия теней от неоднородностей (дефектов). Ясно, что если один дефект закрывает прозвучивание второго дефекта или границы изделия, то информация об отражателях в тени не появляется на изображении. Когда производят реконструкцию изображения с помощью оператора \mathfrak{Z}^{-1} , то в неявном виде считается, что все отражающие поверхности полупрозрачны, не создают теней и, более того, не ослабляют волн, проникающих через поверхность.

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 как $g(\xi, \eta)$, то обобщенный оператор формирования акустического изображения можно записать в виде [1, 10]

$$g(\xi, \eta) = A\{f(x, y)\} + n(\xi, \eta), \quad (3)$$

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 (3).

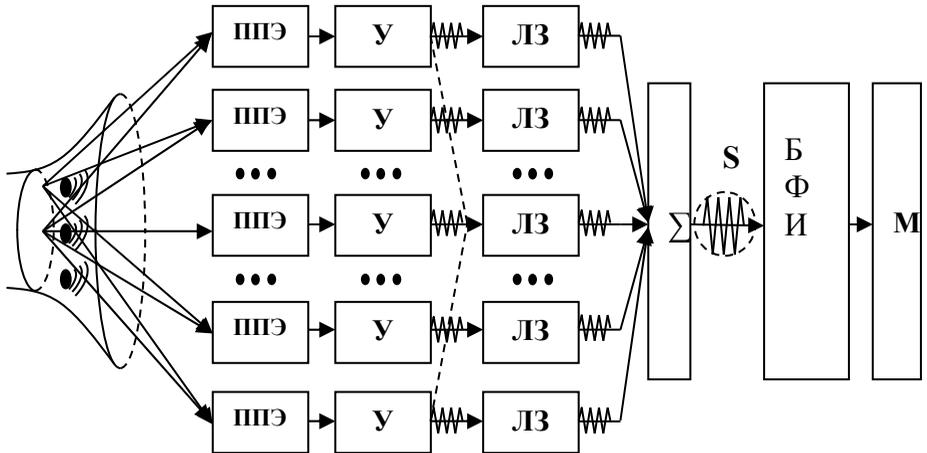


Рис. 3. Фазированная решетка пьезоэлементов

В дефектоскопии этот оператор имеет вид операции свертки

$$g(\xi, \eta) = \iint_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \times h(\xi, \eta, x, y) dx dy + n(\xi, \eta), \quad (4)$$

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

Отметим, что один и тот же объект контроля может дать различные акустические изображения, если в системе дефектоскопии будут регистрироваться при сканировании объекта различные акустические параметры, характеризующие среду (материал) объекта: скорость звука, коэффициент отражения (градиент акустического импеданса), коэффициент поглощения (затухания) [10].

Обработка эхосигналов в системах формирования акустических изображений, использующих в качестве приемника фазированную решетку пьезоэлементов, сводится к методам фокусировки, решающих задачу получения сильного отклика фокусируемой точки объекта на линии сканирования путем суммирования сигналов с различных точек апертуры измерений, задержанных во времени на такие величины задержки, чтобы сигналы фокусируемой точки суммировались одновременно с одной и той же начальной фазой.

Эхосигналы от других точек звукового импульса будут приходить на сумматор в фазе и их суммарный отклик будет эквивалентным

стохастическому колебанию (рис. 3).

На рис. 3:

У – усилитель с ВАРУ;

ППЭ – приемные пьезоэлементы измерительной решетки;

ЛЗ – линия задержки;

Σ – сумматор;

БФИ – блок формирования видеосигнала;

М – видеомонитор;

S – 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.

В сущности, все УЗ системы интроскопии, осуществляющие фокусировку пространственно-рассеянных сигналов, являются согласованными пространственными фильтрами и могут быть описаны в рамках теории согласованной фильтрации [10].

Практически 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 с бесконечно малой шириной (рис. 4).

Обозначим координаты некоторой произвольной точки на апертуре измерений как $x_1, z = 0$.

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 таким образом, что система представляет согласованный пространственный фильтр для пространственно изменяющегося сигнала. $f(x_1, z_0, x, z)$

Расстояние R от точки $x_1, z_0 = 0$ до точки x, z равно

$$R = \sqrt{(x - x_1)^2 + (z - z_0)^2} = \sqrt{(x - x_1)^2 + z^2} \quad (5)$$

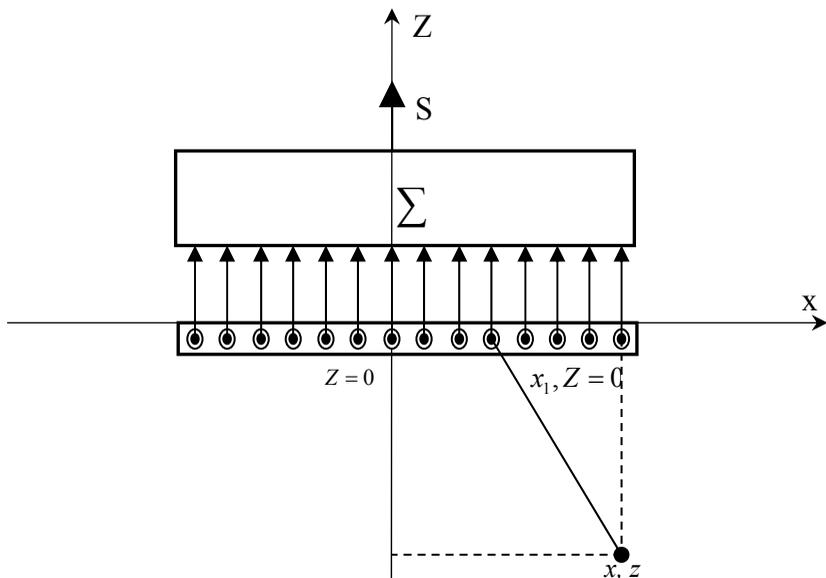


Рис. 4. Измерительная линейная решетка системы УЗ эхоскопии

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 $2\pi / \lambda$, λ – длина волны, имеет вид [10]

$$f(t, R) = \frac{e^{j\omega t} \cdot e^{jKR}}{R} \quad (6)$$

где ω – круговая частота, $j = \sqrt{-1}$.

В предположении, что отклик приемной системы в интервале x_1 и $x_1 + dx_1$ имеет вид $g(x_1) \cdot dx_1$, и что сигналы всех приемных элементов складываются с весом, равным отклику $g(x_1)$, выходной сигнал всей приемной системы будет иметь вид функции пространственных координат $y(x, z)$, dx_1 – интервал дискретизации x .

$$y(x, z) = \int_x f(x_1, z) \cdot g(x - x_1) dx_1 \quad (7)$$

Для случая, когда $g(x - x_1)$ выбран таким, что он равен $f^*(-x_1, z)$, выходной сигнал согласованного фильтра равен

$$y(x_1, z = 0) = \alpha \int_x f(x_1, z) \cdot f^*(-x_1, z) dx_1 = \alpha \int_x [a(x_1, z)]^2 dx_1 \quad (8)$$

где α – масштабный коэффициент.

Линейный фильтр, который делает 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 [10]. Идеальный обратный фильтр требует бесконечной ширины полосы частот, которую реальная система обеспечить не может, что отражается на качестве восстанавливаемых изображений.

Главную роль в диагностической системе при формировании акустического изображения играют два фактора: **диаграмма направленности звукового луча на излучение и на прием, качество формируемого изображения при этом 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 являются идентичными. 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 этому 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 [7, 9, 10].

Продольное разрешение в системах дефектоскопии определяется в виде ΔL [2, 8, 10]

$$\Delta L \cong (C \cdot \Delta \tau) / 2 \quad (9)$$

где $\Delta \tau$ – длительность зондирующего сигнала,

C – скорость распространения продольной волны,

λ – длина волны.

Потенциальная поперечная разрешающая способность систем интроскопии согласно критерию Рэля, определяется в виде $L_{\text{поперечного разрешения min}} \geq \frac{\lambda}{2}$,

что для систем УЗ контроля металлов на частотах 3,5 МГц и 5 МГц составляет соответственно $\approx 0,86$ мм и $\approx 0,6$ мм.

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

О функции приемно-передающего тракта системы кратко можно заметить следующее.

Одним из факторов, определяющих отношение сигнал/шум (исключая шум реверберации) является амплитуда зондирующего импульса, однако она ограничена:

а) возможностью появления нелинейных эффектов при распространении в среде исследуемого объекта;

б) возможностью нелинейных эффектов в работе пьезопреобразователя решетки.

Затухание сигналов в зондируемой среде будет пропорциональным глубине зондирования, и компенсируется с помощью устройства ВАРУ – устройства временного автоматического регулирования усиления. 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.** Таким образом, области изображения, отображающие объекты на разных глубинах, формируются эхосигналами с различным спектром огибающей, что также влияет на качество акустического изображения [8, 10].

Дифракционный предел разрешения ограничивает диаграмму направленности преобразователя на излучение.

Рассмотрим кратко аспект формирования изображения, связанный с восприятием контраста и контрастным разрешением.

Для любой электронно-лучевой трубки отношение максимальной яркости к минимальной яркости ≤ 100 . Определим пространственное распределение сигнала изображения, которое возникает от точечного тест-сигнала, как функцию рассеяния точки (ФРТ), а от линейного – как функцию рассеяния линии (ФРЛ) [2, 10].

Зрение человека лучше всего воспринимает частоты 1÷5 линий на градус. Другая важная характеристика зрения, связанная с разрешением – способность к восприятию контраста.

Восприятие контраста сильно зависит от резкости его границы.

Предел достижимого оптического контраста 60 линий/градус может

быть достигнут при больших уровнях освещенности и низком уровне шумов. Оба эти фактора важны в аспекте разрешения по контрасту, т.е. способности различать соседние области по яркости изображения.

Глаз человека способен в идеальных условиях (резкая граница между двумя полубесконечными областями и яркое освещение) различать уровни яркости, отличающиеся лишь на 1%, т.е. диапазон градаций контраста, воспринимаемый глазом человека, рамен ≈ 40 dB.

На практике ситуация резко ухудшается из-за действия следующих факторов [10, 11]:

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

Влияние шума изображения на его восприятие подверглось серьезному исследованию, в том числе в связи с задачами электрооптической визуализации и проблемой фотографического зерна. В данном случае включается понятие сосредоточенной “помехи” (термин имеет более общее понятие, 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.

Исследования показали, что шум (помеха) будет оказывать наибольшее воздействие на понижение способности распознавания, если это происходит при пространственных частотах, для которых модуляционная передаточная функция (МПФ) имеет большое значение. МПФ системы определяет собой 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 оценку в 40 dB для динамического диапазона эхосигналов, принимаемых от различных рассеивающих структур. Этот диапазон определяется логарифмом отношения $D = \text{максимальный полезный эхосигнал} / \text{слабый эхосигнал (на уровне шума)}$. Однако обычно эта величина почти вдвое превышает динамический диапазон, свойственный самым высококачественным устройствам отображения (по интенсивности), поэтому для улучшения распознавания слаборассеивающих 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 [8, 9, 10, 11].

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

Выводы. Проведенные исследования показывают, что ограниченное пространственное и контрастное разрешение неголографических систем дефектоскопии объясняется влиянием следующих методологических и технологических факторов на процесс формирования акустического изображения внутренней структуры материалов:

1. Невозможностью постановки и решения обратной задачи при формировании изображений, основанной на точных решениях волнового уравнения. Это связано с неоднозначностью интерпретации амплитудных характеристик эхосигналов от различных отражателей. Одному и тому же набору эхосигналов могут соответствовать совершенно разные комбинации отражающих поверхностей в зависимости от местоположения и формы дефекта. Упрощенные модели эхосигналов позволяют в принципе сформулировать обратную задачу и решить ее.

2. Ограниченное поперечное разрешение 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 за счет формируемой диаграммы 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). Таким образом, 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 за счет преимущественного поглощения средой высокочастотных составляющих спектра эхосигналов.

При этом амплитуда огибающей суммарного эхосигнала будет флуктуировать и вносить искажения в формируемое акустическое изображение.

5. Наиболее существенные достижения в создании современных систем дефектоскопии связаны с использованием голографических методов формирования эхоимпульсных ультразвуковых изображений дефектов материалов, а также с применением линейных измерительных решеток регистрации эхосигналов и алгоритмов гомоморфной фильтрации для улучшения качества диагностических изображений [13, 14].

1. *Бархатов В.А.* Модели формирования ультразвуковых сигналов в задачах реконструкции изображений. – Дефектоскопия, 2005, № 2. – С.10-19.
2. *Бабак В.П.* Обробка сигналів при формуванні зображень об'єктів. – К.: Либідь, 1994. – 192 с.
3. *Данилов В.Н., Самокрутов А.А.* Моделирование работы пьезопреобразователей с сухим точечным контактом в режиме излучения. – Дефектоскопия, 2003, № 8. – С.11-23.
4. *Лаке Питер Д., Филипс Ральф С.* Теория рассеяния. Пер. с англ. Под ред. М.Ш. Бирмана. – М.: Мир, 1971. – 312 с.
5. *Рид М., Саймон Б.* Методы современной математической физики. Т.3. Теория рассеяния. Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 443 с.
6. *Рид М., Саймон Б.* Методы современной математической физики. Т.4. Анализ операторов. Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 428 с.
7. *Бархатов В.А.* Развитие методов ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений. – Дефектоскопия, 2003, № 1. – С.28-55.
8. Физика визуализации изображений в медицине. В 2-х томах. Пер. с англ. Под ред. *С. Уэбба.* – М.: Мир, 1991.
9. *Corl P.D., Kino G.S., DeSilets C.S. a. Grant P.M.* A digital synthetic focus acoustic imaging system. – Acoustical Imaging, vol.8, A.F. Metherell. Ed. – New York: Plenum, 1980.
10. *Кайно Г.* Акустические волны: устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов /Под ред. О.В. Руденко. – М.: Мир, 1990. – 656 с.
11. *Хуанг Т.* Цифровая голография // ТИИЭР, 1971, т.59, № 9. – С.68-81.
12. *Маковски А.* Применение решеток преобразователей в ультразвуковых системах визуализации // ТИИЭР. – 1979, т. 67, № 4. – С.46-60.
13. *Ермолов И.Н.* Достижения в теоретических вопросах ультразвуковой дефектоскопии. Задачи и перспективы. – Дефектоскопия. – 2004, № 11. – С.13-47.
14. *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 10.09.2018р.