

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА ОТРАЖАТЕЛЯ ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ, ВОССТАНОВЛЕННОМУ ПО ЭХОСИГНАЛАМ, ИЗМЕРЕННЫМ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ АНТЕННЫМИ РЕШЕТКАМИ

Е.Г. Базулин

Рассмотрено применение метода цифровой фокусировки изображения (ЦФА) для определения типа обнаруженных отражателей. Для этого используют две антенные решетки, расположенные по разные стороны от отражателя, с помощью которых в режиме двойного сканирования регистрируют эхосигналы по трем акустическим каналам. Первый акустический канал излучает и принимает эхосигналы первой антенной решеткой, второй — второй, а третий канал настроен так, что излучает импульсы первая, а принимает эхосигналы вторая антенная решетка. По каждому каналу в единой системе координат можно восстановить множество парциальных изображений по разным акустическим схемам с учетом многократного отражения от неровных границ объекта контроля с учетом эффектов трансформации типов волн. Объединение парциальных изображений позволяет получить высококачественное изображение, на котором видна вся граница отражателя и с помощью которого можно попытаться автоматизировать процедуру образмеривания отражателя и определения его типа. Такой подход позволит уменьшить субъективное влияние оператора на результаты контроля. Показано, что для повышения разрешающей способности изображения можно провести экстраполяцию спектра эхосигналов методом расщепления спектра совместно с построением AR-модели их спектра. Приведены результаты модельных экспериментов, подтверждающие возможность определения типа отражателя.

Ключевые слова: у.з. неразрушающий контроль, антенные решетки, призмы, двойное сканирование, FMC, цифровая фокусировка антенной решетки решетка (ЦФА), C-SAFT, TFM.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для визуализации отражателей широко применяют приборы, работающие по технологии фазированных антенных решеток (ФАР-дефектоскопы) [1]. С их помощью можно уверенно обнаруживать такие опасные дефекты, как трещины. Но определение типа обнаруженного отражателя, то есть решения важнейшего вопроса у.з. контроля, даже для ФАР-дефектоскопов может оказаться непосильной задачей. Существует альтернативный подход восстановления изображения отражателей с применением антенных решеток. На первом этапе регистрируют эхосигналы, излученные и принятые всеми парами элементов антенной решетки, так называемый режим двойного сканирования [2]. Восстановить изображение отражателей на втором этапе по измеренным эхосигналам можно методом комбинированного SAFT (C-SAFT) [3]. Такой принцип восстановления изображения можно называть цифровой фокусировкой антенной решеткой (ЦФА) [4]. Приборы, формирующие изображение по такому принципу, будем называть ЦФА-дефектоскопами. В зарубежной литературе алгоритм C-SAFT называется Total Focusing Method (TFM) [5]. Сравнительный анализ возможностей ФАР- и ЦФА-дефектоскопов приведен в [4, 6]. Регистрацию эхосигналов при перемещении антенной решетки, работающей в режиме двойного сканирования вдоль основной плоскости, логично назвать режимом тройного сканирования.

Для восстановления изображения всей границы отражателя при использовании простых алгоритмов нужно иметь возможность “осветить” его со всех сторон так, чтобы зарегистрировать эхосигналы, отраженные от любой части границы отражателя. В [7] с использованием антенной решетки, перемещаемой по поверхности цилиндрического объекта, удалость получить высококачественное изображение модели коррозионной трещины. Но в практике

у.з. контроля, как правило, доступ к объекту контроля ограничен его внешней поверхностью. Это приводит к тому, что по восстановленным изображениям границы отражателя не удастся уверенно определить его тип, так как восстанавливаться будут только те фрагменты границы, от которых удалость зарегистрировать, либо зеркально отраженные эхосигналы, либо фрагменты границ, на которых произошло дифракционное рассеивание у.з. импульсов. Так, вертикально ориентированная трещина при работе на прямом луче будет восстановлена в виде двух бликов, соответствующих ее верхней и нижней границам, на которых произошло дифракционное рассеивание ультразвука.

Если известна форма внешней и внутренней границ объекта контроля, а его акустические свойства таковы, что можно зарегистрировать в режиме двойного или тройного сканирования многократно отраженные от границ эхосигналы, то для восстановления изображения отражателей можно воспользоваться методом C-SAFT, модифицированным для учета многолучевого распространения ультразвука в объекте контроля с неровными границами. Так как в результате многократных отражений с учетом трансформации типов волн удастся зарегистрировать эхосигналы, отраженные от всех участков границы отражателя, то появляется возможность восстановить методом C-SAFT всю границу отражателя [8, 2, 9]. Такой подход может оказаться эффективным для контроля сварных соединений трубопроводов толщиной от 5 до 40 мм. В [10] сделана попытка при сканировании одноэлементными преобразователями восстановить изображение всей границы отверстия бокового сверления с учетом отражения эхосигналов от дна образца и с учетом трансформации типа волны при отражении от границы отверстия.

Для дальнейшего повышения качества изображения отражателя эхосигналы можно подвергнуть процедуре уменьшения длительности импульсов за счет экстраполяции их спектров на больший частотный интервал [11, 12].

Следует упомянуть очень перспективное направление решения обратных задач, которое по мере роста вычислительных мощностей будет все более и более востребованным. Решение обратной коэффициентной задачи для скалярного волнового уравнения [13] основано на возможности прямого вычисления градиента функционала невязки через решение методом конечных разностей, так называемой сопряженной задачи для уравнения в частных производных. При переходе к векторному варианту волнового уравнения при решении будут учтены все эффекты распространения и рассеяния звука. Возникновение импульса обегания, многократное перерассеивание и трансформация типов волн дадут информацию, которая при одностороннем доступе позволит восстановить поле значений плотности и упругих коэффициентов в объекте контроля, по которому можно будет определить не только всю границу отражателя, но и свойства материала его заполнения.

Восстановление изображения всей границы отражателя позволит использовать методы распознавания изображений и надежно автоматизировать процедуру распознавания типа отражателя и определения его размеров. Это позволит повысить скорость формирования протокола контроля и уменьшить влияние человеческого фактора на объективность результатов контроля.

2. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ

Решение обратной задачи рассеивания заключается в том, чтобы по известным источникам поля $q(\mathbf{r}_p, t)$, расположенным в области S_p и по измеренному в области S_r рассеянному полю $p(\mathbf{r}_p, t)$ найти функцию $\varepsilon(\mathbf{r})$, описывающую отражающие свойства неоднородности в области S . Один из пространственных методов оценки функции $\varepsilon(\mathbf{r})$ заключается в корреляционной обработке измеренного поля $p(\mathbf{r}_p, t)$. Пусть решение прямой задачи, то

есть расчет рассеянного поля $p(\mathbf{r}_p, t) = p(\mathbf{r}_p, t; \mathbf{r}_i)$ по известным функциям $q(\mathbf{r}_p, t)$ и $\varepsilon(\mathbf{r})$, в формальном виде можно записать в следующем виде:

$$p(\mathbf{r}_p, t) = P(\mathbf{r}_p, \varepsilon(\mathbf{r}), q(\mathbf{r}_p, t)). \quad (1)$$

Помещая точечный отражатель в произвольную точку \mathbf{r}_i , то есть полагая $\varepsilon(\mathbf{r}) = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)$, можно оценить вид функции $\varepsilon(\mathbf{r})$ по корреляционным формулам

$$\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}) = \iiint_{S_i, S_r, S} p(\mathbf{r}_r, t) G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_p, t) d\mathbf{r}_r d\mathbf{r}_i dt, \quad (2)$$

$$G(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_p, t) = P(\mathbf{r}_p, \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i), q(\mathbf{r}_p, t)).$$

Функция $G(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_p, t)$ зависит от формы излученного импульса $s(t)$ и должна учитывать эффекты отражения, преломления и трансформации типов волн, анизотропии акустических свойств материалов, затухания звука, наличия нескольких областей с разными акустическими свойствами. Чем точнее удастся решить прямую задачу (1) на основе выбранного варианта описания механизма рассеивания у.з. волны, тем больше объектов контроля, в которых можно восстанавливать высококачественные изображения отражателей.

2.1. Метод C-SAFT

Если при расчетах функцию $s(t)$ заменить на $\delta(t - t_{\max})$, где t_{\max} — время нарастания импульса, и рассматривать только одну акустическую схему на прямом луче, то выражение (2) превращается в формулу, описывающую метод C-SAFT

$$\begin{aligned} \hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i) &= \iiint_{S_i, S_r} p(\mathbf{r}_r, t) \delta(t - t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_p) + t_{\max}) d\mathbf{r}_r d\mathbf{r}_i dt = \\ &= \iiint_{S_i, S_r} p(\mathbf{r}_r, t - t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_p) + t_{\max}) d\mathbf{r}_r d\mathbf{r}_i, \end{aligned} \quad (3)$$

где $t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_p)$ — время пробега импульса от излучателя до точки \mathbf{r}_i и к приемнику для заданной акустической схемы. При таком подходе задача восстановления изображения отражателей сводится к многократному решению прямой задачи для функции $\varepsilon(\mathbf{r}) = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)$ при заданном числе отражений от границ объекта контроля при излучении и приеме.

2.2. Метод M-C-SAFT и TS-M-C-SAFT

При каждом отражении от границы объекта контроля может происходить трансформация типа падающей волны. Это означает, что при m_i — отражениях максимальное число возможных комбинаций списка скоростей $\{c_i\}_{m_i} = \{c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,m_i+1}\}$ равно 2^{m_i} и учет всех возможных вариантов скоростей на трассе значительно увеличивает время формирования изображения. Однако ситуация значительно упрощается, если принять во внимание два следующих обстоятельства. Во-первых, импульс распространяется за одинаковое время по многим траекториям для объекта одинаковой толщины. Время распространения определяется не порядком следования отрезков траектории с заданными скоростями звука, а зависит от количества отрезков, вдоль которых звук распространяется, либо как продольная волна, либо как поперечная волна. Акустические схемы, которые имеют разные времена распространения импульса вдоль траектории, будем называть независимыми. Так, при излучении и пяти отражениях $m_i = 5$ от границ плоскопа-

раллельного образца из 32 возможных путей только 10 будут независимы. Во-вторых, зависимость коэффициента отражения $V(\alpha_n; c_{t,n}, c_{t,n+1})$ от угла падения приводит к тому, что при многократных отражениях останутся значимыми амплитуды эхоимпульсов только тех акустических схем, для которых произведение всех коэффициентов отражения $V(\alpha_n; c_{t,n}, c_{t,n+1})$ будут составлять определенное значение, скажем 20 или 30 % от максимального значения. И чем больше число отражений m_t или m_r , тем больше будет разница между амплитудами эхосигналов по разным акустическим схемам. Список из независимых и значимых акустических схем, состоящий из N_{as} — пар списков скоростей $\{c_t\}_{m_t} = \{c_{t,1}, c_{t,2}, \dots, c_{t,m_t+1}\}$ и $\{c_r\}_{m_r} = \{c_{r,1}, c_{r,2}, \dots, c_{r,m_r+1}\}$, обозначим как $\{L_{as}\}$.

Метод получения высококачественных изображений по многим акустическим схемам рассмотрен в [14] и назван в ней методом M-C-SAFT. Он представляет собой упрощенный вариант корреляционной обработки (2), когда функция $G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s, t)$ рассчитывается для множественезависимых и значимых акустических схем. Итоговое изображение отражателя определяется как модуль когерентной суммы парциальных оценок $\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i; \{c_t\}, \{c_r\})$ для списка акустических схем $\{L_{as}\}$ длиной N_{as} по формуле

$$I(\mathbf{r}_i) = \left| \sum_{\{L_{as}\}} \hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i; \{c_t\}, \{c_r\}) \right|. \quad (4)$$

Если антенная решетка перемещается N_w раз для разных значений вектора \mathbf{r}_w , определяющего положение призмы на объекте контроля, то добавив когерентное суммирование изображений, восстановленных для каждого положения антенной решетки, можно получить объединенное (итоговое) изображение отражателей с еще более высокой фронтальной разрешающей способностью по формуле

$$I(\mathbf{r}_i) = \left| \sum_{w=1}^{N_w} \sum_{\{L_{as}\}} \hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_w; \{c_t\}, \{c_r\}) \right|. \quad (5)$$

К сожалению, воспользоваться формулой (4) или (5) на практике удается не всегда по причине того, что в объекте контроля не известны с необходимой точностью ни скорости продольной и поперечной волны, ни его толщина. Чем на большем расстоянии от антенной решетки нужно восстанавливать изображение и чем больше отражений от границ нужно учесть, тем с более высокой точностью должны быть известны скорости продольной и поперечной волн в объекте контроля. В [15] сделана оценка требуемой точности измерения скоростей, которая должна быть не менее 0,5 %. Это очень высокая точность измерений! Ситуация усугубляется еще и тем, что толщина реального объекта контроля, как правило, известна лишь приблизительно, когерентное суммирование парциальных изображений может привести к ухудшению итогового изображения. Поэтому формулу (5) можно модифицировать, введя не простое когерентное сложение, а логическое сложение модулей парциальных изображений, выполняемое следующим образом. Для каждого парциального изображения, число которых равно $N_{as} N_w$, вводится уровень отсечки, равный его среднему значению, плюс три дисперсии. Если в точке \mathbf{r}_i отличны от нуля значения не менее чем в N_l парциальных изображений, то в точку \mathbf{r}_i объединенного изображения записывается сумма модулей всех парциальных изображений. В противном случае итоговое значение в точке \mathbf{r}_i полагается равным нулю. Такой простой подход позволяет существенно уменьшить амплитуды ложных бликов, но, с другой стороны, он таит в себе опасность пропустить блики от реальных отражателей. Но веро-

ятность пропуска блика отражателя тем меньше, чем больше парциальных изображений. Как показал опыт, значение параметра N_l целесообразно выбирать равным $N_{as}N_w/3$. Таким образом, формула формирования итогового изображения с помощью логического сложения модулей парциальных изображений может быть записана так:

$$I(\mathbf{r}) = \begin{cases} \sum_{w=1}^{N_w} \sum_{\{L_{as}\}} \left| \hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_w; \{c_i\}, \{c_r\}) \right|, & \text{если } \sum_{w=1}^{N_w} \sum_{\{L_{as}\}} \text{sign} \left| \hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_w; \{c_i\}, \{c_r\}) \right| \geq N_l, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (6)$$

2.3. Восстановление изображения отражателей по нескольким акустическим каналам

Под акустическим каналом будем подразумевать настройку аппаратуры для проведения у.з. контроля, описывающую порядок работы в режиме двойного сканирования пьезоэлементов одной или двух антенных решеток, положение одной или двух антенных решеток, значение коэффициента усиления приемника, параметры зондирующего импульса, временную апертуру регистрации эхосигналов и прочее. В некоторых ФАР-дефектоскопах есть подобный режим, который называется multi-group [16], с помощью которого можно создавать до 8 каналов со своими законами фокусировки.

На рис. 1 показана схема прозвучивания стыкового сварного соединения с использованием двух антенных решеток, работающих по трем акустическим каналам. Цикл измерений в каждой точке пространственной апертуры заключается в излучении и приеме АР с N-стороны (голубая стрелка, первый акустический канал) и с P-стороны (зеленая стрелка, второй акустический канал) в излучении у.з. импульсов АР с N-стороны и приеме АР с P-стороны (две желтые стрелки, третий акустический канал). Эхосигналы по акустическим каналам записываются в три файла и затем антенные решетки перемещаются в следующую точку вдоль сварного соединения для повторения цикла измерений.

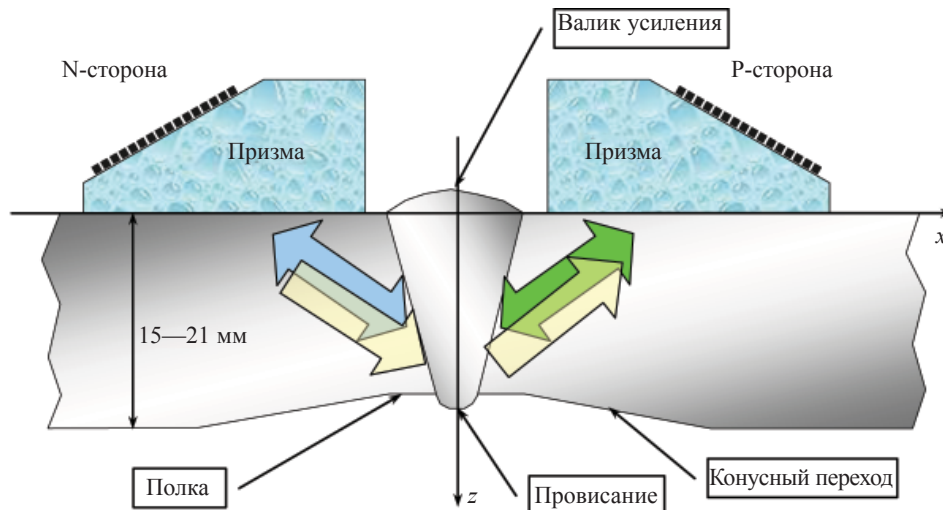


Рис. 1. Схема контроля объекта с неровным дном толщиной от 15 до 21 мм двумя антенными решетками.

Так как по каждому акустическому каналу изображения отражателей восстанавливаются в одной и той же пространственной области, то формулы (5) или (6) можно обобщить на случай регистрации эхосигналов несколькими и, в частности, двумя антенными решетками. Для этого просто нужно добавить суммирование парциальных изображений по разным акустическим каналам. Если через $\hat{\varepsilon}_n(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_w; \{c_t\}, \{c_r\})$ обозначить парциальное изображение для акустического канала номер n , то формулу (5) для трех акустических каналов восстановления изображения можно записать в виде

$$I(\mathbf{r}_i) = \left| \sum_{n=1}^3 \sum_{w=1}^{N_w} \sum_{\{L_{as}\}} \hat{\varepsilon}_n(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_w; \{c_t\}, \{c_r\}) \right|. \quad (7)$$

Аналогичным образом можно модифицировать и формулу (6) для работы с тремя акустическими каналами

$$I(\mathbf{r}_i) = \begin{cases} \sum_{n=1}^3 \sum_{w=1}^{N_w} \sum_{\{L_{as}\}} \left| \hat{\varepsilon}_n(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_w; \{c_t\}, \{c_r\}) \right|, & \text{если } \sum_{n=1}^3 \sum_{w=1}^{N_w} \sum_{\{L_{as}\}} \text{sign} \left| \hat{\varepsilon}_n(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_w; \{c_t\}, \{c_r\}) \right| \geq N, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (8)$$

2.4. Метод расщепления спектра и построение AR-модели спектра

Для повышения качества изображения границы отражателя можно воспользоваться методами достижения сверхразрешения эхосигналов. Суть этих методов в том, что после математической обработки эхосигнала все импульсы длиной τ превращаются в импульсы длиной τ_{AR} , в несколько раз меньше исходной. В [12] рассмотрен метод расщепления спектра совместно с методом построения его AR-модели и показана эффективность данного сочетания методов для обработки эхосигналов, полученных при у.з. контроле. Метод расщепления спектров позволяет уменьшить влияние эффекта смещения импульса после определения коэффициентов AR-модели методом Берга [17].

3. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

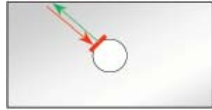
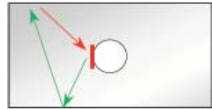

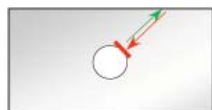




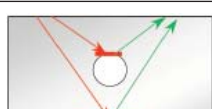
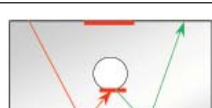
Измерения эхосигналов в режиме двойного сканирования проводили ЦФА-дефектоскопом “АВГУР-АРТ”, разработанным и изготовляемым в “Научно-производственном центре “ЭХО+”. Для регистрации использовали две 32-элементные антенные решетки фирмы “IMASONIC” с эффективной частотой 5 МГц, размерами элементов 0,9 мм и зазором между ними 0,1 мм. Антенные решетки были установлены на призмы из рексолита с углом наклона 35 градусов. ЦФА-дефектоскоп “АВГУР-АРТ” был настроен на измерения по трем акустическим каналам, рассмотренным в разделе “Восстановление изображения отражателей по нескольким акустическим каналам”.

Так как призма была рассчитана на излучение в объект контроля поперечной волны, то оптимальным оказалось использование акустических схем для N- и P-сторон на поперечных волнах, а для NP-стороны использовали схемы T(L)—T(S), T(S)—T(L) и T(S)—T(S). Так как призмы устанавливали с минимальным расстоянием между передними гранями, то акустические схемы с двукратным и выше отражениями дают изображения малой амплитуды и их можно не учитывать. Увеличив расстояние между призмами, можно сделать значимыми изображения, полученные по акустическим схемам с двукратными и более кратными отражениями от границ объекта контроля. Но при этом эффективность применения

схемына прямом луче уменьшится. Список используемых акустических схем для каждого акустического канала приведен в таблице. В графе “Поясняющий рисунок” красными линиями показаны восстановленные фрагменты границы отверстия бокового сверления, стрелкой красного цвета схематически показан путь распространения импульса при излучении, а стрелкой зеленого цвета — при приеме.

Таблица

Список акустических схем

№	Акустический канал	Акустическая схема	Комментарий	Поясняющий рисунок
1	N-сторона	T(S)—T(S)	Восстанавливает левые верхние наклонные границы отверстия	
2		T(S)—TB(SS)	Восстанавливает левые вертикальные границы отражателей	
3		TB(SS)—TB(SS)	Восстанавливает левые верхние наклонные границы отверстия	
4	P-сторона	T(S)—T(S)	Восстанавливает правые верхние наклонные границы отверстия	
5		T(S)—TB(SS)	Восстанавливает правые вертикальные границы отражателей	
6		TB(SS)—TB(SS)	Восстанавливает правые верхние наклонные границы отверстия	
7	NP-сторона	T(L)—T(S)	Восстанавливает дно между антенными решетками ближе к правой антенной решетке	
8		T(S)—T(L)	Восстанавливает дно между антенными решетками ближе к левой антенной решетке	
9		T(S)—T(S)	Восстанавливает верхнюю часть отверстия и дно между антенными решетками	
10		TB(SS)—TB(SS)	Восстанавливает нижнюю часть отверстия и поверхность между антенными решетками	

3.1. Отверстие диаметром 2 мм на глубине 6 мм в образце толщиной 18 мм

Для имитации объемного дефекта в образце толщиной 18 мм на глубине 6 мм от поверхности было просверлено отверстие бокового сверления диаметром 2 мм. На рис. 2 в верхнем ряду слева показано одно парциальное изображение, восстановленное по акустической схеме $T(S) \text{—} T(S)$ (прямой луч) с N-стороны. Сделать вывод о форме отражателя крайне сложно, так как удалось восстановить, хоть и с высоким фронтальным разрешением, только часть границы отверстия бокового сверления. Один из возможных методических приемов заключается в восстановлении парциального изображения по акустической схеме $T(S) \text{—} T(L)$. Так как коэффициент отражения поперечной волны в продольную волну при нормальном падении на гладкую границу близок к нулю [18], то на изображении такого типа остаются заметными блики, связанные только с дифракционным отражением от краев трещин. Их амплитуда станет заметно больше в сравнении с бликами от гладких поверхностей, но даже применение этого приема не позволит определить размеры объемного отражателя. Наличие блика, сформированного волной обегания, очень сложно достоверно связать с бликом границы отражателя и поэтому этот признак сложно применять на практике. Изображение отражателя, полученное по формуле (8) по акустическим схемам согласно таблице, позволяет восстановить практически полностью границу отверстия бокового сверления и определить его радиус (изображение справа).

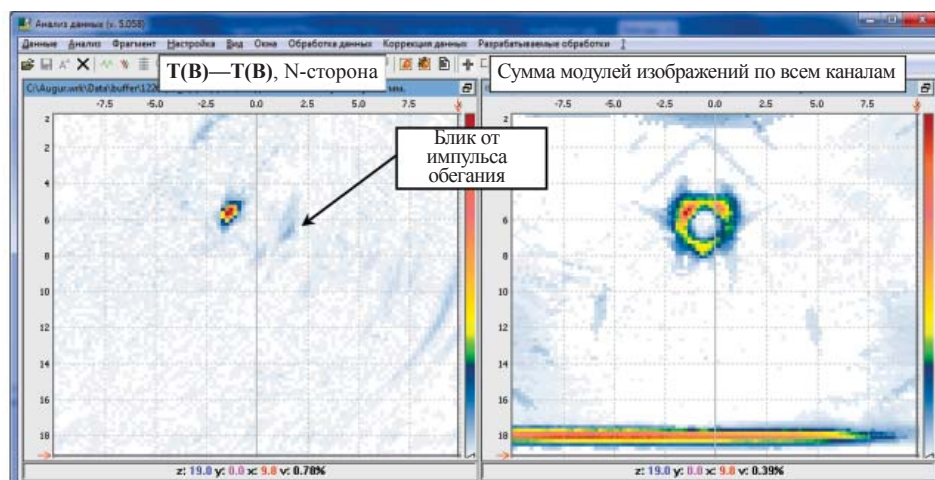


Рис. 2. Изображение границы отверстия диаметром 2 мм.

Если для обработки исходных эхосигналов применить метод расщепления спектра совместно с методом построения его AR-модели, то исходный спектр сигнала можно расширить с интервала $[2,0, 7,5]$ на интервал $[0,1, 20,0]$ МГц. Такая экстраполяция спектра приведет к повышению разрешающей способности эхосигналов и, следовательно, к повышению разрешающей способности восстановленного по ним изображения. На рис. 3 приведен фрагмент одного эхосигнала до применения процедуры сверхразрешения и после. В результате обработки ширина исходных импульсов τ уменьшилась с 0,4 мкс до $\tau_{AR} = 0,1$ мкс, что позволило разрешить два импульса в области 24 и 27 мкс.

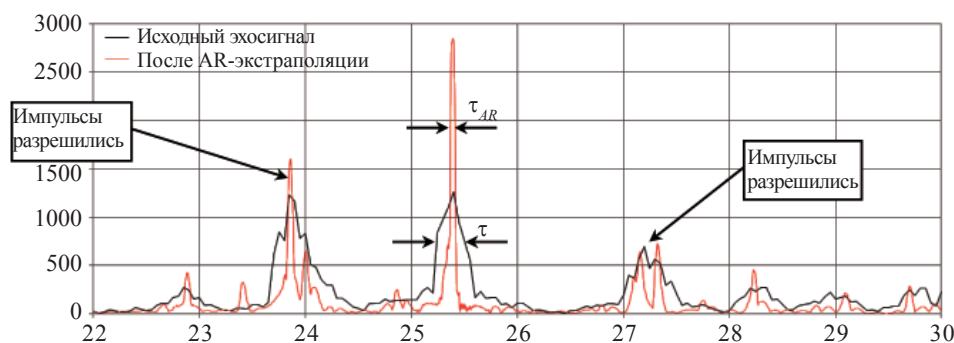


Рис. 3. Огибающая эхосигнала до применения процедуры сверхразрешения (график черного цвета) и после (график красного цвета).

На рис. 4 в нижнем ряду слева показано одно парциальное изображение, восстановленное по акустической схеме $T(S) \rightarrow T(S)$ (прямой луч). Несмотря на повышение лучевой разрешающей способности изображения примерно в три раза, сделать вывод о форме отражателя по-прежнему крайне сложно. А изображение, восстановленное по формуле (8) по акустическим схемам согласно таблице, позволяет восстановить практически полностью границу отверстия бокового сверления с более высокой разрешающей способностью (изображение справа).

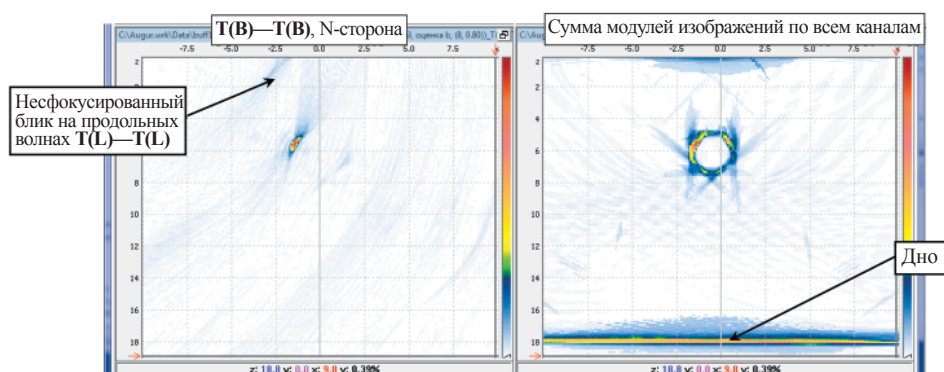


Рис. 4. Изображение границы отверстия диаметром 2 мм, восстановленное по эхосигналам после обработки их методом расщепления спектра совместно с методом построения его AR-модели.

3.2. Модель придонной трещины высотой 4 мм в образце толщиной 18 мм с неровным дном

Образец с пропилом шириной 0,5 мм и высотой 4 мм в образце толщиной 18 мм с неровным дном предназначался для имитации придонной трещины. На рис. 5 вверху показано изображение, полученное по формуле (8) по акустическим схемам согласно таблице. Контуры образца показаны линиями черного цвета. По данному изображению можно получить изображение дна и восстановить практически полностью границу пропила. В качестве дополнительного признака наличия трещины, растущей от дна объекта контроля, может служить “тень” от пропила на дне образца. Однако недостаточно высокая разрешающая способность не позволяет разрешить вертикальные стенки пропила. После повышения разрешающей способности эхосиг-

налов удалось разрешить переднюю и заднюю стенки пропила шириной 0,5 мм (рис. 5 внизу). Параметры экстраполяции были такие же, что и в разделе “Отверстие диаметром 2 мм на глубине 6 мм в образце толщиной 18 мм”.

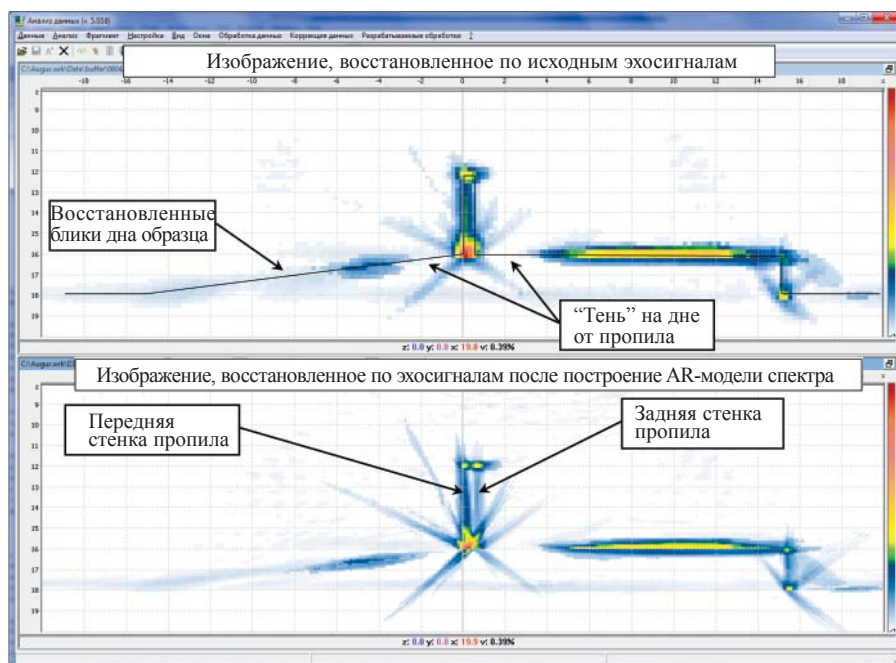


Рис. 5. Изображение модели придонной трещины высотой 4 мм в образце с неровным дном.

4. ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Регистрация эхосигналов методом двойного сканирования и использование метода M-C-SAFT с учетом многократных отражений и трансформации типа волны от неровных границ объекта контроля позволяет восстановить практически всю границу отражателя.

2. По восстановленному изображению границы отражателя можно сделать вывод о его типе.

3. Применение метода сверхразрешения для обработки эхосигналов в три раза увеличивает продольную разрешающую способность изображения, повышая тем самым его качество.

4. Для применения предложенной технологии нужна информация о форме неровного дна. Эту информацию можно получить по изображениям, восстановленным по трем акустическим схемам (см. таблицу) по NP-каналу.

5. Для практического применения предложенной технологии нужно решить еще ряд методических вопросов, таких как определение оптимального расстояния между призмами, в частности, при наличии валика усиления, подбор усиления по каждому каналу и выбор оптимального списка акустических схем для восстановления парциальных изображений.

6. Так как можно эффективно использовать информацию по акустическим схемам с трансформацией типа волны, то остается открытым вопрос об оптимальном угле наклона призмы.

Автор выражает признательность начальнику лаборатории “НПЦ “ЭХО+” Базулину А.Е. за полезные замечания и предложения, высказанные в процессе обсуждения статьи.

Научно-производственный центр “ЭХО+”
Москва

Поступила в редакцию
16 апреля 2013 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications*. Publisher: Waltham, MA : Olympus NDT, 2007, <http://www.olympus-ims.com/en/books/>
2. Базулин Е.Г. Определение типа дефекта по изображениям, полученным методом C-SAFT с учетом трансформации типов волн при отражении ультразвуковых импульсов от неровных границ объекта контроля.— *Дефектоскопия*, 2011, № 1, с. 39—56.
3. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхометод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция.— *Дефектоскопия*, 1990, № 2, с. 29—41.
4. Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. О применимости технологии антенных решеток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов.— *В мире неразрушающего контроля*, № 1 (51), март 2011, с. 64—70.
5. Holmes C., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. Postprocessing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for nondestructive evaluation.— *NDT&E International*, 2005; 38:701-711.
6. Базулин Е.Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки.— *Дефектоскопия*, 2013 (в печати).
7. Boehm R., Brackrock D., Kitze J., Brekow G., Kreutzbruck M. SAFT for crack surface analysis — comparison of modeling and phased array measurements.— *NDT in Progress*, 5th International Workshop of NDT Experts, 12—14 Oct 2009, Prague.
8. Chatillon S., Fidahoussen A., Iakovleva E., Calmon P. Time of flight inverse matching reconstruction of ultrasonic array data exploiting forwards models.— *NDT in Canada 2009 National Conference*, Aug 25—27, 2009.
9. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Возможности оценки характера несплошности металла ультразвуковым томографом с цифровой фокусировкой антенной решетки.— *Контроль. Диагностика*, № 10, 2011, с. 63—70.
10. Базулин Е.Г., Тихонов Д.С. Использование “законных” эхоимпульсов для повышения информативности изображения дефектов восстановленных по цифровым акустическим голограммам.— *Дефектоскопия*, 1993, № 7, с. 16—22.
11. Honarvar F., Tabatabai S.A.M., Dusatko T., Sinclair A.N. A new signal processing technique for enhancement of ultrasonic testing signals.— *16th World Conference on Nondestructive Testing*, Montreal, Canada (August 2004).
12. Базулин Е.Г. Повышение отношения сигнал/шум при совместном использовании методов экстраполяции и расщепления спектра.— *Дефектоскопия*, 2006, № 1, с. 68—78.
13. Гончарский А.В., Романов С.Ю. Об одной задаче ультразвуковой томографии.— *Вычислительные методы и программирование*, 2011, т. 12, с. 317—320.
14. Базулин Е.Г. О возможности использования в ультразвуковом неразрушающем контроле метода максимальной энтропии для повышения разрешающей способности изображения по эхосигналам.— *Акустический журнал*, 2013, т. 59, № 2, с. 235—254.
15. Базулин Е.Г. Получение изображений дефектов когерентными методами с учетом многократного отражения от плоскопараллельных границ объектов контроля при ультразвуковом контроле.— *Дефектоскопия*, 2007, № 7, с. 48—70.
16. Официальный сайт фирмы Olympus, <http://www.olympus-ims.com/ru/omniscan-mx2/>
17. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ. Пер. с англ. М: Мир, 1990.— 584 с.
18. Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред.— М.: Наука, 1989.— 416 с.