

Определение типа дефекта по изображениям, полученным методом C-SAFT с учетом трансформации типов волн при отражении ультразвуковых импульсов от неровных границ объекта контроля

Базулин Е.Г.

ООО «Научно-производственный центр «Эхо+»

123458, Москва, ул. Твардовского, д. 8, Технопарк «Строгино»

E-mail: bazulin@echoplus.ru

В статье рассмотрено применение антенных решёток (АР) для получения изображения дефектов при автоматизированном неразрушающем ультразвуковом контроле (УЗК). Традиционный режим использования АР в качестве фазированной антенной решётки (ФАР) имеет ряд недостатков. Например, смещение бликов и ухудшение разрешающей способности при удалении от линии фокусировки. Предлагается альтернативный подход, когда регистрация эхосигналов проводится с помощью АР, работающей в режиме двойного сканирования, а для получения изображения дефектов применяется модифицированный алгоритм комбинированного SAFT, учитывающий многолучевое распространение ультразвука с учётом трансформацией типа волны при отражении от неровных границ объекта контроля. Такой подход позволяет по одному набору эхосигналов получать множество парциальных изображений, объединение которых позволяет определить тип дефекта. Это очень важно для создания системы УЗК с надёжным автоматическим распознаванием типа дефекта. Сканирование антенной решёткой, работающей в режиме двойного сканирования - так называемый режим тройного сканирования, - позволяет когерентно складывать изображения для каждого положения антенной решётки, что дополнительно повышает качество итогового изображения.

В статье приведены результаты контроля образца с моделью объемного дефекта в виде отверстия бокового сверления диаметром 2 мм на глубине 12 мм и образца с моделью трещины с вершиной на глубине 12 мм. Оба образца имеют неровное дно. Полученные изображения позволяют определить не только размеры и местоположение дефектов, но и их тип.

Ключевые слова: ультразвуковой неразрушающий контроль, антенные решётки, C-SAFT, TFM, трансформация типов волн, двойное сканирование, тройное сканирование.

1. Введение

Совершенствование технологий изготовления ультразвуковых антенных решёток и акустических многоканальных систем излучения и приёма ультразвука привело к созданию относительно дешёвых дефектоскопов [1, 2, 3], использующих технологию фазированных

антенных решёток (ФАР-дефектоскопы). Их применение позволило получать изображение В-типа объекта контроля с частотой не менее 20 Гц и вызвало огромный интерес у специалистов по ручному неразрушающему ультразвуковому контролю (УЗК). Использование ФАР-дефектоскопов позволяет анализировать не одномерные эхосигналы, а двумерные изображения в виде секторных сканов в координатах xz , что позволяет на качественно более высоком уровне решать задачи по выявлению дефектов, измерению их размеров, типа и определению реальной конфигурации контролируемого сварного соединения. Однако, для изображений дефектов, полученных ФАР-дефектоскопами, присуще два недостатка. Первый заключается в том, что фронтальная разрешающая способность ухудшается при удалении от линии, для которой рассчитаны законы фокусировки. Второй недостаток - это смещение бликов дефектов от своего истинного положения при удалении от линии фокусировки, что затрудняет совместную обработку изображений, особенно когерентную, при сканировании антенной решёткой.

Один из вариантов применения антенных решёток заключается в регистрации эхосигналов в режиме двойного сканирования [4], когда на первом этапе регистрируются эхосигналы, излученные и принятые всеми парами элементов антенной решётки и на втором этапе восстанавливаются изображения дефектов. В статье [8] регистрация эхосигналов методом двойного сканирования называется **Sampling Phased Array**, а в статье [5] - **Full Matrix Capture**. Элементы антенной решётки имеют размеры меньше длины волны, что обеспечивает широкую диаграмму направленности [6] и позволяет измерить огромное количество импульсов на продольных и поперечных волнах, отражённых от границ объекта контроля и от дефекта. Регистрация эхосигналов движущейся антенной, работающей в режиме двойного сканирования, логично назвать методом тройного сканирования.

Один из алгоритмов, который позволяет обработать этот богатейший объем информации – метод **комбинированного SAFT (C-SAFT)** [7, 8, 9], который легко модифицируется для учёта многолучевого распространения ультразвука в объекте контроля с неровными границами. С его помощью восстанавливаются изображения, на которых блики, соответствующие дефектам, не смещены по осям xz и лучше сфокусированы по всей области восстановления изображения. Скорость получения изображений такими дефектоскопами достаточно высока. Например, ручной дефектоскоп **A1550 IntroVisor** фирмы «АКС» [7] формирует изображение методом C-SAFT со скоростью соизмеримой с частотой обновления экрана ФАР-дефектоскопа. В зарубежной литературе алгоритм C-SAFT называется **Total Focusing Method (TFM)** [13], а в упомянутой выше статье [5] восстанавливались изображения придонной трещины с учётом трансформации типов волн на неровном дне.

Дефектоскоп **Скаруч** фирмы «Алтес» [10] использует для излучения и приёма ультразвуковых импульсов акустическую систему с десятью преобразователями с разными углами ввода. Анализ времени прихода и амплитуды эхосигналов, отражённых от дефекта с учётом трансформаций типов волн при отражении от дна объекта контроля для различных сочетаний преобразователей, позволил без получения изображения дефекта определять его размеры и делать предположения о его типе.

В статье рассмотрено применение антенных решёток для получения изображения дефектов при автоматизированном неразрушающем ультразвуковом контроле (УЗК). Регистрация эхосигналов проводится с помощью антенной решётки, работающей в режиме двойного сканирования. Для получения изображения дефектов применяется модифицированный алгоритм C-SAFT, учитывающий многолучевое распространение ультразвука с учётом трансформации типа волны при отражении от неровной границы объекта контроля. Сканирование антенной решёткой работающей в режиме двойного сканирования - так называемый режим тройного сканирования, - позволяет когерентно складывать изображения для каждого положения антенной решётки, что повышает качество итогового изображения. В статье приведены результаты восстановления изображения модельных дефектов в виде отверстия бокового сверления диаметром 2 мм на глубине 12 мм и пропила с вершиной на глубине 12 мм. Полученные изображения позволяют определить не только размеры и местоположение дефектов, но и их тип, что очень важно при создании системы автоматизированного ультразвукового контроля.

2. Постановка задачи

Будем полагать, что в объекте контроля с неровным дном, описываемым функцией $h(x)$, эхосигналы $p(\vec{r}_i, \vec{r}_r, t)$ измеряются антенной решёткой, работающей в режиме двойного сканирования. Ультразвуковой импульс может распространяться как продольная волна со скоростью звука c_l или как поперечная волна со скоростью c_t , причем при отражении от границы объекта контроля тип волны может изменяться. Антенная решётка, как показано на Рис. 1, состоит из N элементов, расположенных на расстоянии Δx друг от друга. Она установлена на призму с углом наклона β , скоростью продольной волны равной c_w . Передняя грань призмы смещена относительно центра системы координат xz на величину \vec{r}_s . Местоположения излучателей и приёмников относительно передней грани призмы описываются векторами \vec{r}_i и \vec{r}_r , отмеченными на Рис. 1 стрелками синего цвета.

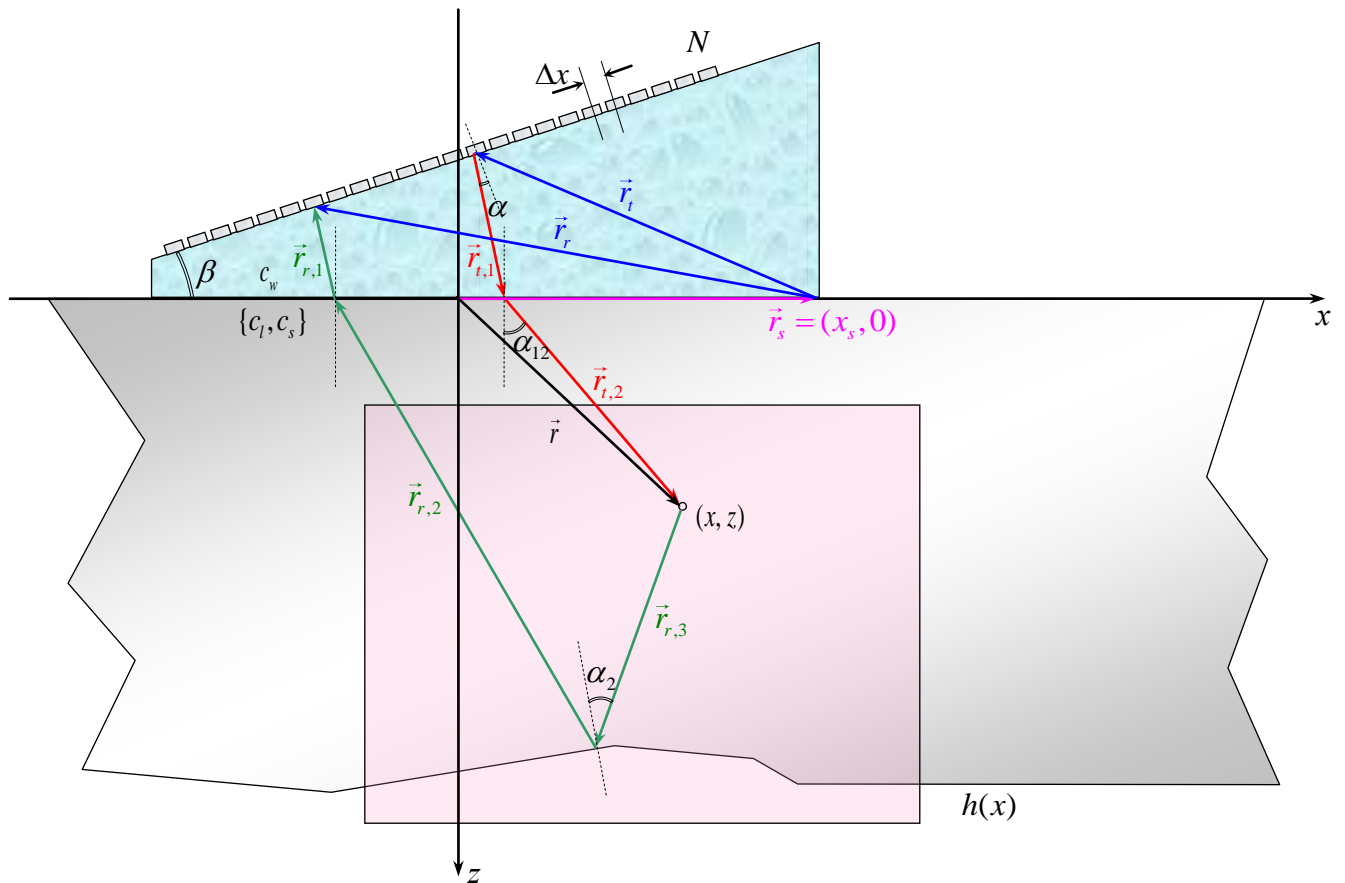


Рис. 1 К расчёту функции $G(\vec{r}_i, \vec{r}, t)$ для излучателя и $G(\vec{r}_i, \vec{r}, t)$ для приёмника. Квадратом розового цвета отмечена область восстановления изображения.

Решение обратной задачи рассеяния заключается в том, чтобы по известным источникам поля $q(\vec{r}_i, t)$, измеряя принятое поле $p(\vec{r}_r, t)$, найти функцию $\varepsilon(\vec{r})$, описывающую отражающие свойства неоднородности в области S . Область S расположения дефектов не пересекается с областью излучения и приёма эхосигналов при контроле металлов. Уравнения, описывающее обратную задачу, являются не линейными [11], так как в них неизвестными величинами являются и функция $\varepsilon(\vec{r})$ и полное поле $p(\vec{r}, t)$. Поэтому при разработке алгоритмов восстановления изображения дефектов обычно используется Борновское приближение, предполагающее, что амплитуда рассеянного поля много меньше амплитуды падающего поля. Со строго математической точки зрения это условие на практике выполняется далеко не всегда. Однако, переход от нелинейной задачи к более простой линейной задаче для разработчиков аппаратуры неразрушающего контроля зачастую оказывается более значащим фактором. Обратную задачу в импульсном режиме для Борновского приближении, можно представить в следующем виде

$$p(\vec{r}_r, t) = p(\vec{r}_t, \vec{r}_r, t) = \int_S G(\vec{r}_r, \vec{r}, t) \varepsilon(\vec{r}) p(\vec{r}, t) d\vec{r}, \quad (1)$$

$$p(\vec{r}, t) = \int_T G(\vec{r}_t, \vec{r}, t) q(\vec{r}_t, t) d\vec{r}_t, \quad (2)$$

где G - импульсная функция Грина для заданного объекта контроля. Формулы (1) и (2) позволяют решить прямую задачу рассеяния, то есть, по известной функции $\varepsilon(\vec{r})$ и заданной функции источников $q(\vec{r}_t, t)$ рассчитать рассеянное поле $p(\vec{r}, t)$. Чтобы воспользоваться формулами (1) и (2) для объекта контроля с неровными и абсолютно мягкими верхней и нижней границами, нужно построить соответствующую функцию Грина.

Траекторию, по которой распространяется импульс при излучении (на Рис. 1 показаны стрелками красного цвета), можно описать в виде последовательности векторов $\{\vec{r}_{t,1}, \vec{r}_{t,2}, \dots, \vec{r}_{t,m_t+1}\}$, где m_t - число отражений от границ образца, а при приёме - в виде последовательности $\{\vec{r}_{r,1}, \vec{r}_{r,2}, \dots, \vec{r}_{r,m_r+1}\}$ (на Рис. 1 показаны стрелками зелёного цвета). Первый вектор в такой последовательности всегда соответствует пути распространения звука в призме. Аналогичным образом для определения скорости распространения импульса вдоль трассы при излучении задаётся список $\{c_{t,1}, c_{t,2}, \dots, c_{t,m_t+1}\}$, а при приёме - $\{c_{r,1}, c_{r,2}, \dots, c_{r,m_r+1}\}$. Первым элементом в этих списках всегда идет скорость звука в призме c_w , а остальные элементы могут содержать различные сочетания из продольной c_l и поперечной c_t скорости звука в объекте контроля. Минимально возможный список скоростей для случая $m_t = 0$ или $m_r = 0$, то есть вариант работы на прямом луче, имеет вид $\{c_w, c_t\}$ или $\{c_w, c_l\}$.

Построить функцию $G(\vec{r}_t, \vec{r}, t)$ для излучения при m_t отражениях от границы объекта контроля или функцию $G(\vec{r}_r, \vec{r}, t)$ для приёма при m_r отражениях можно воспользовавшись приближением геометрической оптики [12]. Кроме того, малые размеры элементов антенной решётки позволяют можно заменить их на точечные элементы с диаграммой направленности в призме $\Theta(\alpha)$, где α - угол луча к нормали пьезоэлемента. С учётом этих приближений функции $G(\vec{r}_t, \vec{r}, t)$ и $G(\vec{r}_r, \vec{r}, t)$ можно записать в виде

$$\begin{aligned} G(\vec{r}_t, \vec{r}, t) &= \Theta(\alpha) D_{w,o}(\alpha_{12}; c_w, c_{t,1}) \frac{s(t-t_t(\vec{r}_t, \vec{r}))}{\sum_{n=1}^{m_t+1} |\vec{r}_{t,n}|} \prod_{n=2}^{m_t} V(\alpha_n; c_{t,n}, c_{t,n+1}), \quad t_t(\vec{r}_t, \vec{r}) = \sum_{n=1}^{m_t+1} \frac{|\vec{r}_{t,n}|}{c_n}, \\ G(\vec{r}_r, \vec{r}, t) &= \Theta(\alpha) D_{o,w}(\alpha_{12}; c_w, c_{r,1}) \frac{s(t-t_r(\vec{r}_r, \vec{r}))}{\sum_{n=1}^{m_r+1} |\vec{r}_{r,n}|} \prod_{n=2}^{m_r} V(\alpha_n; c_{r,n}, c_{r,n+1}), \quad t_r(\vec{r}_r, \vec{r}) = \sum_{n=1}^{m_r+1} \frac{|\vec{r}_{r,n}|}{c_n}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $s(t)$ - вид излучённого эталонного сигнала, $t_t(\vec{r}_t, \vec{r})$ и $t_r(\vec{r}_r, \vec{r})$ - времена пробега импульса по траектории излучения и приёма, $D_{w,o}(\alpha_{12}; c_w, c_{t,1})$ и $D_{o,w}(\alpha_{12}; c_w, c_{r,1})$ - коэффициенты прозрачности по давлению для угла преломления α_{12} при прохождении волны из призмы в объект контроля и обратно для заданной пары скоростей звука $(c_w, c_{t,1})$ или $(c_w, c_{r,1})$ (см. Рис. 1). Символом $V(\alpha_n; c_{t,n}, c_{t,n+1})$ обозначен коэффициент отражения, учитывающий тип падающей и отражённой волны $(c_{t,n}, c_{t,n+1})$ для отражения с номером n . Формулы (1), (2) и (3) позволяют рассчитать поле, рассеянное дефектами $\varepsilon(\vec{r})$ известной формы для заданной функции источников $q(\vec{r}_t, t)$.

Основной проблемой при расчётах по формуле (3) является определение лучевых траекторий $\{\vec{r}_{t,1}, \vec{r}_{t,2}, \dots, \vec{r}_{t,m_t+1}\}$ при излучении и $\{\vec{r}_{r,1}, \vec{r}_{r,2}, \dots, \vec{r}_{r,m_r+1}\}$ при приёме. Известны аналитические решения данной задачи для прямого луча [4, 13], но её решение для произвольного количества отражений является нетривиальной задачей. Для определения пути распространения импульсов можно воспользоваться принципом Ферма [14], гласящим, что распространение света или звука из одной точки в другую в пространстве с заданным распределением скорости $c(x, z)$ проходит по траектории, вдоль которой свет проходит за минимальное время. Этот подход позволяет учитывать такие обстоятельства, как многократные отражения от неровных границ объекта контроля, трансформацию типов волн при отражениях и преломлениях на границах разных сред.

Формулы (1), (2) и (3) легко обобщаются на случай применения двух призм произвольно расположенных на поверхности объекта контроля с антенными решётками, в свою очередь, произвольно ориентированных на поверхности призмы.

2.1. Обозначения акустических схем

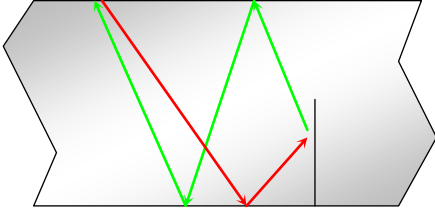
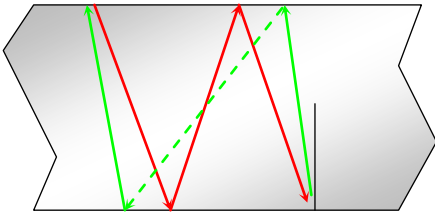
Для описания акустических схем с отражением ультразвуковых импульсов от дна и поверхности объекта контроля будем пользоваться следующими обозначениями: такое событие, как преломление на поверхности или отражение от поверхности, будем обозначать буквой **T**, а буквой **B** будем обозначать отражение от дна. Тип волны после события будем обозначать буквами **L** (продольная) и **S** (поперечная). Запись **T(S)-T(L)** обозначает обычный прямой луч на поперечной волне при излучении и с приёмом на прямом луче, но уже продольной волны. Схема **TB(LL)-TBT(SSS)** описывает ситуацию, когда при излучении анализируются лучи однократно отраженные на продольной волне, а при приеме двукратно отра-

женные на поперечной волне; акустическая схема **T(L)-TB(SL)** соответствует схеме называемой «самотандем» [15].

В таблице 1 перечислены обозначения нескольких акустических схем, их схематическое представление и максимальное количество вариантов, равное $2^{(m_t+1)+(m_r+1)}$. Единица в степени 2 учитывает, то, что при преломлении на границе «призма-объект контроля» могут возникать два типа волны. На рисунках таблицы красными стрелками показаны пути распространения звука при излучении, а зелёными при приёме, пунктирные линии означают продольный тип волны, а сплошные поперечный. В графе «**Комментарий**» отмечены те части трещины, изображение которых можно восстановить по данной акустической схеме.

Таблица 1

№	Пример название схемы	Схематическое изображение лучей акустической схемы	Максимальное количество схем	Комментарий
1.	T(S)-T(S) (T(L)-T(L)) ($m_t = 0; m_r = 0$)		4	Восстанавливается изображение корня и вершины трещины (на продольных волнах восстанавливается изображение дна объекта контроля)
2.	T(L)-TB(SL) ($m_t = 0; m_r = 1$)		8	Восстанавливается изображение поверхности трещины («самотандем»)
3.	TB(SL)-TB(SL) ($m_t = 1; m_r = 1$)		16	Восстанавливается изображение вершины трещины
4.	T(S)-TB(TSSS) ($m_t = 0; m_r = 2$)		16	Восстанавливается изображение корня и вершины трещины

5.	TB(SS)- TBT(SSS) $(m_t = 1; m_r = 2)$		32	Восстанавливается изображение поверхности трещины
6.	TBT(SLS)- TBT(SSS) $(m_t = 2; m_r = 2)$		64	Восстанавливается изображение корня и вершины трещины

Акустическую схему на излучение далее будем сокращённо обозначать как s_t , а на приём как s_r , полагая, что она может соответствовать любому значению **T(*)-T(*)**, **T(*)-TB(**)**, **TB(**)-TB(**)**, **T(*)-TBT(***)**, **TB(**)-TBT(***)** и **TBT(***)-TBT(***)**, где знак * может принимать значение либо **L**, либо **S**.

3. Получение изображений дефектов методом M-C-SAFT

Решение прямой задачи по формулам (1), (2) и (3) позволяет оценить потенциал рассеяния $\hat{\varepsilon}(\vec{r})$. Для этого предполагается, что точечный дефект размещён в произвольной точке \vec{r}_i области восстановления изображения (ОВИ). Далее, полагая в формулах (1), (2) и (3) $\varepsilon(\vec{r}) = \delta(\vec{r} - \vec{r}_i)$, можно рассчитать оценку принятых эхосигналов $\hat{p}(\vec{r}_i, \vec{r}_r, t; \vec{r}_i)$ на заданной пространственно-временной апертуре для излучателя и приемника, находящихся в точках \vec{r}_i и \vec{r}_r . После решения прямой задачи, для оценки функции $\hat{\varepsilon}(\vec{r}_i)$ можно воспользоваться корреляцией

$$\hat{\varepsilon}(\vec{r}_i) = \iint p(\vec{r}_i, \vec{r}_r, t) \hat{p}(\vec{r}_i, \vec{r}_r, t; \vec{r}_i) d\vec{r}_r d\vec{r}_i dt. \quad (4)$$

Упростить задачу с вычислительной точки зрения можно, предположив, что, во-первых, излучение и приём происходит точечными элементами антенной решётки, во-вторых, пренебречь изменением амплитуд в формуле (3). И, наконец, в-третьих, функцию эталонного сигнала $s(t)$ можно заменить на δ -функцию в точке, где значение эхосигнала $s(t)$ максимально. Эти допущения позволяют оценку измеренного поля $\hat{p}(\vec{r}_i, \vec{r}_r, t; \vec{r}_i)$ провести по простейшей формуле $\delta(t - t_t(\vec{r}_i, \vec{r}_i) - t_r(\vec{r}_r, \vec{r}_i))$, где $t_t(\vec{r}_i, \vec{r}_i)$ и $t_r(\vec{r}_r, \vec{r}_i)$ рассчитываются по

формуле (3) в предположении, что $m_t = 0$ и $m_r = 0$. Поэтому алгоритм восстановления изображения (4), учитывая свойства δ -функции, можно в упрощённом виде записать как

$$\hat{\varepsilon}(\vec{r}_i) = \iint p(\vec{r}_r, t) \delta(t - t_t(\vec{r}_i, \vec{r}) - t_r(\vec{r}_r, \vec{r}) + t_{\max}) d\vec{r}_r d\vec{r}_i dt, \quad (5)$$

где t_{\max} - время нарастания эталонного сигнала $s(t)$. Процесс восстановления изображения состоит в том, что для заданной точки \vec{r}_i рассчитываются задержки $t_t(\vec{r}_i, \vec{r}_i)$ и $t_r(\vec{r}_r, \vec{r}_i)$, из массива измеренных эхосигналов «выдёргиваются» и суммируются значения $p(\vec{r}_i, \vec{r}_i, t)$. Такой метод получения изображения дефектов по эхосигналам, измеренным в режиме двойного сканирования, далее будет называться C-SAFT, хотя справедливее назвать его корреляционным. Для анализа изображения дефектов нужно рассчитать огибающую функцию $\hat{\varepsilon}(\vec{r}_i)$, которая будет называться изображением

$$I(\vec{r}_i) = |\hat{\varepsilon}(\vec{r}_i) + i\mathfrak{A}(\hat{\varepsilon}(\vec{r}_i))|,$$

где \mathfrak{A} - построчное преобразование Гильберта.

Метод C-SAFT позволяет получать изображения с учётом отражения от границ объекта контроля. Для этого при расчёте времён задержек в формуле (3) нужно учитывать нужное количество отражений от границ объекта контроля при излучении и при приёме. Это позволит получить парциальное изображение по акустической схеме $(s_i; s_r)$ с помощью формулы

$$\hat{\varepsilon}_{s_i, s_r}(\vec{r}_i) = \iint p(\vec{r}_r, t) \delta(t - t_t(\vec{r}_i, \vec{r}; m_t) - t_r(\vec{r}_r, \vec{r}; m_r) + t_{\max}) d\vec{r}_r d\vec{r}_i dt. \quad (6)$$

Изображение, полученное по этой формуле, во-первых, сформировано только в пределах реальной толщины объекта контроля. Во-вторых, блики, соответствующие эхосигналам по акустической схеме $(s_i; s_r)$, будут восстановлены в правильном месте. Однако, эхоимпульсы «неродных» акустических схем сформируют «неприкаянные» блики там, где дефектов нет. Получая изображения для разных $(s_i; s_r)$ можно получить множество парциальных изображений, в каждом из которых в местах расположения дефектов будут восстановлены правильные блики, а «неприкаянные» блики, сформированные эхосигналами по другим акустическим схемам, будут восстанавливаться в разных местах. Это позволит накопить информацию о правильных бликах и по ним определить тип и размеры дефектов.

Объединить парциальные изображения, полученные по разным акустическим схемам, для выделения правильных бликов можно несколькими способами. **Первый** способ объединения в форме когерентного сложения можно записать как

$$I(\vec{r}_i) = |\hat{\varepsilon}(\vec{r}_i) + i\mathcal{A}(\hat{\varepsilon}(\vec{r}_i))|, \quad \hat{\varepsilon}(\vec{r}_i) = \sum_{s_t, s_r} \hat{\varepsilon}_{s_t, s_r}(\vec{r}_i). \quad (7)$$

Он должен дать лучший результат, но только в том случае, если скорость звука и толщина известны с точностью не менее чем 0.5%. Причем точность определения свойств объекта контроля тем выше, чем дальше ОВИ удалена от области регистрации эхосигналов. **Второй** способ объединения не требует знания скорости звука и толщины с высокой точностью и представляет собой простое сложение модулей парциальных изображений

$$I(\vec{r}_{it}) = \sum_{s_t, s_r} |\hat{\varepsilon}_{s_t, s_r}(\vec{r}_i) + i\mathcal{A}(\hat{\varepsilon}_{s_t, s_r}(\vec{r}_i))|. \quad (8)$$

К сожалению, итоговое изображение будет иметь высокий уровень амплитуды «неприкаянных» бликов и разрешающую способность характерную для изображения, полученного по одной акустической схеме. **Третий** способ представляет собой объединение модулей парциальных изображений как медиану

$$I(\vec{r}_i) = \underset{s_t, s_r}{\text{mediana}} |\hat{\varepsilon}_{s_t, s_r}(\vec{r}_i) + i\mathcal{A}(\hat{\varepsilon}_{s_t, s_r}(\vec{r}_i))|. \quad (9)$$

Однако и этот способ имеет недостаток. Парциальные изображения только точечных дефектов будут иметь неподвижные правильные блики и не пропадут в объединённом изображении. В случае реальных дефектов их изображение может быть сильно искажено, и поэтому часть бликов в объединённом изображении может просто пропасть. Алгоритм получения парциальных изображений по формуле (6) и объединение их в итоговое изображение по одной из формул (7), (8) или (9) будем называть методом М-С-SAFT. Эффективность его применения определяется тем, насколько сильно разбегаются «неприкаянные» блики, сформированные по «неродным» акустическим схемам.

Метод М-С-SAFT достаточно легко реализуется с помощью современной электронной элементной базы и вычислительной техники. Так, например, на далеко не самой мощной графической плате с технологией CUDA [16], позволяющей распараллеливать вычисления, время восстановления изображения удалось уменьшить в **пятьдесят** раз даже без оптимизации расчётов. Более качественные изображения, получаемые методом М-С-SAFT, должны позволить построить надёжную систему автоматизированного контроля с распознаванием типа дефектов и определения их размеров.

4. Получение изображений дефектов при сканировании антенной решёткой (режим тройного сканирования)

Сканирование антенной решёткой, работающей в режиме двойного сканирования, логично назвать режимом тройного сканирования. Его применение должно повысить фронтальную разрешающую способность изображения, в том числе и за пределами ближней зоны антенной решётки, за счёт увеличения угловых размеров апертуры. Пусть антенная решетка, установленная на призму, перемещается N_s раз вдоль оси x . Положение передней грани призмы обозначим, как $\vec{r}_s = (x_s, 0)$, а координаты излучателей \vec{r}_t и приёмников \vec{r}_r будем определять относительно передней грани призмы. В результате проведения измерений в режиме тройного сканирования будет измерено N_s наборов эхосигналов $p(\vec{r}_r + \vec{r}_s, t)$, каждый из которых подобен представленному на Рис. 3. Формулу (6) для получения изображения можно модифицировать следующим образом

$$\hat{\varepsilon}_{s_r, s_t}(\vec{r}_i; \vec{r}_s) = \iint p(\vec{r}_r + \vec{r}_s, t) \delta(t - t_t(\vec{r}_t + \vec{r}_s, \vec{r}; s_t) - t_r(\vec{r}_r + \vec{r}_s, \vec{r}; s_r) + t_{\max}) d\vec{r}_r d\vec{r}_t dt. \quad (10)$$

Видно, что помимо возможности получать изображения по множеству акустических схем s_t и s_s , появилась ещё одна степень свободы, определяемая положением призмы \vec{r}_s , что в N_s раз увеличивает количество парциальных изображений.

Как отмечалось выше, блики дефектов на изображениях, полученных в режиме ФАР-дефектоскопа, по мере удаления от линии фокусировки смещаются от своего истинного положения, что не позволяет их когерентно складывать при сканировании антенной решёткой. Блики же на изображениях, восстановленных методом C-SAFT по эхосигналам, измеренным в режиме двойного или тройного сканирования, не смещаются от своих истинных положений. Объединить парциальные изображения, полученные по формуле (10) в одно можно несколькими способами. **Первый** способ объединения - в форме когерентного сложения по аналогии с формулой (7) можно записать как

$$I(\vec{r}_i) = |\hat{\varepsilon}(\vec{r}_i) + i\mathcal{A}(\hat{\varepsilon}(\vec{r}_i))|, \quad \hat{\varepsilon}(\vec{r}_i) = \sum_s \sum_{s_t, s_r} \hat{\varepsilon}_{s_r, s_t}(\vec{r}_i; \vec{r}_s). \quad (11)$$

Второй способ объединения - в форме сложения модулей парциальных изображений по аналогии с формулой (8) можно записать как

$$I(\vec{r}_i) = \sum_s \sum_{s_t, s_r} |\hat{\varepsilon}_{s_r, s_t}(\vec{r}_i; \vec{r}_s) + i\mathcal{A}(\hat{\varepsilon}_{s_r, s_t}(\vec{r}_i; \vec{r}_s))|. \quad (12)$$

Третий способ объединения парциальных изображений по аналогии с формулой (9) можно записать как

$$I(\vec{r}_i) = \underset{s}{\text{mediana}} \left(\sum_{s_i, s_r} \left| \hat{\varepsilon}_{s_i, s_r}(\vec{r}_i; \vec{r}_s) + i\mathfrak{I}(\hat{\varepsilon}_{s_i, s_r}(\vec{r}_i; \vec{r}_s)) \right| \right). \quad (13)$$

Алгоритм получения парциальных изображений по формуле (10) и объединение их в итоговое изображение по одной из формул (11), (12) или (13) будем называть методом TS-M-C-SAFT. Такой подход позволяет использовать преимущества антенных решёток и традиционных когерентных методов получения изображения дефектов, использующих механическое перемещение преобразователей.

Следует отметить очень важный момент. Всем предложенным в данной работе вариантам объединения парциальных изображений, свойствен один очень важный недостаток. Практически в каждом парциальном изображении будут присутствовать «неприкаянные» блики, амплитуда которых в объединённом изображении должна уменьшиться. Но, несмотря на это, «неприкаянные» блики будут затруднять анализ изображений реальных дефектов. Один из вариантов радикального решения данной проблемы состоит в том, что формулу (1) можно переписать в матричном виде

$$p = G\varepsilon, \quad (14)$$

где p - вектор из измеренных эхосигналов, G - матрица, сформированная при решении обратной задачи с учётом всех акустических схем s_i и s_s для всех положений антенной решётки \vec{r}_s , ε - вектор искомого рассеивающего потенциала. Вектора и матрица в формуле (14) должны быть лексикографически сформированы из измеренных эхосигналов и из оценки матрицы G согласно формулам (1), (2) и (3). Такой подход позволяет, рассчитав матрицу G , в которой учтены все акустические схемы, найти непосредственно решение $\hat{\varepsilon}$ без расчёта парциальных изображений $\hat{\varepsilon}_{s_i, s_r}(\vec{r}_i; \vec{r}_s)$ с «неприкаянными» бликами. Для решения уравнения (14) можно использовать огромный потенциал методов регуляризации [17], и, несмотря на существенно большие требования к вычислительным ресурсам, такой подход является очень перспективным [18, 19].

5. Модельный эксперимент

Для регистрации эхосигналов в режиме двойного сканирования использовался специальным образом настроенный ФАР-дефектоскоп «X-32» с антенной решёткой типа РЕ-5.0М32Е0.8Р с резонансной частотой 5.0 МГц, состоящая из 32 элементов с шагом 0.8 мм. Антенная решётка была установлена на стандартную призму Т1-35WOD из рексолита с углом наклона 35 градусов. Модельные эксперименты проводились с помощью когерентного

ультразвукового дефектоскопа серии «Авгур», разработанного и изготавливаемого в «Научно-производственном центре «Эхо+»».

5.1. Модель придонной трещины с вершиной на глубине 12 мм в образце Т-Б-18-Тр-Ст20 №0804

На Рис. 8. представлен образец Т-Б-18-Тр-Ст20 №0804 толщиной $h = 18$ мм с моделью придонной трещины в виде паза шириной 0.7 мм с вершиной на глубине 12 мм. Стальной образец имел неровное дно для имитации расточки в трубопроводе типа Ду300. Скорость продольной волны задавалась как 5.9 мм/мкс, скорость поперечной волны как 3.23 мм/мкс. В режиме тройного сканирования антенная решётка из точки $x_{start} = -23.3$ мм перемещалась 20 раз с шагом 1.94 мм.

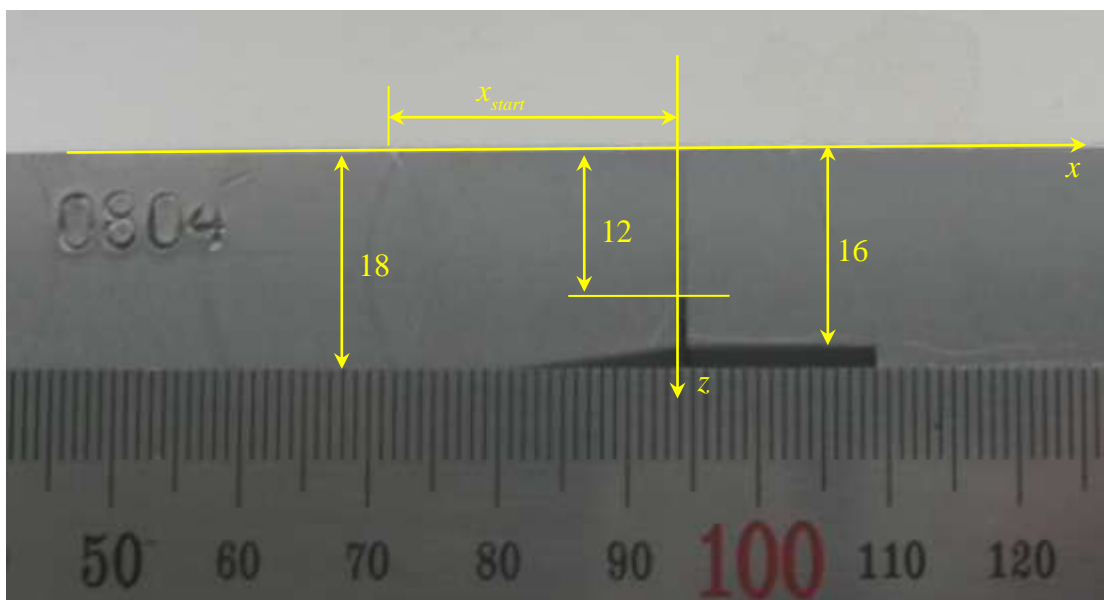


Рис. 2 Фотография образца Т-Б-18-Тр-Ст20 №08040803 с моделью трещины в виде паза шириной 0.7 мм с вершиной на глубине 12 мм

Малоапертурный элемент антенной решётки шириной 0.75 мм, в сочетании с длиной импульса равной 0.4 мкс, является идеальным инструментом для излучения в широком диапазоне углов как продольных, так и поперечных волн. На Рис. 3 показан набор эхосигналов В-типа, полученный в режиме двойного сканирования, при расположении передней грани призмы в точке $x = -23.3$ мм. Для подчёркивания эхосигналов малой амплитуды контрастность изображения была увеличена на 9 дБ. Хорошо видно, что эхосигналы собраны в 32 группы, первая из которых соответствует ситуации излучения первым элементом антенной решётки и приём всеми элементами, вторая группа - излучения вторым элементом антенной

решётки и приём всеми элементами, и, наконец, последняя группа сформирована при излучении 32-ым элементом АР и приёмом всеми элементами.

Для уменьшения реверберационного шума в призме был рассчитан медианный В-шаблон $p_B(\vec{r}_r, t)$ набора эхосигналов. Медианный В-шаблон $p_B(\vec{r}_r, t)$, несущий в себе информацию о постоянных составляющих, присутствующих во всех эхосигналах для каждого \vec{r}_s , был вычтен из каждого набора эхосигналов

$$p_{rm}(\vec{r}_r + \vec{r}_s, t) = p(\vec{r}_r + \vec{r}_s, t) - p_B(\vec{r}_r, t), \quad p_B(\vec{r}_r, t) = \underset{s}{\text{mediana}}(p(\vec{r}_r + \vec{r}_s, t)). \quad (15)$$

Такой подход даёт хорошие результаты для случая, когда антенная решётка в режиме тройного сканирования перемещается более десяти раз. На Рис. 3 выносками отмечены эхосигналы, как минимум, по шести акустическим схемам, которые удалось уверенно идентифицировать. Выносками зелёного цвета отмечены эхосигналы от вершины паза, красного – от корня паза, и желтого цвета – от поверхности паза.

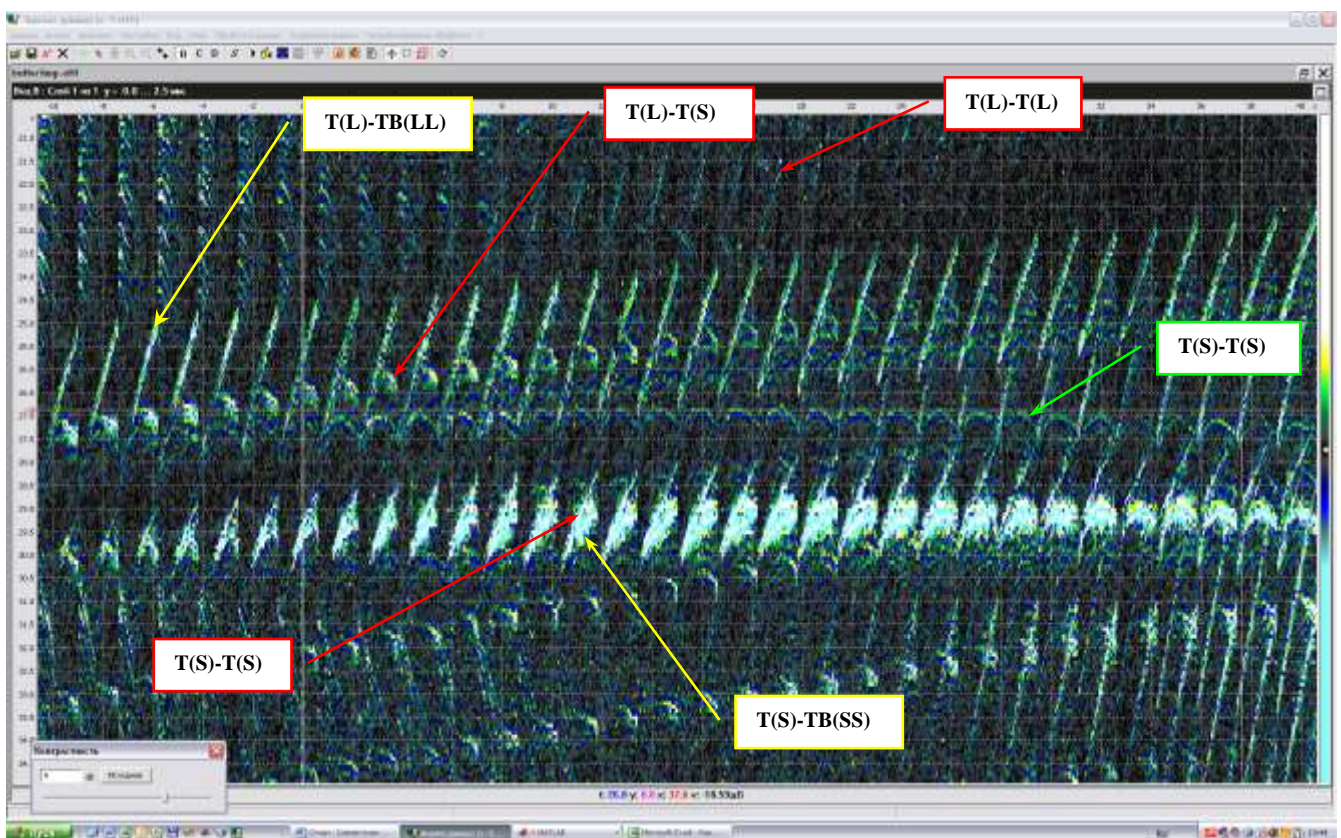


Рис. 3 Набор эхосигналов измеренных в режиме двойного сканирования. Выносками зелёного цвета отмечены эхосигналы от вершины паза, красного – от корня паза, а желтого цвета – от поверхности паза.

На Рис. 4 показаны максимальные амплитуды всех парциальных изображений, полученных по схемам $T^{(*)}-T^{(*)}$, $T^{(*)}-TB^{(**)}$, $TB^{(**)}-TB^{(**)}$, $T^{(*)}-TBT^{(*)}$, $TB^{(*)}-TBT^{(*)}$ и $TBT^{(*)}-TBT^{(*)}$ методом C-SAFT для каждого из двадцати положений антенной решётки. По оси x отложены номера акустических схем, а по оси y указано положение передней грани призмы. На Рис. 4 выносками отмечены акустические схемы, по которым изображения имеют наибольшие амплитуды. То, что самые большие амплитуды получаются по схемам на поперечных волнах, объясняется тем, что используемая стандартная призма с углом наклона 35-ять градусов предназначена для работы на поперечных волнах. Поэтому актуальной является задача подбора оптимального угла наклона призмы для выравнивания амплитуд парциальных изображений. Можно предположить, что для призмы из рексолита оптимальный угол наклона для выравнивания чувствительности по продольным и поперечным волнам будет где-то в районе 25-и градусов.

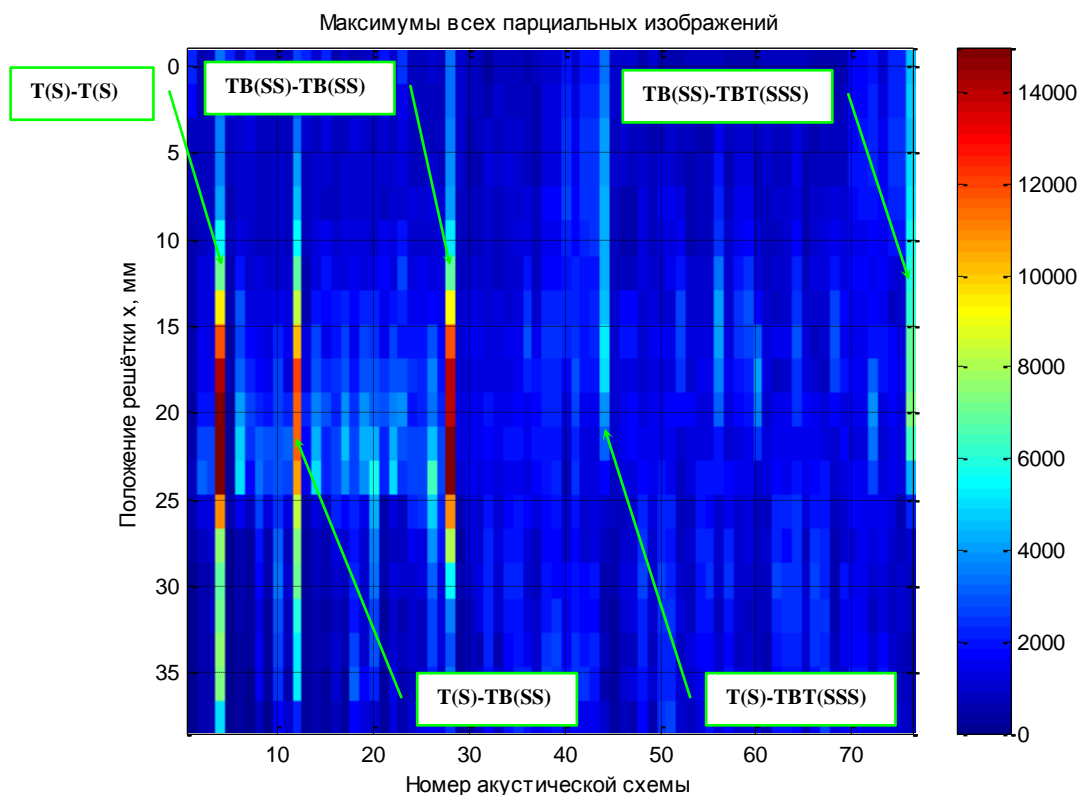


Рис. 4 Амплитуды парциальных изображений в зависимости от акустической схемы и положения АР.

Так как, согласно Таблица 1, для каждого положения АР для акустических схем $T^{(*)}-T^{(*)}$, $T^{(*)}-TB^{(**)}$, $TB^{(**)}-TB^{(**)}$, $T^{(*)}-TBT^{(*)}$ и $TB^{(*)}-TBT^{(*)}$ восстанавливается 44 парциальных изображений, то для формирования итогового изображения по формулам (7),

(8) или (9) использовалось 880 изображений. Огромное число парциальных изображений позволяет надеяться на проявление закона перехода количества в качество. В приложении к задачам ультразвукового неразрушающего контроля это означает, что по большому количеству парциальных изображений невысокого качества можно получить итоговое высококачественное изображение предельно похожее на оптическое. Например, на Рис. 5 приведены все парциальные изображения, полученные по акустической схеме $T(*)-TB(**)$, позволяющей восстановить изображение «тела» трещины (см. Таблица 1). Из восьми схем, как минимум, четыре схемы ($T(L)-TB(SL)$, $T(S)-TB(LS)$, $T(S)-TB(SL)$ и $T(S)-TB(SS)$) дают в нужном месте блик трещины, а на остальных четырёх схемах «неприкайнные» блики сфокусировались в местах, где дефекта нет. Но если бы трещина была наклонной, или дно имело другую форму, то её блик, скорее всего, проявился бы на изображениях, полученных по акустическим схемам, которые для вертикально ориентированной трещины неинформативны. На изображении, полученном по акустической схеме $T(L)-TB(SL)$ (схема «самотандем»), хорошо видны ещё два вертикально расположенных блика, один из которых на изображении, полученном по акустической схеме $T(S)-TB(SL)$, появился на нужном месте. Однако блик, который на схеме $T(L)-TB(SL)$ формировал правильное изображение трещины, на изображении, полученном по схеме $T(S)-TB(SL)$, стал «неприкайнным». Миграция трёх бликов между рассмотренными изображениями отмечена тремя стрелками.

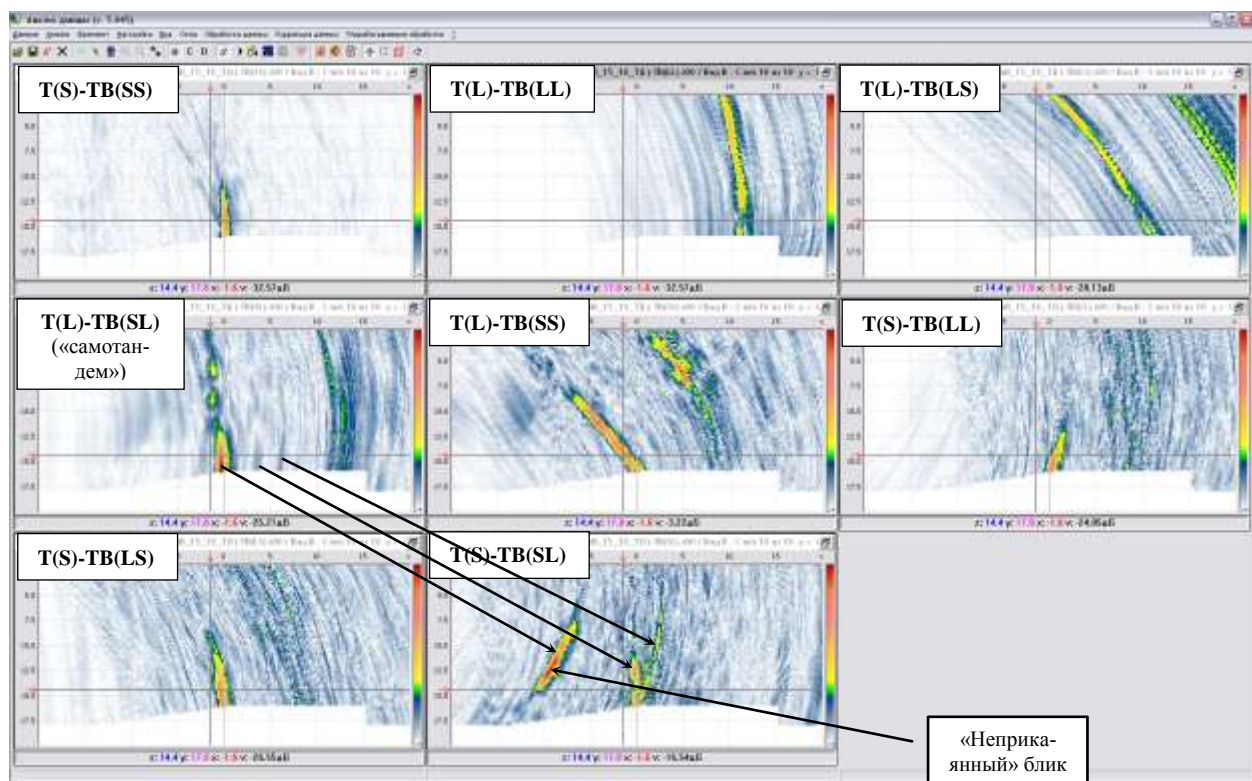


Рис. 5 Изображение модели трещины по всем акустическим схемам $T^{(*)}$ - $TB^{(**)}$.

Для повышения качества объединённого изображения были предприняты простейшие меры. Перед объединением каждое парциальное изображение подвергалось операции отсечки по уровню своего математического ожидания плюс три среднеквадратичных отклонения. Для получения объединённого изображения использовались только те парциальные изображения, максимальная амплитуда которых больше математического ожидания максимумов всех парциальных изображений (см. Рис. 4).

На Рис. 6 слева показано изображение после когерентного суммирования всех парциальных изображений согласно формуле (7) для одного положения антенной решётки, на которое наброшена маска белого цвета с контурами дна и модели трещины в виде пропила. Для подчёркивания бликов малой амплитуды контрастность палитры была увеличена. Высоту трещины по данному изображению можно оценить в 5.2 мм, то есть с ошибкой 0.8 мм. На правой панели Рис. 6 показан результат комплексного суммирования изображений для двадцати положений антенной решётки по формуле (11). Видно, что профиль трещины практически не имеет провалов, а высоту трещины можно оценить в 4 мм.

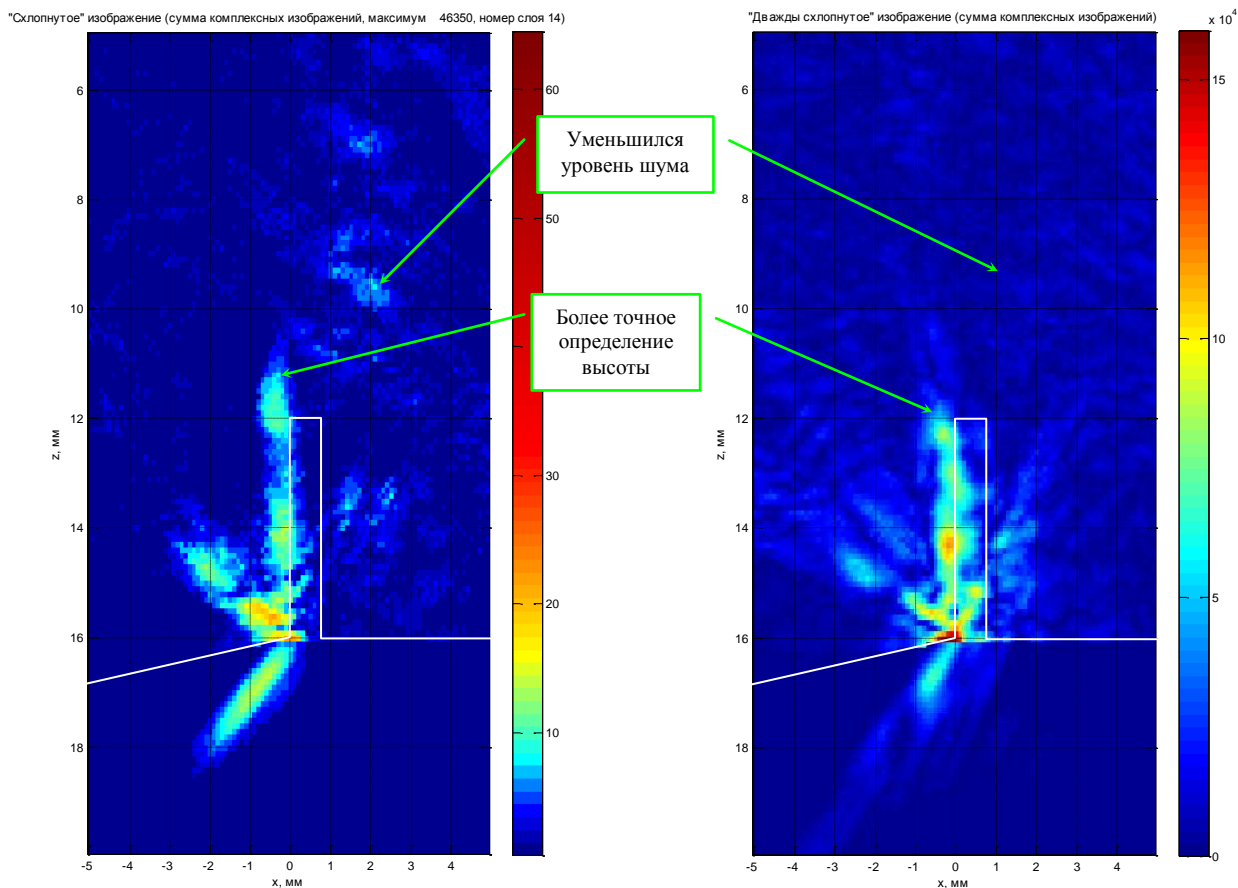


Рис. 6 Слева показано изображение модели трещины в виде паза высотой 4 мм с учётом отражений от границ объекта контроля для одного положения антенной решётки, а справа для двадцати положений антенной решётки. Итоговое изображение формировалось как комплексная сумма парциальных изображений согласно формуле (7).

На Рис. 7 представлены объединенные парциальные изображения модели трещины в виде паза высотой 4 мм с учётом отражений от границ объекта контроля для двадцати положений антенной решётки. Слева сверху – как медиана всех парциальных изображений, согласно формуле(13), справа сверху – как сумма амплитуд парциальных изображений, согласно формуле(12), внизу в центре – как комплексная сумма парциальных изображений, согласно формуле(11). Комплексная сумма парциальных изображений имеет самые крутые фронты блика и больше всего совпадает с изображением вертикальной границы модели трещины.

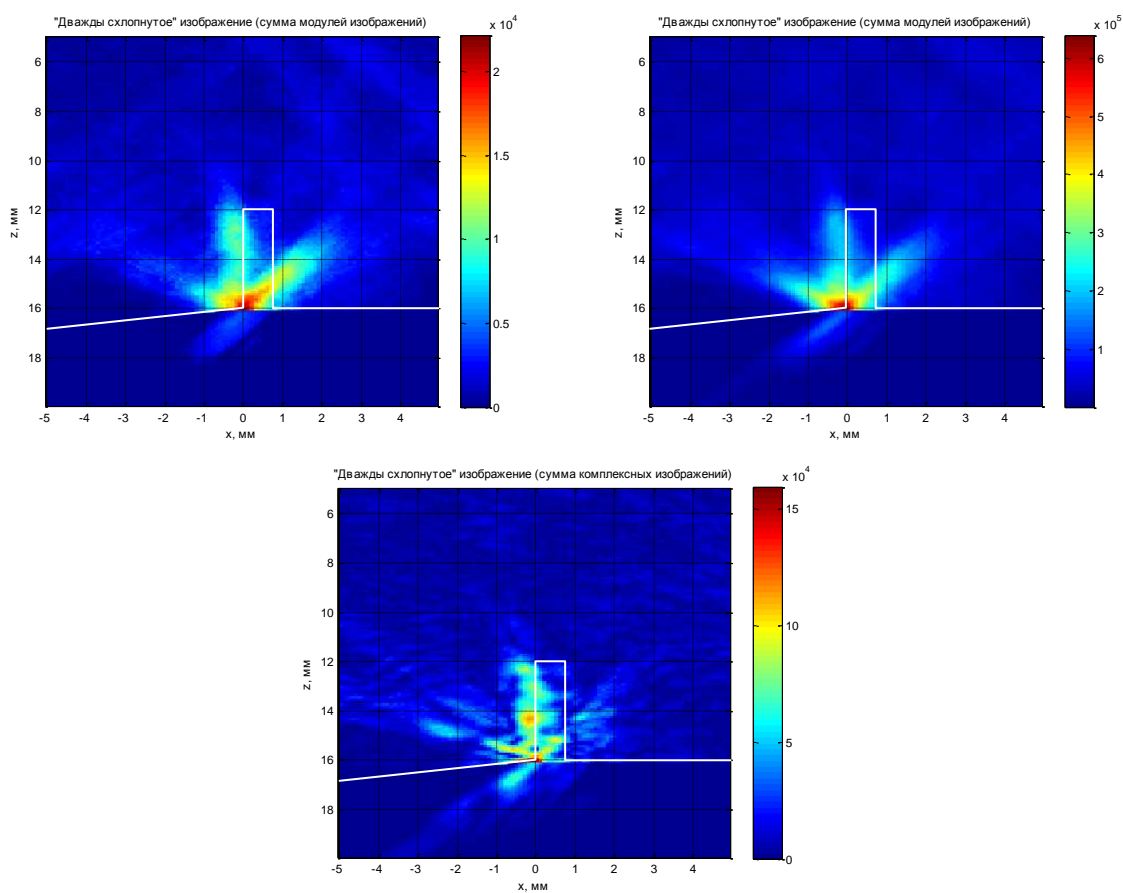


Рис. 7 Объединённые парциальные изображения модели трещины в виде паза высотой 4 мм с учётом отражений от границ объекта контроля для шестнадцати положений излучателя. Слева сверху – как медиана всех парциальных изображений, справа сверху – как сумма амплитуд парциальных изображений, внизу в центре – как комплексная сумма парциальных изображений.

5.2. Отверстие бокового сверления диаметром 2 мм на глубине 12 мм в образце Т-Б-18-О-Ст20 №0803

На Рис. 8. показан образец Т-Б-18-О-Ст20 №0803 толщиной $h = 18$ мм с моделью объемного дефекта в виде сквозного отверстия бокового сверления диаметром 2 мм на глубине 12 мм. Стальной образец имел неровное дно для имитации расточки в трубопроводе типа Ду300. Скорость продольной волны задавалась как 5.9 мм/мкс, скорость поперечной волны как 3.23 мм/мкс. В режиме тройного сканирования антенная решётка из точки $x_{start} = -23.3$ мм перемещалась 20 раз с шагом 1.94 мм. Для уменьшения реверберационного шума в призме медианный В-шаблон был вычтен из каждого набора эхосигналов согласно формуле (15).

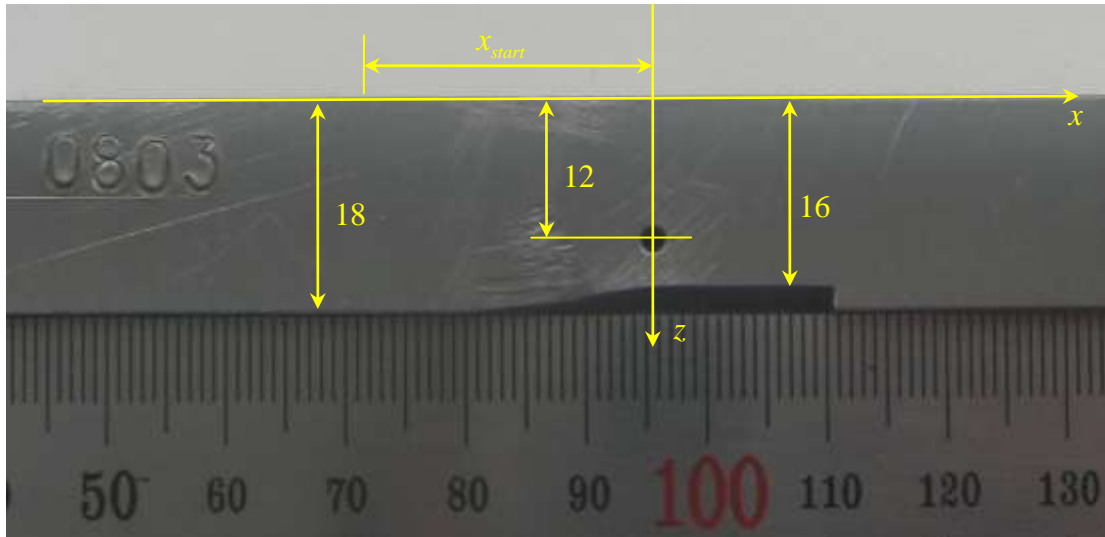


Рис. 8 Фотография образца Т-Б-18-О-Ст20 №0803 со сквозным отверстием бокового сверления диаметром 2 мм на глубине 12 мм.

На Рис. 9 показаны максимальные амплитуды всех парциальных изображений полученных по схемам **T(*)-T(*)**, **T(*)-ТВ(**)**, **ТВ(**)-ТВ(**)**, **T(*)-ТВТ(*)**, **ТВ(*)-ТВТ(*)** и **ТВТ(*)-ТВТ(*)** методом C-SAFT для каждого из двадцати положений антенной решётки. Видно, что распределение максимумов амплитуд от отверстия заметно отличается от распределения для модели трещины (см. Рис. 4).

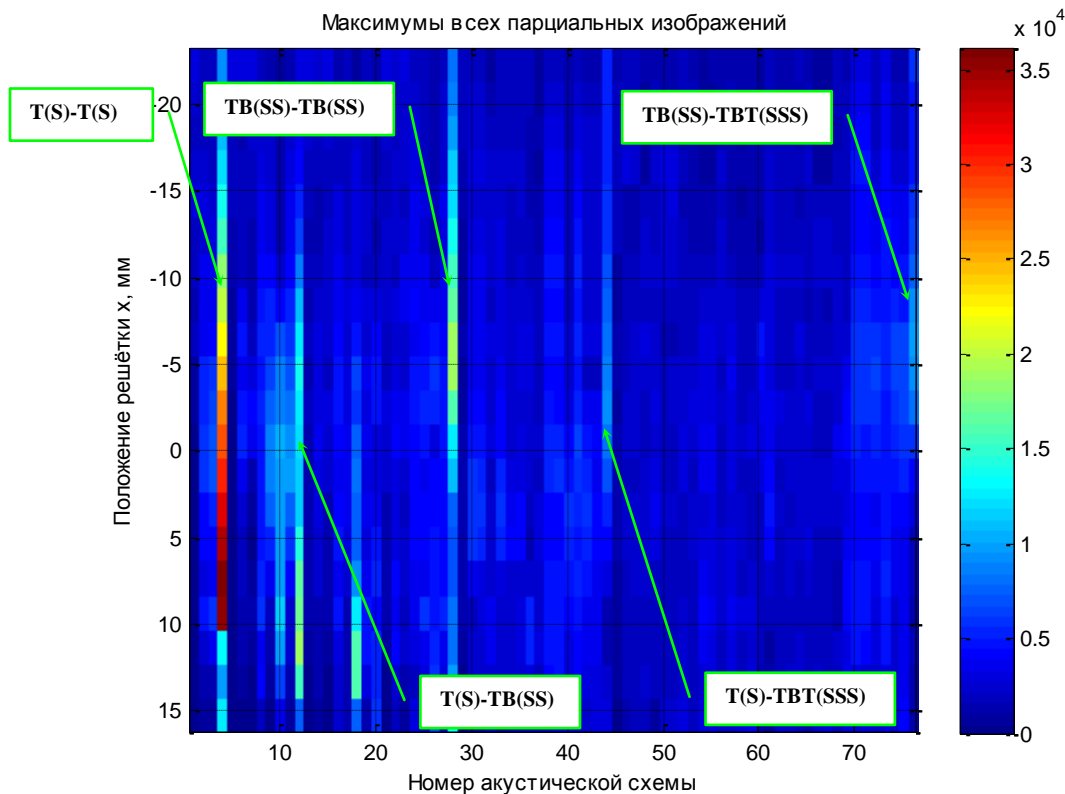


Рис. 9 Амплитуды парциальных изображений в зависимости от акустической схемы и положения АР.

Перед объединением, как и в предыдущем разделе, каждое парциальное изображение подвергалось операции отсечки по уровню своего математического ожидания плюс три среднеквадратичных отклонения. Для получения объединённого изображения использовались парциальные изображения, максимальная амплитуда которых больше математического ожидания максимумов всех парциальных изображений (см. Рис. 9).

На Рис. 10 представлены объединенные парциальные изображения отверстия бокового сверления с учётом отражений от границ объекта контроля для двадцати положений антенной решётки. Слева сверху – как медиана всех парциальных изображений, согласно формуле (13), справа сверху – как сумма амплитуд парциальных изображений, согласно формуле (12), внизу в центре – как комплексная сумма парциальных изображений, согласно формуле (11). На изображение наброшена маска с изображением дна и отверстия бокового сверления. Видно, что на объединенном как медиана или сумма модулей изображении отчётливо угадывается форма границы отверстия, и если бы провести измерения, развернув призму с антенной решёткой на 180 градусов относительно оси z , то форму модели объемного дефекта удалось бы восстановить практически полностью и, следовательно, решить задачу классифи-

кации типа дефекта. А вот, когерентное сложение парциальных изображений хоть и позволило получить изображение с самыми крутыми фронтами, но привело к дроблению блика границы отверстия. Возможно, это связано с тем, что форма границы дна при расчётах была смещена на величину около 0.5 мм от реальной формы дна, что соизмерима с длиной волны. Важность точной привязки формы границы к апертуре сканирования отмечена и в статье [5].

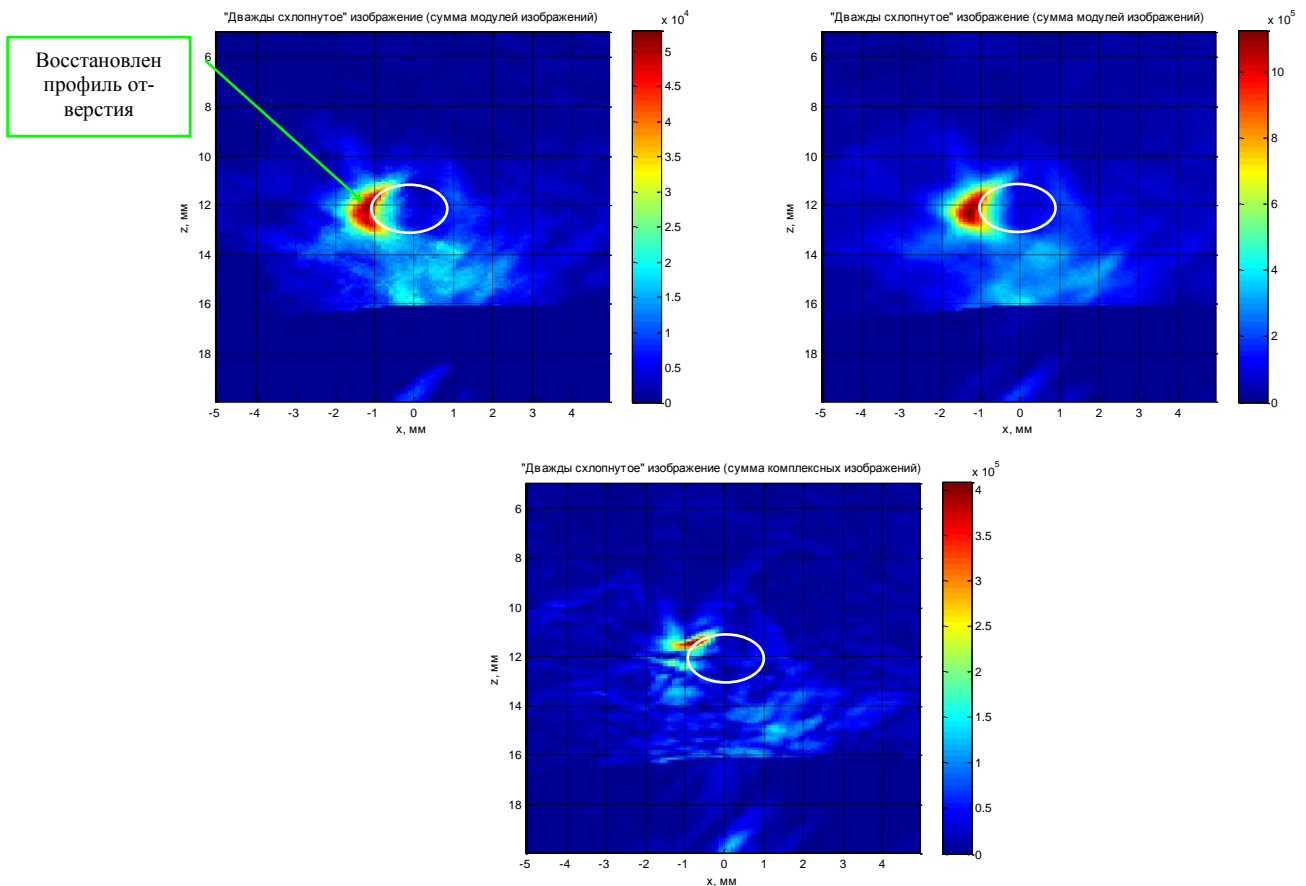


Рис. 10 Объединённые парциальные модели объёмного дефекта с учётом отражений от границ объекта контроля для шестнадцати положений излучателя. Слева сверху – как медиана всех парциальных изображений, справа сверху – как сумма амплитуд парциальных изображений, внизу в центре – как комплексная сумма парциальных изображений.

6. Выводы

Подводя итоги исследований, изложенных в представленной статье, можно сделать следующие выводы:

- Когерентное сложение парциальных изображений предъявляет повышенные требования к точности определения значений продольной и поперечной скоростей звука, формы дна и поверхности.

- По изображениям, полученным методом FS-M-SAFT с учётом трансформации типов волн при отражении от границ по эхосигналам, измеренным в режиме тройного сканирования, можно уверенно отличить трещину от объемного дефекта.
- Для выравнивания амплитуд парциальных изображений нужно использовать не стандартную призму с углом наклона 35-ять градусов, а призму с углом наклона около 25-и градусов.

7. Список литературы

- 1 X-32 портативный дефектоскоп, <http://www.harfang.ru/content/x-32.html>
- 2 OmniScan MX, <http://www.olympus-ims.com/ru/omniscan-mx/>
- 3 ISONIC 2009, <http://www.sonotronndt.com/i2009.htm>
- 4 Базулин Е.Г., Голубев А.С., Коколев С.А. Применение ультразвуковой антенной решетки для регистрации эхосигналов методом двойного сканирования для получения изображений дефектов. - Дефектоскопия, 2009, №2, с. 18-32.
- 5 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.
- 6 Данилов В.Н., Самокрутов А.А., Люткевич А.М. Теоретические и экспериментальные исследования малоапертурных прямоугольных преобразователей. М.: Машиностроение. // Контроль. Диагностика. – 2003. № 7. с. 29 – 33.
- 7 A1550 IntroVisor, <http://www.introvisor.ru/>
- 8 Bulavinov A., Dalichow M., Kröning M., Kurz J. H., Walte F. and Reddy K., Quantitative Ultrasonic Testing of Pressurized Components Using Sampling Phased Array. - Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation Dec. 7 - 9, 2006, Hyderabad, p, 437-448.
- 9 Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция. Дефектоскопия, 1990, № 2, с. 29-41.
- 10 Shcherbakov O., Petrov A., Polevoy A., Annenkov A. Technologies and equipment for ultrasonic testing of welded joints with monitoring of acoustic contact and evaluating the nature and actual parameters of defects. - – 10th ECNDT, Moscow, Russia, June 7-11, 2009.
- 11 Горюнов А.А., Сасковец А.В. Обратные задачи рассеяния в акустике. М.: Издательство МГУ, 1989. 152 с.
- 12 Кравцев Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. - М.: Наука, 1980, с. 304
- 13 Holmes, C., Drinkwater, B.W. and Wilcox, P.D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation. NDT&E International, 2005; 38:701-711
- 14 Борн М., Вольф Э. Основы оптики: Пер. с англ. Изд.2, испр. М.: Наука, 1973. 720 с.

-
- 15 Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Ультразвуковой контроль. – В кн.: Неразрушающий контроль/ Справочник / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
- 16 Технология NVIDIA CUDA™, http://www.nvidia.ru/object/cuda_what_is_ru.htmlCUDA
- 17 Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. (изд. 3-е, исправл.) М.: Наука 1986. 287 с.
- 18 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
- 19 Lingvall F., Olofsson T., Wennerström E., Stepinski T. Optimal linear receive beamformer for ultrasonic imaging in NDT. - 16th WCNDT 2004 - World Conference on NDT, Aug 30 - Sep 3, 2004 - Montreal, Canada.