

УДК 620.179.162 : 534.87

PACS: 43.60.+d

Ультразвуковой контроль на однократно отражённом луче с использованием прореженных антенных решёток и трёхмерной обработки эхосигналов

Базулин Е.Г.

ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»

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

E-mail: bazulin@echoplus.ru

Контроль сварных соединений в главных запорных задвижках первого контура реакторной установки ВВЭР-440 (ГЗЗ) затруднён из-за высокого уровня структурного шума и необходимости использовать импульсы однократно отражённые от наклонного дна патрубка. Проведение контроля на продольной волне приводит к возникновению в восстановленном изображении отражателей ложных бликов, сформированных импульсами на поперечной волне. Так как амплитуда ложных бликов может быть соизмерима с амплитудой бликов, полученных на продольных волнах, то анализ таких изображений может быть затруднён. Для повышения качества изображения предложено регистрировать эхосигналы с помощью прореженных антенных решёток и применять трёхмерную обработку эхосигналов. Численные и модельные эксперименты показали, что такой подход повышает в несколько раз фронтальную разрешающую способность в дополнительной плоскости и уменьшает амплитуду ложных бликов, что позволяет повысить чувствительность и достоверность экспертного ультразвукового контроля главной запорной задвижки.

Ключевые слова: прореженные антенные решётки (ПРАР), двойное сканирование, Full Matrix Capture (FMC), тройное сканирование, C-SAFT, Total Focusing Method (TFM), 3D-обработка, главная запорная задвижка первого контура реакторной установки ВВЭР-440 (ГЗЗ).

1 Введение

Ультразвуковой контроль промышленных объектов иногда осложняется тем, что они изготовлены из материалов с высоким уровнем поглощения, а их конструкция такова, что эхосигналы, отражённые от несплошности, невозможно зарегистрировать на прямом

луче. Например, контроль сварных соединений в главных запорных задвижках первого контура реакторной установки ВВЭР-440 (ГЗЗ) затруднён из-за высокого уровня структурного шума и из-за того, что приходится использовать импульсы однократно отражённые от наклонного дна патрубка. Так как для контроля объектов из материалов с высоким уровнем структурных шумов используют продольные волны, то на изображениях отражателей будут присутствовать ложные блики, сформированные импульсами на поперечных волнах. Причём амплитуда ложных бликов может быть соизмерима с амплитудой бликов, полученных на продольных волнах. По этой причине, анализ таких изображений крайне затруднён. Для уменьшения уровня шума изображение отражателей восстанавливают по эхосигналам когерентными методами. Так в системе экспертного ультразвукового контроля АВГУР 5.2 [1] используется метод проекции в спектральном пространстве (ПСП) [2, 3]. Однако, несмотря на повышение отношения сигнал/шум более чем на 12 дБ в сравнении с методиками ручного контроля, анализ изображений, восстановленных когерентными методами по эхосигналам измеренным сканирующим одноэлементным пьезопреобразователем не всегда позволяет уверенно обнаруживать несплошности в сварном соединении ГЗЗ. Поэтому разработка технологий контроля на продольной волне при однократном отражении от дна на остаётся актуальной задачей.

1.1 Описание объекта контроля

Испытательный образец, фотографии которого приведены на Рис. 1 и Рис. 2, предназначен для проведения приёмочных испытаний средств эксплуатационного автоматизированного ультразвукового контроля сварного соединения приварки патрубков Ду500 к корпусам ГЗЗ. Образец представляет собой сектор сварного соединения патрубка Ду500 к корпусом главной запорной задвижки и изготовлен из заготовки, вырезанной из реального изделия. Характерные размеры образца приведены на Рис. 3. Сварной шов выполнен согласно штатной технологии выполнения сварного соединения приварки патрубка Ду500 к корпусу главной запорной задвижки реактора ВВЭР-440. Патрубок выполнен из аустенитной стали, а замыкающая полусфера главной запорной задвижки выполнена по технологии литья аустенитной стали.

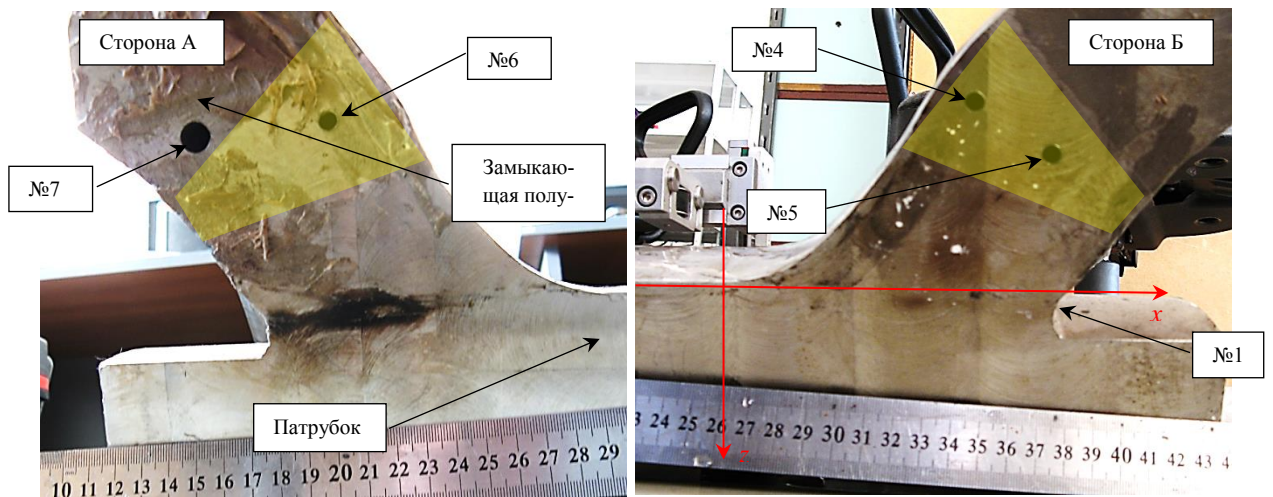


Рис. 1. Фотографии испытательного образца со стороны А (слева) и Б (справа). Контуры сварного соединения схематически показаны полупрозрачным многоугольником жёлтого цвета

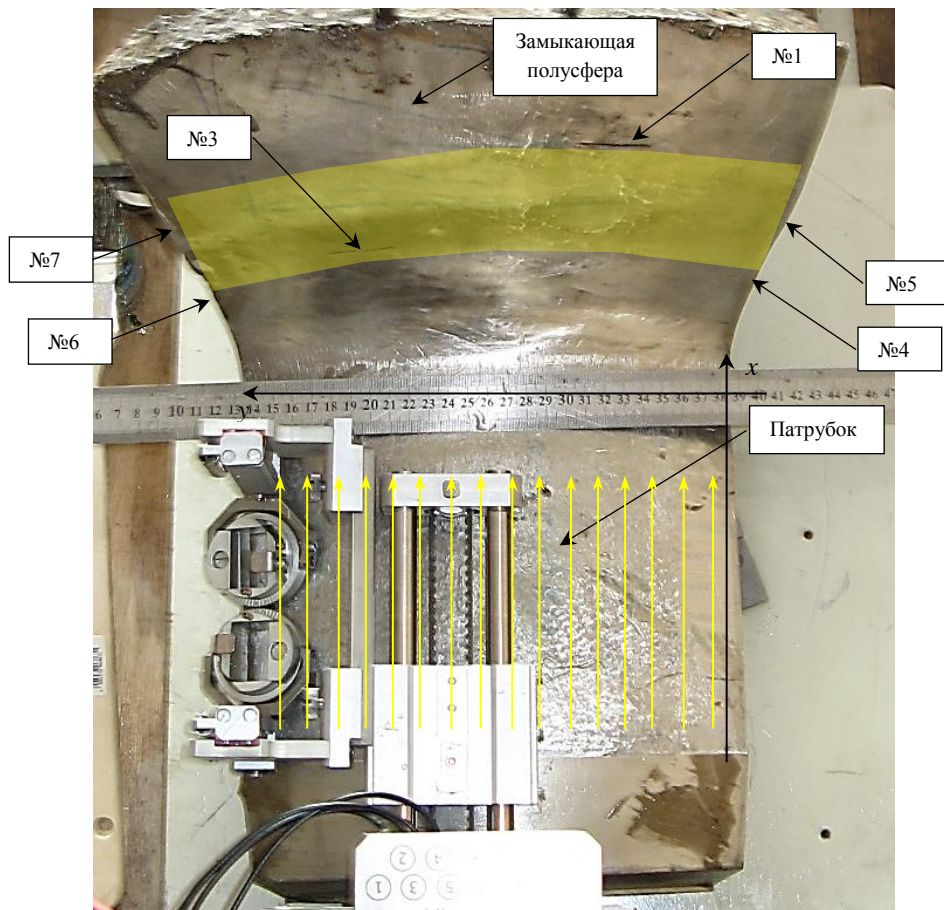


Рис. 2. Фотография испытательного образца. Контуры сварного соединения схематически показаны полупрозрачным многоугольником жёлтого цвета

В образце, характерные размеры которого приведены на Рис. 3, были заложены следующие отражатели: 3 фрезерованных паза и 4 отверстия бокового сверления. Боковые

отверстия №4, 6 и 5 имеют диаметр 6 мм, а отверстие №7 – диаметр 10 мм (Рис. 1). Все отверстия были просверлены на глубину примерно 50 мм. Паз №1 имеет глубину 11 мм, а пазы №2 и 3 – глубину 6 мм (Рис. 2). Длина пазов равна примерно 34 мм. На Рис. 3 схематично показаны все заложенные в образце отражатели.

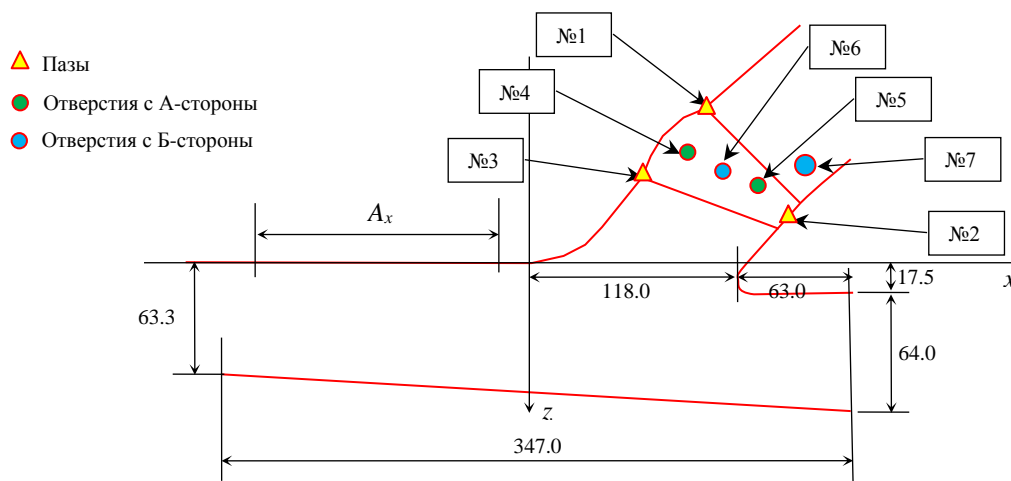


Рис. 3. Эскиз испытательного образца с характерными размерами и местами расположения отражателей

1.1.1. Оценка затухания

Оценка затухания материала, из которого изготовлен образец ГЗЗ, проводилась с помощью прямого преобразователя на 1.8 МГц. Приложив его поверхности патрубка, несмотря на наклон дна примерно в четыре градуса, можно было уверенно наблюдать пять импульсов, отражённых от дна. При попытке прозвучить сварное соединение количество наблюдаемых импульсов отражённых от дна уменьшилось до трёх. Нужно учесть, что неровный валик усиления затруднял эффективный ввод ультразвука в сварное соединение. Если преобразователь прикладывался к замыкающей полусфере, то при неизменном усилении удавалось увидеть только однократно отраженный от дна импульс с амплитудой в 30% от вертикального размера экрана. Таким образом, можно сделать вывод, что затухание в материале патрубка на частоте 1.8 МГц достаточно слабое и можно попытаться использовать акустические схемы, использующие не только продольную, но и поперечную волны.

1.2 Методы семейства SAFT для восстановления изображения отражателей

Для восстановления изображения отражателей широко используются методы обработки эхосигналов во временной области **Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT)** или метод комбинированного SAFT (C-SAFT) [4, 5], которые могут учитывать распростра-

нение ультразвука в объекте контроля при многократных отражениях от его неровных границ с учётом эффекта трансформации типа волны [9]. В зарубежной литературе метод SAFT и C-SAFT называется **Total Focusing Method (TFM)** [6]. С помощью антенной решёткой эхосигналы можно зарегистрировать методом двойного сканирования, когда регистрируются эхосигналы при излучении и приёме всеми парами элементов решётки.

Под акустической схемой, которую обозначим как as , будем подразумевать описание лучевой траектории распространения импульса от излучателя до приёмника при отражении от неровных границ объекта контроля с учётом трансформации типа волны. Для описания акустических схем будем пользоваться следующими обозначениями: буквами **rs** будем обозначать такое событие, как отражение от поверхности, буквами **rb** будем обозначать отражение от дна, а буквой **d** отражение от дефекта; тип волны будем обозначать буквами **L** (продольная) и **T** (поперечная). Последовательная запись типов волны и событий будет определять акустическую схему. Такой способ обозначения акустических схем используется в программе CIVA [7], предназначенной для моделирования результатов неразрушающего контроля, в частности, ультразвукового. Запись **TdL** соответствует работе на прямом луче, когда излучение происходит на поперечной волне, а приём на продольной волне. Схема **LrbLdTrbTrsT** описывает ситуацию, когда при излучении анализируются лучи однократно отраженные на продольной волне, а при приёме – двукратно отраженные на поперечной волне. Схема **LrsTdTrbT** описывает ситуацию, когда при излучении вдоль поверхности распространяется головная волна, которая порождает боковую волну, а при приёме рассматривается только однократно отраженная поперечная волна.

Принцип работы методов семейства SAFT можно изложить следующим образом. Пусть проведены измерения эхосигналов, либо при сканировании одноэлементным преобразователем $p(\mathbf{r}_r, t)$, либо антенной решёткой, работающей в режиме двойного сканирования $p(\mathbf{r}_r, t; \mathbf{r}_i)$, где \mathbf{r}_r , \mathbf{r}_i – координаты элемента излучающего зондирующий импульс и элемента принимающего эхосигнал. Для того чтобы оценить изображение $\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i; as)$ отражателя для заданной акустической схемы as нужно рассчитать время пробега $t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_i; as)$ импульса от излучателя до точки \mathbf{r}_i , принадлежащей области восстановления изображения (ОВИ), и до приёмника. Для расчёта можно воспользоваться вариационным принципом Ферма [8]. В соответствии с задержками $t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_i; as)$ из измеренных эхосигналов $p(\mathbf{r}_r, t; \mathbf{r}_i)$ извлекаются и суммируются их значения для всех \mathbf{r}_r и \mathbf{r}_i . Если точка \mathbf{r}_i совпадает с реальным положением отражателя, то все эхосигналы будут складываться в фазе и значение $\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i; as)$ будет большим, что и будет служить указанием на наличие несплошности. При

удалении точки \mathbf{r}_i от места расположения отражателя амплитуда эхосигнала будет уменьшаться, и их сложение будет происходить не в фазе, что приведёт к падению значения $\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i; as)$. Перебирая все точки \mathbf{r}_i , принадлежащие ОВИ, можно восстановить изображение отражателей методом C-SAFT. Когда $\mathbf{r}_r = \mathbf{r}_i$, то есть сканирование происходит одноэлементным ПЭП принято говорить о применении метода SAFT. Однако принципиальной разницы между двумя методами нет.

Если антенная решётка перемещается N_w раз по поверхности объекта контроля, то добавив когерентное суммирование парциальных изображений $\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_w; as)$, восстановленных для каждого положения антенной решётки \mathbf{r}_w , изображение отражателей с ещё более высокой фронтальной разрешающей способностью можно получить по формуле

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

Режим регистрации эхосигналов в режиме двойного сканирования при перемещении антенной решётки назовём режимом тройного сканирования. Поэтому метод (1) сокращённо можно обозначить как TS-C-SAFT (аббревиатура TS означает режим тройного сканирования).

Метод формирования множества изображений $\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_w; as_n)$ по списку акустических схем $L_{as} = \{as\}_{N_{as}}$ рассмотрен в статье [9] и назван в ней методом M-C-SAFT (аббревиатура M указывает на использование многих акустических схем). В работе [10] так же рассматривается проблема получения изображения по нескольким акустическим схемам, но для объекта с плоскопараллельными границами и без учёта трансформации типа волны при отражении. Опыт работы с алгоритмом M-C-SAFT показывает, что объединённое изображение отражателя надежнее получать как сумму модулей парциальных изображений для разных схем

$$I(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_w) = \sum_{n=1}^{N_{as}} |\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_w; as_n)|. \quad (2)$$

И, наконец, если измерения проведены в режиме тройного сканирования, то объединённое изображение отражателя можно восстановить следующим образом

$$I(\mathbf{r}_i) = \sum_{n=1}^{N_{as}} \left| \sum_w \hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_w; as_n) \right| = \sum_{n=1}^{N_{as}} I(\mathbf{r}_i; as_n). \quad (3)$$

Этот метод можно обозначить как TS-M-C-SAFT, и с его помощью можно получать высококачественные изображения отражателей, обладающие низким уровнем шума и высокой фронтальной разрешающей способностью. Для объединения парциальных изображений

можно воспользоваться не только сложением их модулей, но и иными функциями, например, медианой.

Метод C-SAFT позволяет восстанавливать изображения в плоскости y при совместной обработке эхосигналов измеренных в разных координатах y (Рис. 2). Для подчёркивания этого факта в название метода восстановления будем добавлять аббревиатуру 3D, например, запись 3D-TS-C-SAFT означает совместную обработку эхосигналов для разных координат y при регистрации эхосигналов в режиме тройного сканирования. Такая обработка эхосигналов приводит к тому, что в восстановленном изображении фронтальная разрешающая способность в дополнительной плоскости, то есть вдоль оси y , не будет зависеть от глубины и будет примерно равна размерам элемента антенной решётки вдоль оси y .

1.3 Прореженные антенные решётки

Один из недостатков изображения отражателей, восстановленного методом ПСП, при использовании одноэлементных преобразователей на продольной волне заключается в возникновении ложных бликов большой амплитуды, сформированных импульсами поперечной волны, и сложность представления изображения с учётом отражения импульсов от дна непараллельного поверхности. Применение антенных решёток регистрирующих эхосигналы в режиме двойного сканирования и восстановление изображения методом C-SAFT позволяет уменьшить амплитуду ложных бликов. Этот эффект тем заметнее, чем больше расстояние между первым и последним элементом антенной решетки [11]. Фронтальная разрешающая способность изображения полученного в режиме тройного сканирования будет определяться не сколько размерами уже антенной решётки, а сколько размерами пространственной апертуры A_x (Рис. 3). Сканирование вдоль оси x позволяет сделать шаг между элементами антенной решётки δx много больше, чем длина волны, не увеличивая уровень ложных бликов, сформированных из-за высокого уровня «боковых лепестков» антенной решётки. Антенные решётки с шагом $\delta x \gg \lambda$, где длина волны на частоте f , (Рис. 9) будут называться **прореженными** антенными решётками (ПРАР) [12].

ПРАР можно изготавливать по относительно простым технологиям, применяемым для обычных преобразователей. Но следует отметить важный момент – когерентное сложение парциальных изображений будет эффективным только в случае, если координаты центров элементов (x_w, z_w) известны с точностью меньше чем $\lambda/8$, то есть ошибка фазы при сложении парциальных изображений будет меньше чем $\pi/4$. Процесс определения координат (x_w, z_w) с означенной точностью называется калибровкой ПРАР и рассмотрен в статье [12].

Регистрация эхосигналов с помощью ПРАР для при растровом сканировании (Рис. 1) и восстановление изображения отражателей методом 3D-C-SAFT должны улучшить отношение сигнал/шум и повысить фронтальную разрешающую способность изображения в основной и дополнительной плоскостях.

2 Численные эксперименты

Разработку методики контроля таких сложных объектов как сварное соединение ГЗЗ удобно проводить с использованием программ, моделирующих результаты ультразвукового контроля. Они позволяют понять в какое время, с какой амплитудой и по каким акустическим схемам должны быть зарегистрированы эхосигналы. Поэтому анализ акустической ситуации проводился в численных экспериментах на эхосигналах, рассчитанных с помощью программы CIVA (версия 11a) [7].

2.1 Контроль одноэлементным преобразователем

На Рис. 4 показаны контуры объекта контроля, одноэлементный преобразователь в начальной точке сканирования, четыре плоских отражателя высотой 5 мм пронумерованных от 1 до 4, расположенных по углам сварного соединения и вариант трассировки лучей. Луч, по которому распространяется продольная волна, отмечен на Рис. 4 зелёным цветом, а красный цвет указывает на распространение поперечной волны. Параметры расчётной модели были следующие:

- объект контроля изотропная сталь,
- преобразователь элемент (4.0×12.0) мм, частота 2.5 МГц,
- призма стрела 20.0 мм, пробег 8.0 мм, 18 градусов, плексиглас,
- сканирование по оси x 241 положений через 0.5 мм с -125.0 мм,
- параметры расчёта трансформация волн, одно отражение, без затухания, 2D-режим.

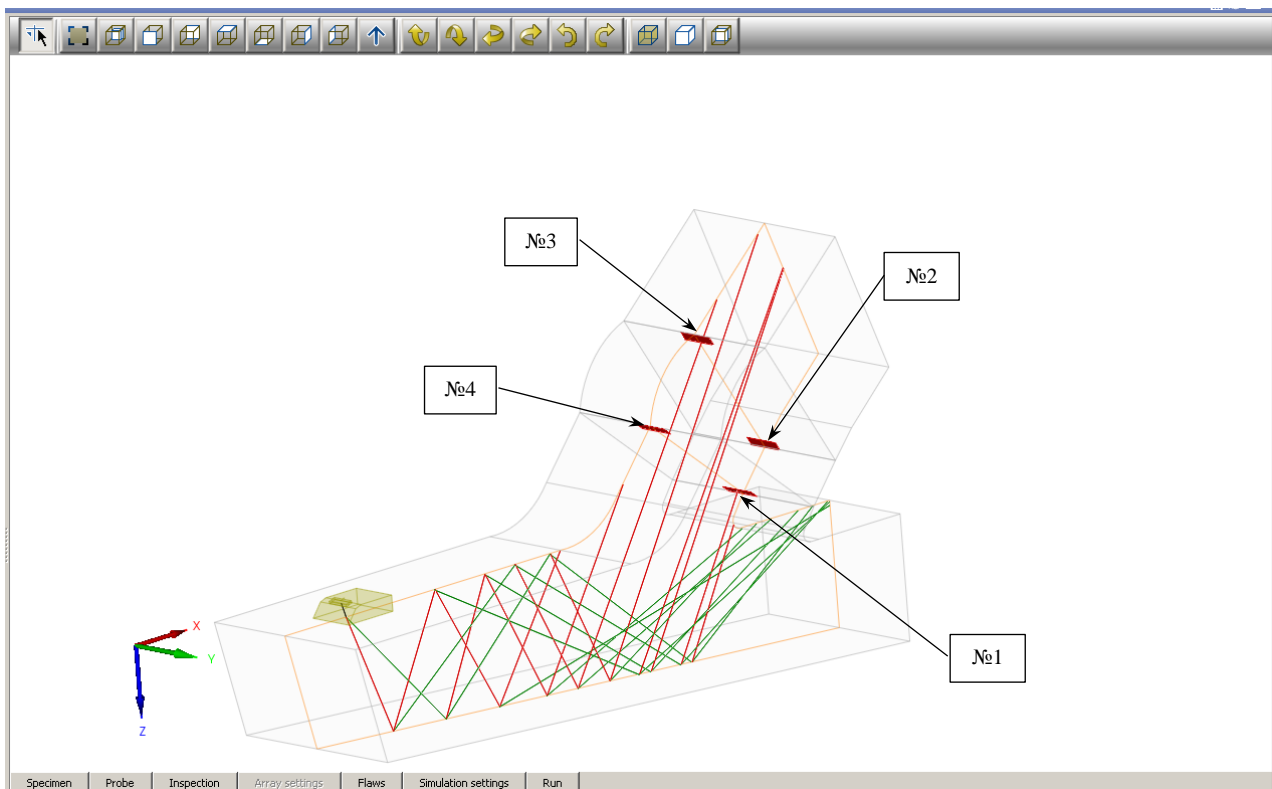


Рис. 4. Схема проведения численного эксперимента

На Рис. 5 слева показано изображение, полученное методом M-SAFT по акустической схеме **LrbLdLrbL**, а справа – по схеме **LrbLdLrbS**. Пиктограмма акустической схемы изображена в левом верхнем углу каждой панели. На обоих изображениях хорошо видны блики отражателей №2 и №4. Блик отражателя №3 практически не виден, а блик отражателя №1 слабо виден на изображении по схеме **LrbLdLrbS**. На каждом изображении имеется множество ложных бликов значимой амплитуды, которые сформированы эхосигналами распространяющимся по акустическим схемам, отличным от схемы, используемой при восстановлении. Например, за бликом от отражателя №4 на Рис. 5 слева, следует блик №4', сформированный по эхосигналам, пришедшим по схеме **LrbLdLrbS**, а ещё дальше вдоль луча отражённого от дна следует блик №4'', сформированный импульсами, распространяющимися по схеме **SrbLdLrbS**. Наличие этих бликов может существенно осложнить анализ изображений и привести к ошибке определения типа и количества отражателей. Ложные блики вне пределов объекта контроля не принимаются во внимание.

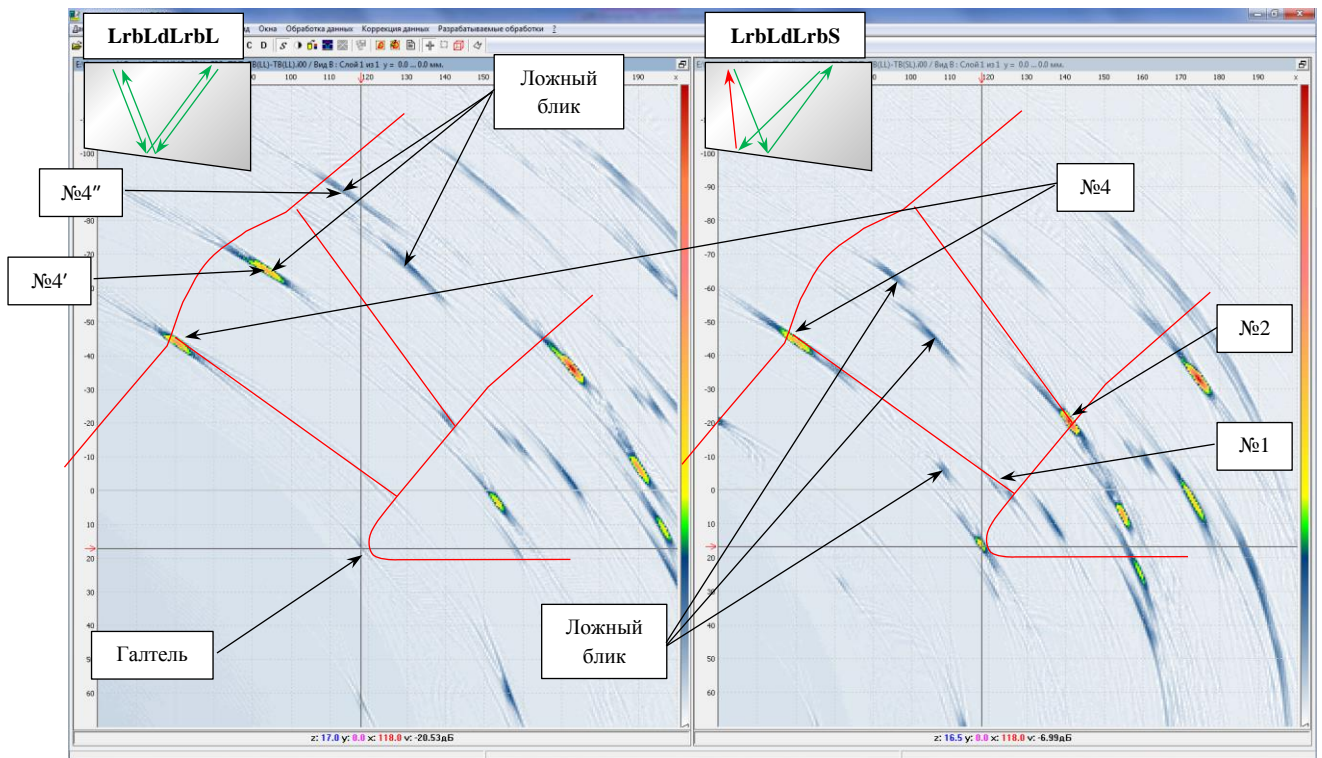


Рис. 5. Парциальные изображения отражателей: слева полученные по акустической схеме **LrbLdLrbL**, справа – по схеме **LrbLdLrbS**

В парциальных изображениях, полученным методом M-SAFT по разным акустическим схемам, блики соответствующие реальным положениям отражателей будут находиться в одних и тех же местах. А ложные блики, как видно на Рис. 5, будут восстанавливаться в разных положениях, что, как указано в разделе 1.2, позволяет объединить парциальные изображения в одно. На Рис. 6 слева показано изображение, полученное как сумма парциальных изображений согласно формуле (3) по списку $L_{as} = \{\mathbf{LrbLdLrbL}, \mathbf{LrbLdLrbS}, \mathbf{LrbLdSrbL}, \mathbf{LrbLdSrbS}, \mathbf{SrbLdLrbS}, \mathbf{SrbLdSrbL}\}$, а справа – как медиана по тому же списку. Перед объединением была проведена операция отсечки всех парциальных изображений по уровню среднего плюс одно значение среднеквадратического отклонения. Объединённое изображение (Рис. 6, справа), полученное как медиана парциальных, содержит фактически один ложных блик небольшой амплитуды, в то время как на суммарном изображении (Рис. 6, слева) ложных бликов заметной амплитуды значительно больше.

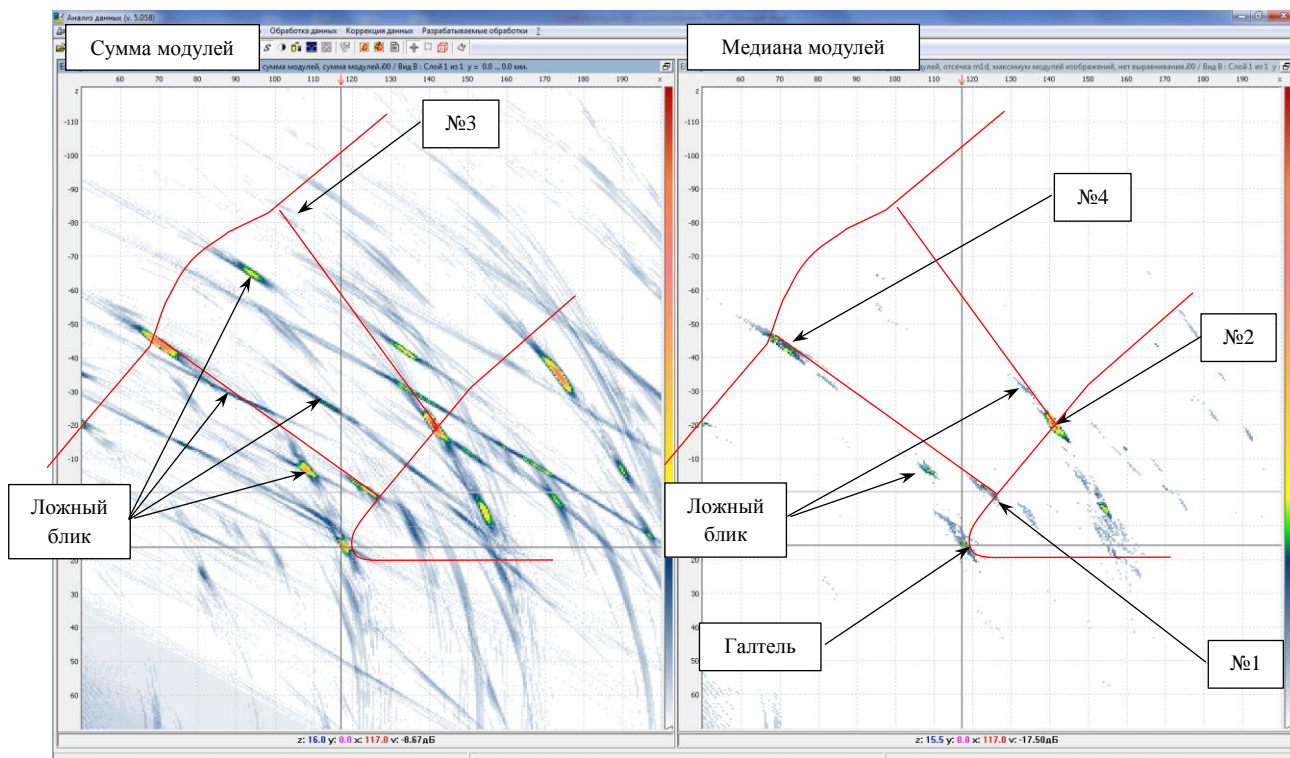


Рис. 6. Объединённое изображение отражателей: слева полученное как сумма модулей парциальных изображений, справа – как медиана

Несмотря на впечатляющий результат (Рис. 6, справа) при использовании операции медианы есть риск потерять блик реального дефекта. Во-первых, этот блик в каждом парциальном изображении может иметь малую амплитуду и после применения операции отсечки он может исчезнуть. Во-вторых, сама операция расчёта медианы может привести к потере блика отражателя, если блик даже с большой амплитудой встречается только в малом числе парциальных изображений. Так на Рис. 6 слева едва видны блики от вершин отражателя №3, а на Рис. 6 справа бликов в этом месте нет вообще. Кроме того сам уровень отсечки, который сильно влияет на результат объединения, выбран без должного обоснования. Поэтому для реального применения метода M-SAFT нужно либо строгое обоснование выбора уровня отсечки, либо необходима проверка эффективности его применения на представительной выборке изображений для конкретного объекта контроля.

2.2 Контроль ПРАР с шагом 7 мм

Второй численный эксперимент проводился в предположении использования ПРАР. Параметры расчётной модели были такими же, что и в разделе 2.1, за исключением следующих:

- преобразователь 8 элементов (3.0×12.0) мм, шаг 7.0 мм, частота 2.5 МГц,
- призма стрела 40.0 мм, пробег 12.0 мм, 18 градусов, плексиглас,
- сканирование по оси x 101 положение через 1.0 мм с -105.0 мм.

На Рис. 7 слева показано изображение, полученное методом TS-M-C-SAFT по акустической схеме **LrbLdLrbL**, а справа – по схеме **LrbLdLrbS**. В сравнении с изображением на Рис. 5, полученном одноэлементным преобразователем, на изображении, полученном с помощью ПРАР, некоторые ложные блики исчезли практически полностью, амплитуда некоторых уменьшилась более чем на 6 дБ.

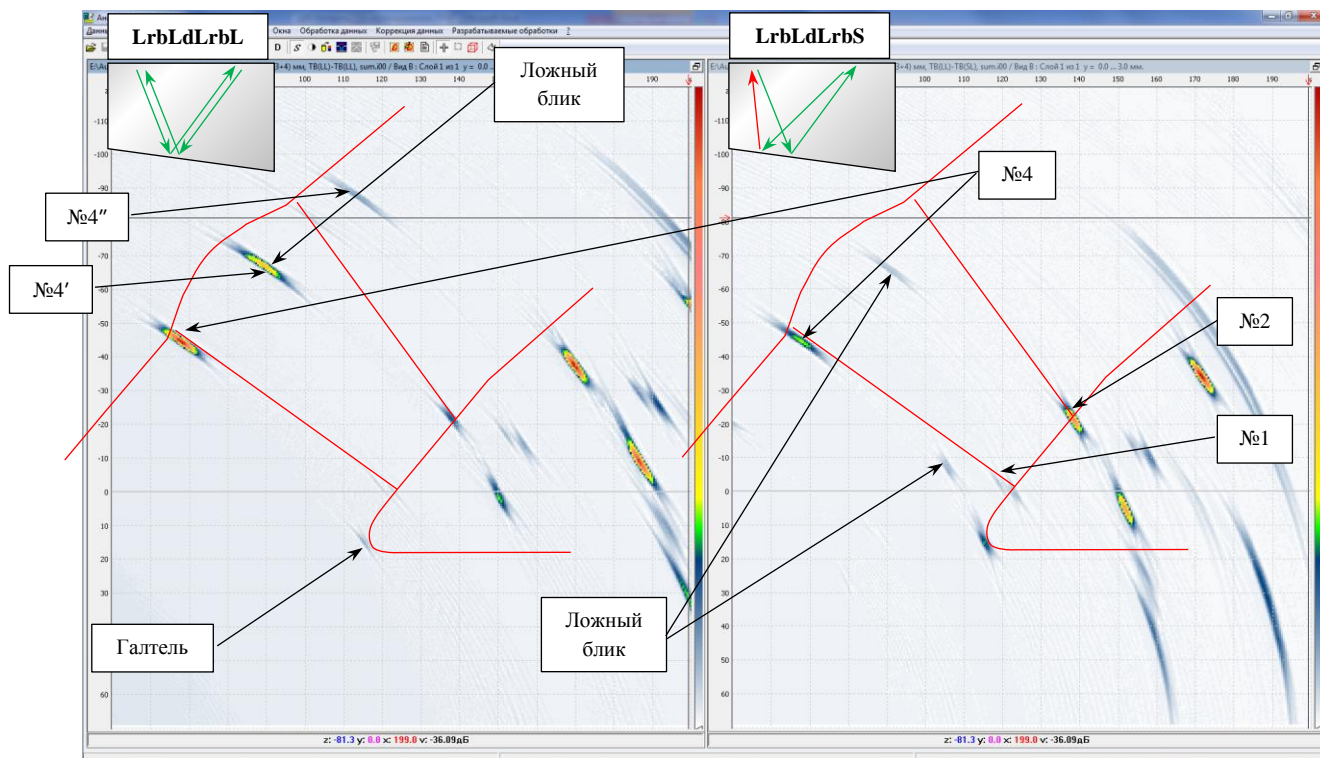


Рис. 7. Парциальные изображения отражателей: слева полученные по акустической схеме **LrbLdLrbL**, справа – по схеме **LrbLdLrbS**

На Рис. 8 слева получено изображение как сумма парциальных изображений согласно формуле (3) по списку L_{as} , а справа – как медиана по тому же списку. Перед объединением была проведена операция отсечки всех парциальных изображений по уровню среднего плюс одно значение среднеквадратического отклонения. Объединённое изображение, полученное как медиана парциальных, фактически не содержит ложных бликов, но и бликов от отражателя №4 на этом изображении нет.

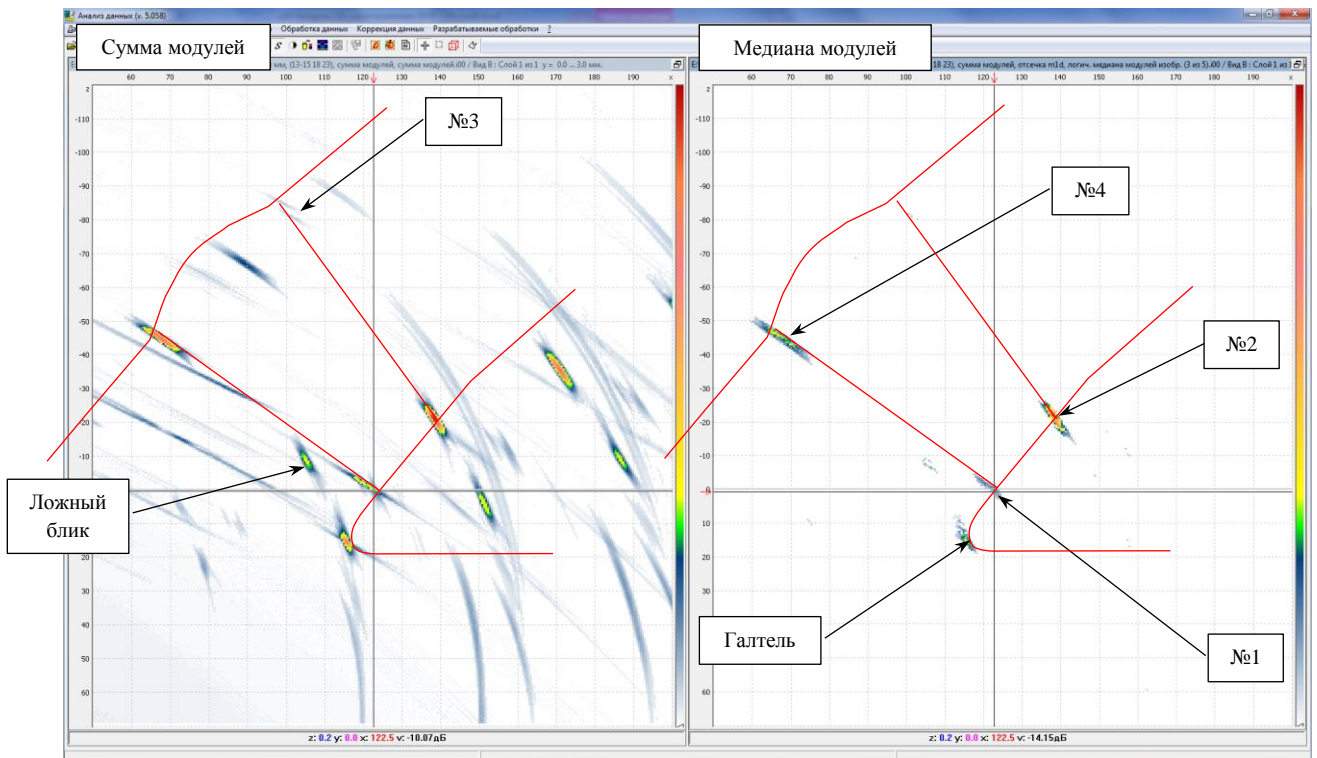


Рис. 8. Объединённое изображение отражателей: слева полученное как сумма модулей парциальных изображений, справа – как медиана

Как упоминалось ранее, чем больше пространственная апертура ПРАР, тем меньше амплитуда ложных бликов. Проведённое моделирование с использованием ПРАР с шагом 11 мм показало незначительное улучшение качества изображений.

3 Модельный эксперимент

Для проведения модельных экспериментов была изготовлена прорезанная антенная решётка типа 6L1.8H45 с шестью элементами ($N_e = 6$, $\delta x \approx 5.5$ мм) для работы на частоте 1.8 МГц, эскиз которой представлен на Рис. 9. Каждый элемент размерами 4×12 мм имеет в плоскости xz диаграмму направленности шириной более 50 градусов по уровню 0.1 с углом ввода 45 градусов на продольной волне.

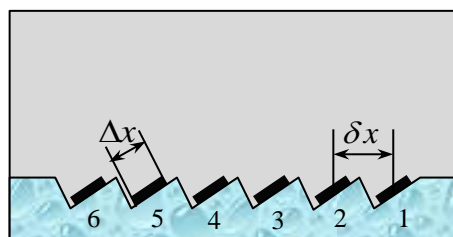


Рис. 9. Эскиз шестиэлементной прорезанной антенной решётки типа 6L1.8H45

Запись типа (1→2) будет означать, что эхосигналы измерялись при излучении импульса первым элементом и приёме эхосигнала вторым элементом ПРАР. Набор эхосигналов (1→1), (1→2) и так далее до (1→6) будет называться выстрелом первого элемента, и будет обозначаться как (1:6). Так как элементы идеальной ПРАР находятся на одной глубине, то эхосигналы (1→1) при сканировании вдоль оси x , с точностью до шумовой составляющей будут практически совпадать с эхосигналами (2→2), (3→3) ... (6→6). Аналогичное утверждение справедливо для набора эхосигналов (1→2), (2→3) ... (5→6), для набора (1→3), (2→4) ... (4→6) и так далее. То есть, независимыми будут эхосигналы только одного выстрела.

Эхосигналы измерялись при сканировании ПРАР по поверхности образца с использованием системы АВГУР 5.2. Область сканирования схематически показана на Рис. 2 стрелками желтого цвета. Количество отсчётов и шаг вдоль воль оси x были равны 303 и 0.395 мм, а вдоль оси y – 61 и 3.986 мм. Все эхосигналы были пропущены через фильтр с полосой пропускания от 1.0 до 3.0 МГц. Для повышения отношения сигнал/шум использовалась трёхмерная обработка эхосигналов 3D-M-SAFT [12].

На Рис. 10 слева показано парциальное изображение, восстановленное в режиме 3D-M-SAFT по акустической схеме **LrbLdLrbL**, по эхосигналам, измеренным в режиме (1→2), а справа изображение, полученное как когерентная сумма парциальных изображений по эхосигналам выстрела первого элемента (далее (1:6)-изображение). Пиктограмма акустической схемы изображена в левом верхнем углу левой панели. На объединённое изображение наброшена маска. В аббревиатуре 3D_5 цифра 5 означает, что при формировании изображения в одном слое y использовались эхосигналы из пяти слоёв слева и справа по оси y , то есть в формировании изображения участвуют эхосигналы из интервала по оси y ± 20 мм. 2D-обработка предполагает использование эхосигналов только из одного слоя по оси y . Изображения В-типа представлены как максимумы всех изображений вдоль оси y . На (1:6)-изображении, уровень шума которого принципиально меньше шума парциального изображения (1→2), хорошо видны блики отверстий боковых сверлений, отмеченных как №4, №5 и №6 на Рис. 3. Смещение блика отверстия №5 объясняется значительной не параллельностью осей отверстий №4 и №5. Блик паза №2 на объединённом изображении виден с отношением сигнал/шум более чем 6 дБ, в то время как на парциальном изображении отношение сигнал/шум равно примерно 0 дБ. Блик паза №3, сформированный эхосигналами по акустической схеме **LrbSdSrbL**, расфокусирован и находится не в нужном месте, но, тем не менее, имеет очень большую амплитуду. Блики отражателей №1 и №7 обнаружить не удалось. Отметим, что, как было выяснено в разделе 2, за каждым правильным

бликом следует два или три ложных блика, сформированных по акустическим схемам отличным от **LrbLdLrbL**. Примером тому может служить последовательность бликов от отверстия бокового сверления №6 - блик №6' (акустическая схема **LrbLdLrbS**) и блик №6'' (акустическая схема **SrbLdLrbS**). Такие ложные блики, как отмечалось в разделе 2.1, с одной стороны осложняют анализ изображений, но с другой стороны дают дополнительную информацию об отражателях, которой нужно эффективно воспользоваться.

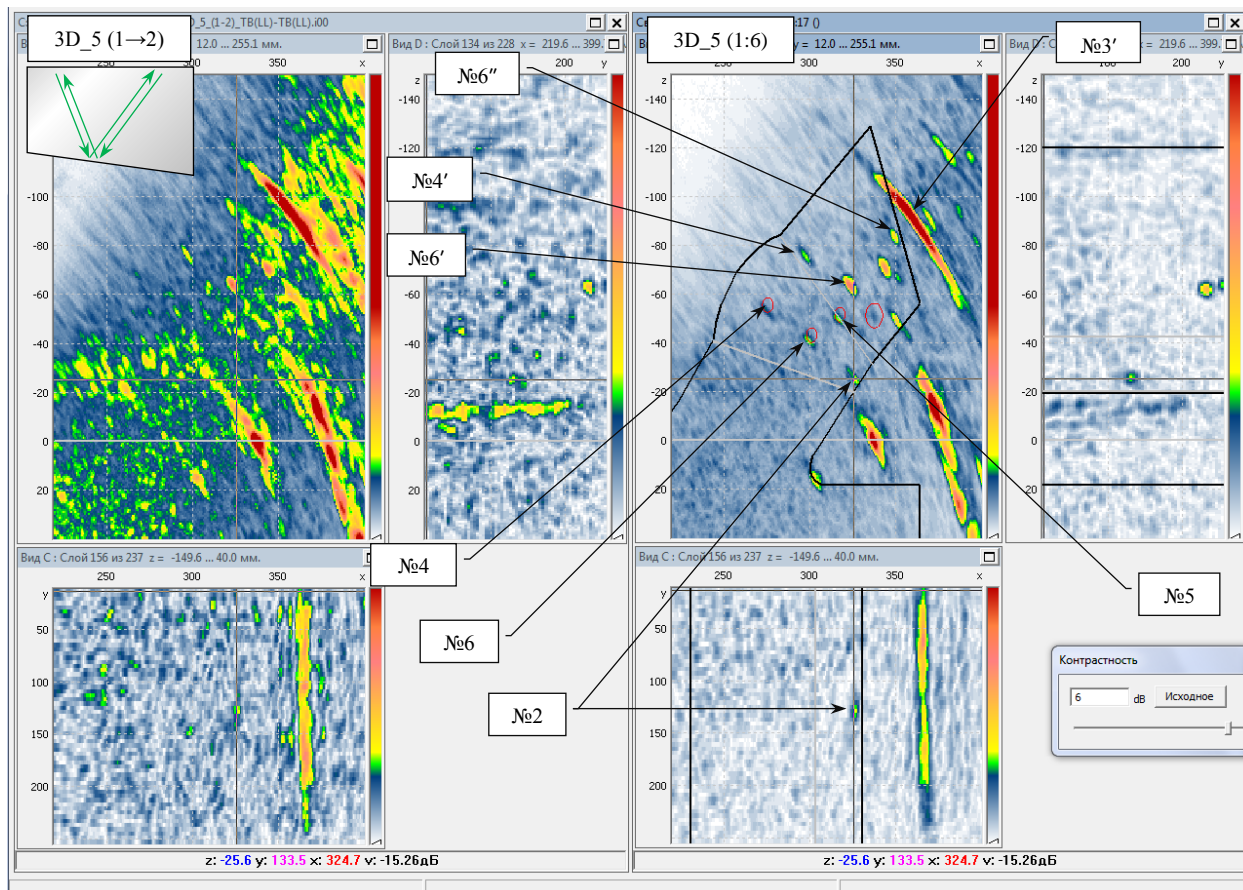


Рис. 10. Изображения отражателей, восстановленные методом 3D-SAFT по акустической схеме **LrbLdLrbL**. Слева одно парциальное изображение (1→2), справа – когерентная сумма парциальных изображений первого выстрела

На Рис. 11 показано (1:6)-изображение, полученное по схеме **LrbLdLrbL** восстановленное в режиме 2D. Изображения В-типа представлены как максимумы всех изображений вдоль оси y . Его качество, оцениваемое по уровню шума, в сравнении с объединённым изображением, восстановленным в режиме 3D (Рис. 10, справа) значительно хуже. Если сравнивать изображения на Рис. 11 и на Рис. 10 слева, то можно сделать вывод, что для уменьшения уровня шума лучше 2D-обработка эхосигналов первого выстрела, нежели 3D-обработка эхосигналов, измеренных в режиме (1→2). Очевидно, что только (1:6)-изображение, восстановленное в режиме 3D₅, наиболее пригодно к анализу.

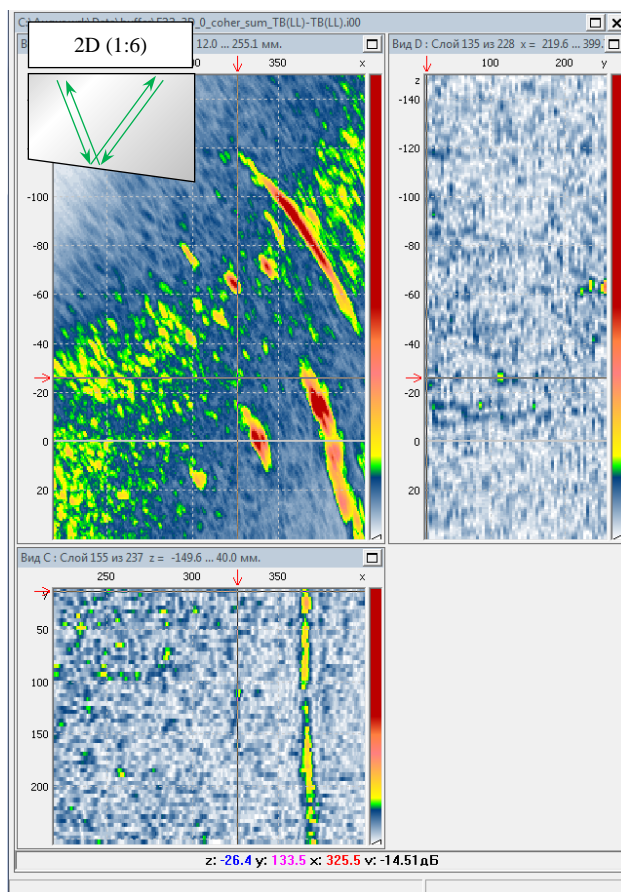


Рис. 11. Объединённое изображение отражателей, восстановленное методом 2D-SAFT по акустической схеме **LrbLdLrbL**

На Рис. 12 слева показано (1:6)-изображение, полученное по акустической схеме **LrbLdLrbS**, а справа – (1:6)-изображение по схеме **LrbLdSrbL**. На изображения наброшена маска образца, а изображения В-типа представлены как максимумы всех изображений вдоль оси y . Пиктограмма акустической схемы изображена в левом верхнем углу каждой панели. На изображении, полученном по схеме **LrbLdLrbS**, хорошо видны блики отверстий боковых сверлений №4, №5 и №6. Причём амплитуда этих бликов больше чем на изображении, восстановленном по схеме **LrbLdLrbL** (Рис. 10, справа). Блик паза №2 на изображении виден с отношением сигнал/шум более чем 6 дБ. Расфокусированный блик паза №3 снова очень хорошо виден, но находится в неправильных координатах и расфокусирован. Блики паза №1 и отверстия №7 на представленном изображении не видны. На изображении, восстановленном по схеме **LrbLdSrbL** кроме блика галтели и, возможно, угла образца не удалось обнаружить ни одного блика заложенных отражателей. Полагаю, что малая эффективность этой акустической схемы объясняется тем, что она предполагает, что при отражении от несплошностей распространяется поперечная волна, которая сильно затухает в сварном соединении.

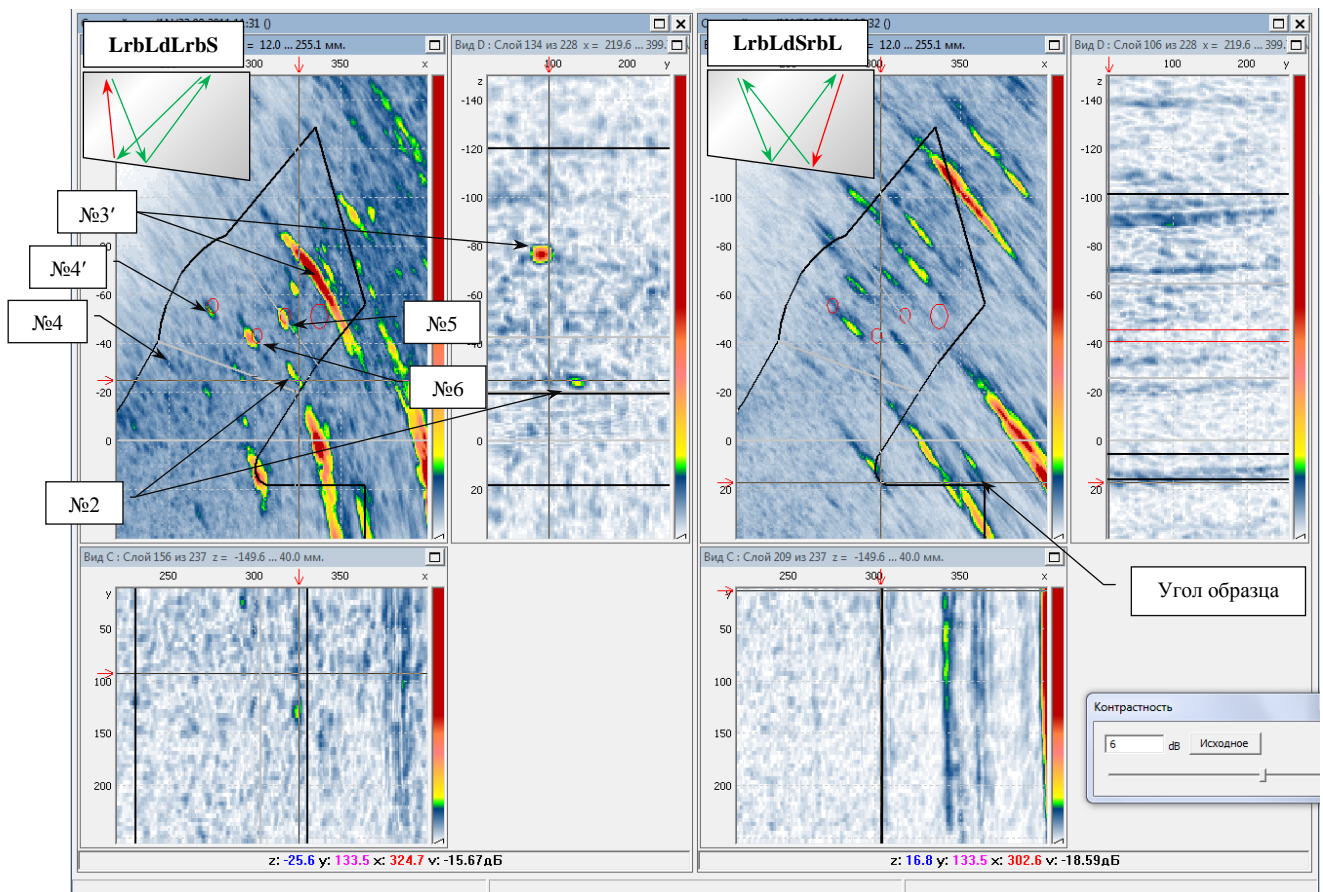


Рис. 12. Изображения отражателей, восстановленные методом 3D-SAFT по акустическим схемам: слева – **LrbLdLrbS**, справа – **LrbLdSrbL**

На Рис. 13 слева показано (1:6)-изображение, полученное по акустической схеме **LrbLdSrbS**, справа – по акустической схеме **LrbSdSrbL**. Изображения В-типа представлены как максимумы всех изображений вдоль оси y . Пиктограмма акустической схемы изображена в левом верхнем углу каждой панели. Акустическая схема **LrbLdSrbS** мало информативна по той же причине что и акустическая схема **LrbLdSrbL**. Блик паза №2 довольно слабо виден с превышением шума примерно на 3 дБ, а блики остальных отражателей в сварном шве и за ним обнаружить не удаётся. На изображении, восстановленном по схеме **LrbSdSrbL**, блик паза №3 виден в правильных координатах и с превышением уровня шума – более чем на 30 дБ. Остальные отражатели в сварном шве и за ним обнаружить не удаётся. Акустическая схема **LrbSdSrbL** может оказаться полезной для контроля области шва отмеченной розовым эллипсом.

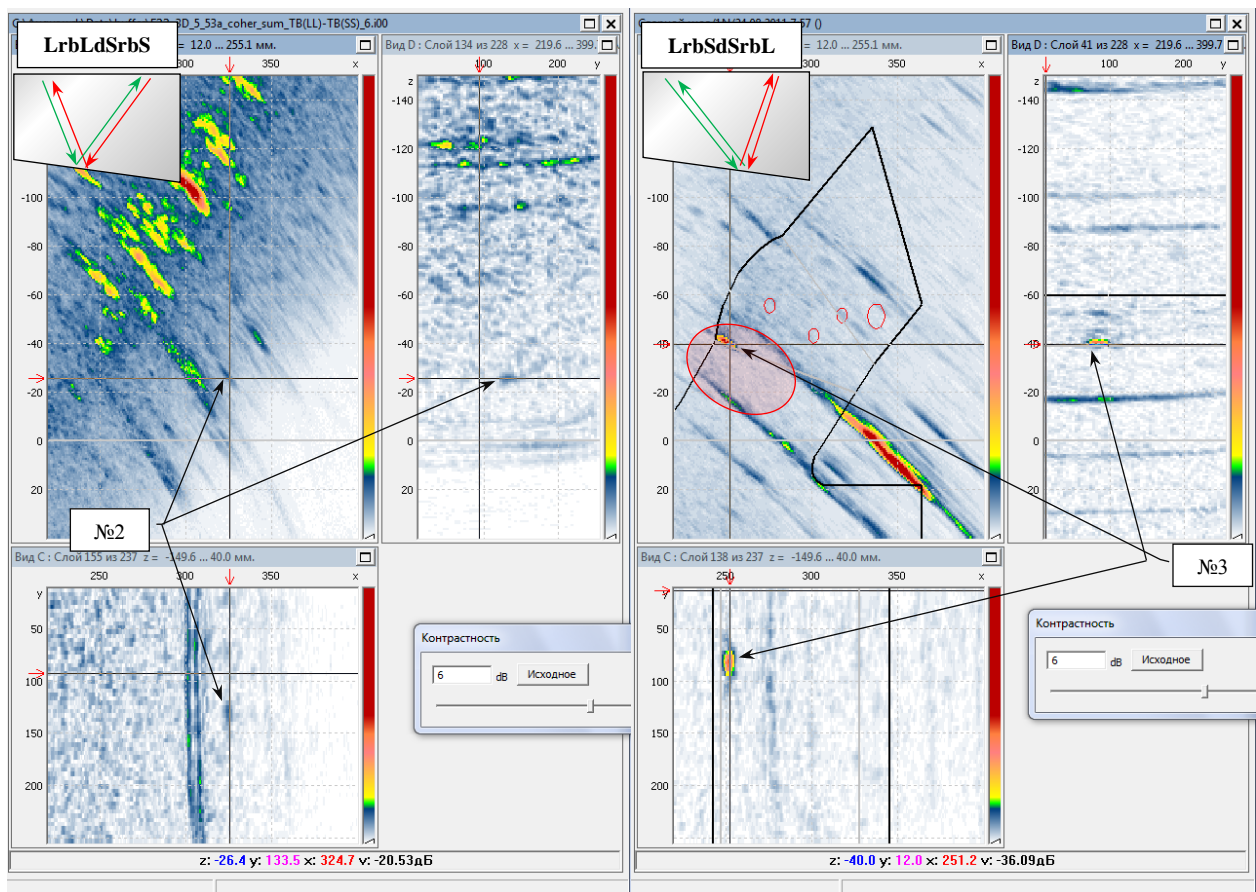


Рис. 13. Изображения отражателей, восстановленные методом 3D-SAFT по акустическим схемам: слева – **LrbLdSrbS**, справа – **LrbSdSrbL**

На Рис. 14 слева показано (1:6)-изображение, восстановленное по акустической схеме **LrbSdLrbS**, справа – по схеме **SrbLdLrbS**. Изображения В-типа представлены как максимумы всех изображений вдоль оси y . Пиктограмма акустической схемы изображена в левом верхнем углу каждой панели. На изображении слева амплитуда блика паз №1 превышает уровень шума примерно на 3 дБ. Акустическая схема **LrbSdLrbS** единственная, на которой удалось обнаружить паз №1. Блики остальных отражателей обнаружить не удаётся. На изображении, восстановленном по акустической схеме **SrbLdLrbS**, видны только блики паза №2 и отверстия бокового сверления №5 и №6. Не виден и «неуловимый» блик отверстия бокового сверления №7. Как и на всех рассмотренных ранее схемах виден блик галтели и, возможно, угол образца. Эта схема может оказаться полезной для контроля области шва отмеченной розовым эллипсом.

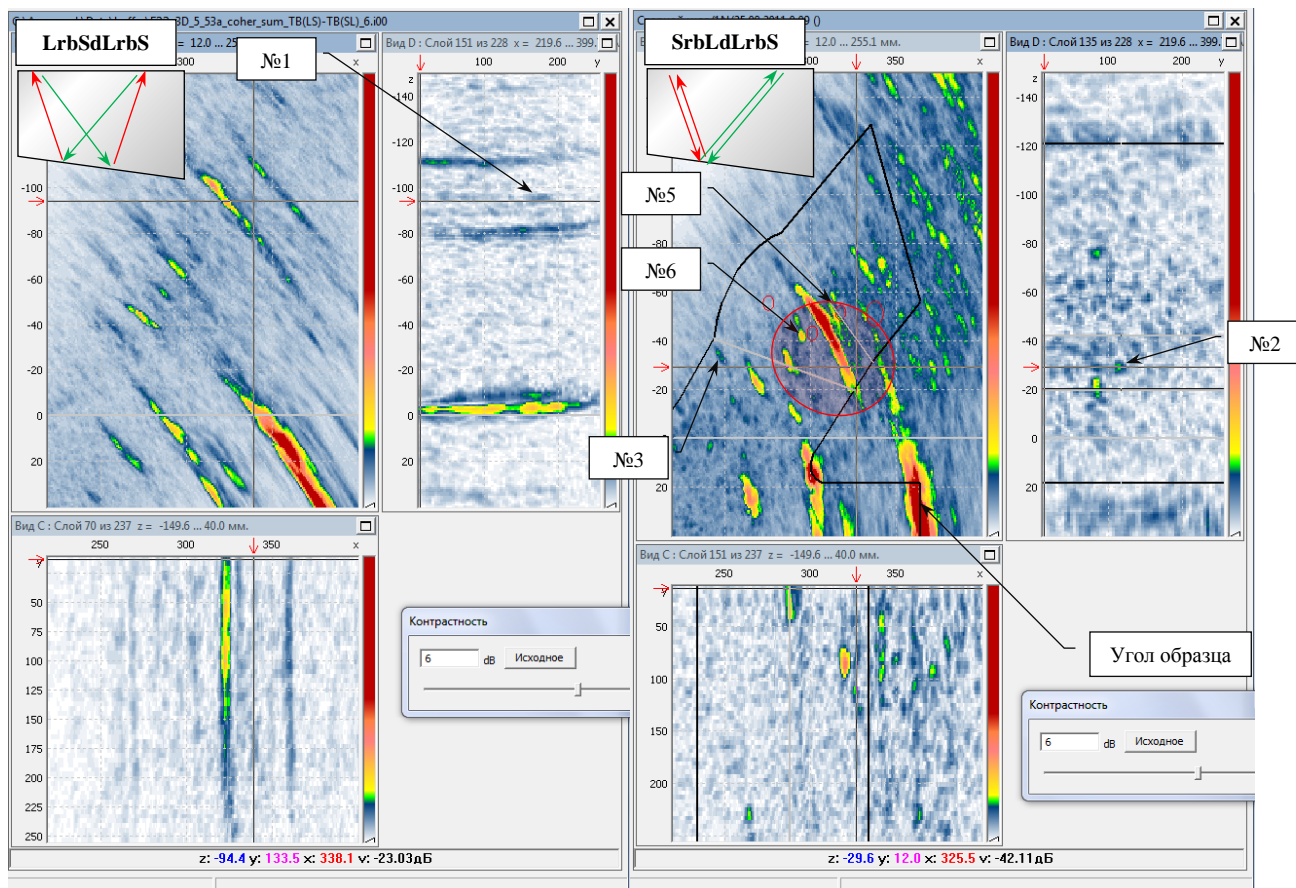


Рис. 14. Изображения отражателей, восстановленные методом 3D-SAFT по акустическим схемам: слева – **LrbSdLrbS**, справа – **SrbLdLrbS**

В Табл. 1 сведены данные по обнаружению отражателей в зависимости от используемой при восстановлении акустической схемы. Принимались во внимание только блики с координатами, совпадающими с реальным положением отражателей. Оценка «0» выставлялась, если блик отражателя обнаружить не удалось, «1» – для отношения сигнал/шум около 3 дБ, «2» – для отношения сигнал/шум около 6 дБ, «3» – для отношения сигнал/шум больше 12 дБ. Если на объемном отражателе происходит смена типа волны, то излучение в обратном направлении будет очень слабым, что приводит к очень малым амплитудам бликов отверстий бокового сверления (строки 3, 4 и 6 в Табл. 1).

Табл. 1. Таблица обнаружения отражателей в местах их истинного расположения

		Паз			Отверстие бокового сверления			
		№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
1.	LrbLdLrbL	0	2	0	1	2	2	0
2.	LrbLdLrbS	0	2	0	2	3	3	0
3.	LrbLdSrbL	0	0	0	0	0	0	0

4.	LrbLdSrbS	0	1	0	0	0	0	0
5.	LrbSdSrbL	0	0	3	0	0	0	0
6.	LrbSdLrbS	1	0	0	0	0	0	0
7.	SrbLdLrbS	0	1	0	0	2	2	0

На Рис. 15 слева показано изображение, полученное как сумма парциальных изображений согласно формуле (3) по списку $L_{as} = \{\text{LrbLdLrbL}, \text{LrbLdLrbS}, \text{SrbLdLrbS}, \text{LrbSdSrbL}\}$, а справа – как медиана по тому же списку. Перед объединением операция отсечки не проводилась. Изображения В-типа представлены как максимумы всех изображений вдоль оси y . Изображение, объединённое как сумма модулей, не позволяет извлечь дополнительную информацию об отражателях (Рис. 15, слева), так как парциальное изображение по схеме **SrbLdLrbS** (Рис. 14, справа) имеет самую большую амплитуду. Зато, глядя на Рис. 15 справа, можно уверено, то есть с отношением сигнал/шум более 12 дБ, обнаружить все отражатели за исключением паза №1 в дальней границе сварного соединения и отверстия бокового сверления №7 в замыкающей полусфере. Ложные блики появляются в области замыкающей полусферы, контролировать которую со стороны патрубка весьма затруднительно.

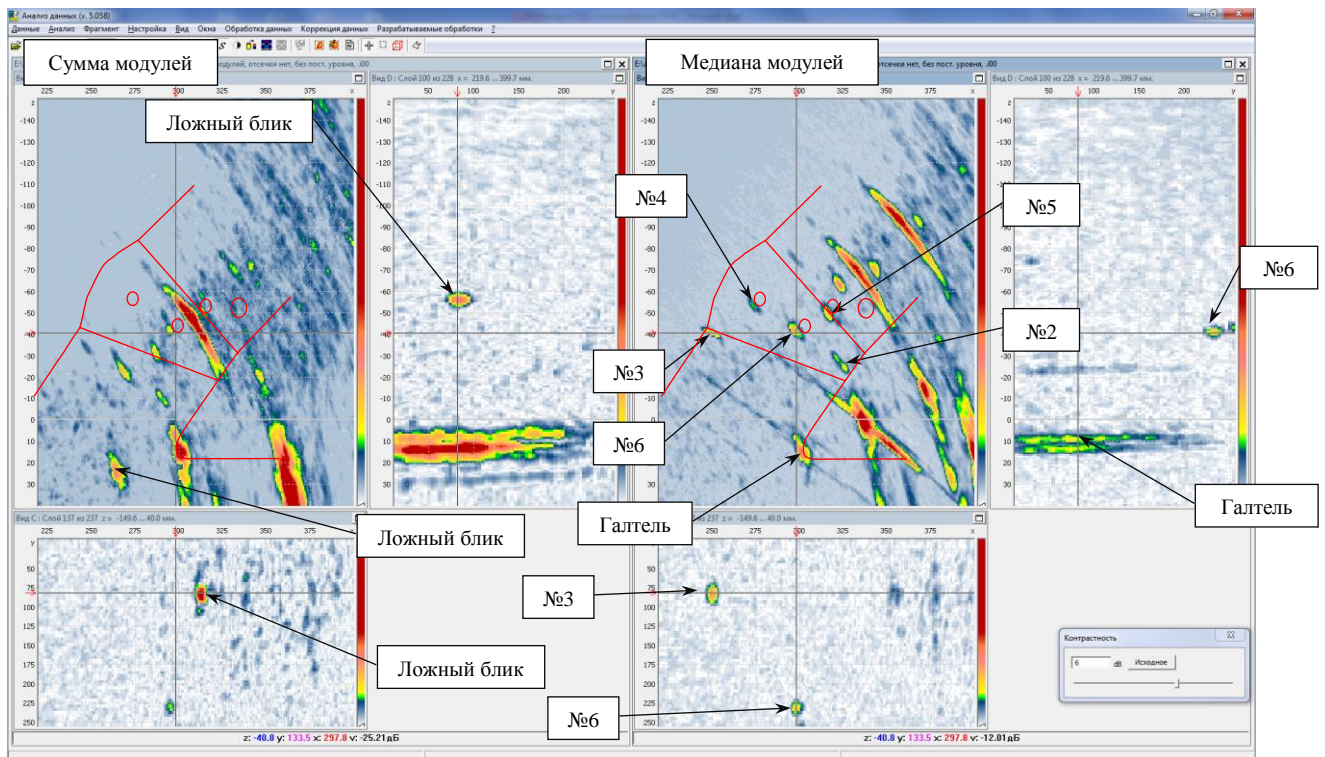


Рис. 15. Объединённое изображение отражателей: слева полученное как сумма модулей парциальных изображений, справа – как медиана

4 Выводы

Таким образом, по результатам исследований изложенных в данной статье, можно сделать следующие выводы:

- Применение ПРАР для регистрации эхосигналов и восстановление изображения методом 3D-C-SAFT позволило более чем на 12 дБ повысить отношение сигнал/шум в сравнении с изображением, полученным одноэлементным преобразователем.
- Практически каждый отражатель представлен тремя бликами, сформированными эхосигналами, распространяющимися по траекториям следующих акустических схем **LrbLdLrbL**, **LrbLdLrbS** и **SrbLdLrbS**. Поэтому на изображениях, восстановленных на этих схемах, появятся два ложных блика, что затруднит анализ изображения.
- Объединение как медиана модулей изображений восстановленных по списку $L_{as} = \{LrbLdLrbL, LrbLdLrbS, SrbLdLrbS, LrbSdSrbL\}$ позволило получить изображение с малым количеством ложных бликов.
- Пять из семи заложенных искусственных отражателей удалось уверенно обнаружить. Паз №1 удалось обнаружить по акустической схеме **LrbSdLrbS**. Отверстие бокового сверления №7 не удалось обнаружить ни по одной акустической схеме. По-видимому, это связано с тем, что замыкающая полусфера литая деталь, имеющее высокое затухание.
- Для эффективной работы метода M-C-SAFT по схемам с отражением от дна нужно знать привязку апертуры сканирования A_x к дну патрубка. В противном случае блики отражателей будут смещены от своих истинных положений. Причём для разных акустических схем смещение будет разным, и получить объединённое изображение с ложными бликами малой амплитуды, не удастся. С целью привязки к координатам наклонного дна можно воспользоваться изображением дна патрубка, восстановленным по схеме **LrbL**.

Базулин Евгений Геннадиевич

Начальник научно-методического отдела, доктор технических наук

Россия, Москва, 123612, Пятницкое шоссе, д. 37, кв. 476,

тел. +7 (495) 780-92-48 (р.), +7 (495) 752-31-47 (д.)

30 марта 2015 года

5 Список литературы

1. Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Гордеев Ю.Л., Костылов А.Г., Тихонов Д.С., Штерн А.М. Мобильные измерительные системы автоматизированного ультразвукового контроля серии АВГУР // В мире неразрушающего контроля, 2010, №1(47), С. 16-23.
2. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г. Цифровое восстановление изображения рассеивателей методом проекции в спектральном пространстве. - Акустический журнал, 1988, XXXIV, № 2, с. 222-231.
3. Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Коколев С.А., Ромашкин С.В., Тихонов Д.С. Применение трехмерной когерентной обработки в ультразвуковом контроле // Дефектоскопия. 2014. №2. С. 46-65. DOI: 10.1134/S1061830914020028
4. Дефектоскоп А1550 IntroVisor, <http://www.acsys.ru/production/detail/a1550-introvisor/> (дата обращения: 27.03.2015)
5. 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.
6. Jobst M., Connolly G.D Demonstration of the Application of the Total Focusing Method to the Inspection of Steel Welds. - 10th European Conference on Non-Destructive Testing, Moscow, 2010, June 07-11.
7. Сайт фирмы EXTENDE. URL: <http://www.extende.com/> (дата обращения: 27.03.2015).
8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
9. Базулин Е.Г. О возможности использования в ультразвуковом неразрушающем контроле метода максимальной энтропии для повышения разрешающей способности изображения по эхосигналам // Акуст. журн.. 2013. №2. С. 235-254. DOI: 10.1134/S1063771013020024.
10. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Возможности оценки характера несплошности металла ультразвуковым томографом с цифровой фокусировкой антенной решетки // Контроль. Диагностика. 2011. №10. С. 63-70.
11. Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Повышение достоверности ультразвукового контроля. Часть 2. Повышение отношения сигнал/шум // Контроль. Диагностика. 2015, № 7. (принята к печати).
12. Базулин Е.Г., Коколев С.А. Повышение отношения сигнал/шум при проведении ультразвукового контроля ремонтных заварок с использованием технологии прореженных антенных решёток // Дефектоскопия, 2013, №5, С. 45-58. DOI: 10.1134/S1061830913050021