

УДК 534.8+620

PACS: 43.60.+d

Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решётки или фазированные антенные решётки

Базулин Е.Г.

ООО «Научно-производственный центр «Эхо+»

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

E-mail: bazulin@echoplus.ru

В статье рассмотрены особенности формирования изображения отражателей при использовании технологии фазированных антенных решёток и изображений, полученных методом C-SAFT по эхосигналам, измеренным в режиме двойного сканирования. Показано, что в некоторых случаях изображения, полученные по технологии фазированных антенных решёток менее информативны. В то время как изображения, полученные методом C-SAFT, имеют более высокое фронтальное разрешение во всей области восстановления изображения, парциальные изображения, восстановленные при разных положениях антенной решётки можно когерентно складывать, что позволяет получить высокое и однородное разрешение во всём объеме толстостенных изделий и увеличить отношение сигнал/шум. Регистрация эхосигналов в режиме двойного сканирования и восстановление изображения отражателей методом C-SAFT для краткости будем называть цифровой фокусировкой антенной решёткой (ЦФА). Возможность по единожды измеренным эхосигналам восстанавливать парциальные изображения отражателей по многим акустическим схемам с последующим их объединением в одно высококачественное изображение, должна позволить надёжно автоматизировать процесс распознавания и измеривания рассеивателей. Ещё одно достоинство изображений, полученных методом C-SAFT с трёхмерной фокусировкой, это возможность восстанавливать изображения в единой системе координат при использовании антенных решёток на призмах разной конфигурации. Это облегчает совместный анализ изображений. Скорости формирования изображений по технологии фазированных антенных решёток и изображений, полученных методом C-SAFT, соизмеримы. Если методика контроля основана на использовании нелинейных эффектов, то в этом случае ФАР-дефектоскопы имеют неоспоримое преимущество перед ЦФА-дефектоскопами. Но в рамках линейной акустики у ФАР-дефектоскопов нет принципиальных преимуществ перед ЦФА-дефектоскопами. Справедливее сказать, что у ФАР-дефектоскопов есть недостатки. В статье приведены изображения иллюстрирующие особенности изображений, полученных ФАР- и ЦФА-дефектоскопами.

Ключевые слова: ультразвуковой неразрушающий контроль, антенные решётки, антенные матрицы, цифровая фокусировка антенной (ЦФА), C-SAFT, TFM, двойное сканирование, FMC, тройное сканирование, фокусирующая антенная решётка (ФАР).

1. Введение

Активная разработка радиолокационных станций в 50 и 60-ых годах прошлого века [1], как размещённых на борту летательных аппаратов, так и наземных стационарных систем, например, типа «Дон» привела к созданию многоканальной аппаратуры для управления антенными решётками и матрицами. Естественное развитие подобных технологий привело к созданию в 80-ых годах прошлого века ультразвуковой медицинской диагностической аппаратуры [2], и, несколько позже, в начале XXI века, приборов для ультразвукового неразрушающего контроля на основе применения антенных решёток (АР) или антенных матриц (АМ). Этому способствовало совершенствование технологий изготовления ультразвуковых антенных решёток (матриц) и многоканальных систем для излучения и приёма ультразвука.

Являясь коммерческим продуктом, дефектоскопы, использующие технологию фазированных антенных решёток (ФАР-дефектоскопы), активно рекламируются. При этом, естественно, делается акцент только на их положительных свойствах, что может создать излишне радужное впечатление. Такую ситуацию Гурвич А.К. охарактеризовал следующим образом [3]: «Дефектоскопы с ПЭП на фазированной антенной решётке завораживают обывателей и даже некоторых специалистов своим непрерывно качающимся лучом в сопровождении причитаний экспонентов-«шаманов».

В данной статье сделана попытка проанализировать сильные и слабые стороны ФАР-дефектоскопов и сравнить их с альтернативными системами получения высококачественных изображений дефектов, также использующих АР или АМ, но без аппаратной фокусировки.

1.1. Принцип работы ФАР-дефектоскопа

Принцип работы ФАР-дефектоскопа рассмотрен в книге [4], поэтому в здесь приведено только его конспективное изложение. Под ФАР-дефектоскопом будем подразумевать антенную решётку или матрицу, работающую с многоканальной аппаратурой излучения и приёма ультразвуковых импульсов с регулировкой задержек при излучении и приёме. Многоканальность аппаратуры излучения и приёма является принципиальным требованием работы ФАР-дефектоскопа!

Перед проведением контроля оператор задаёт тип фокусировки, по которому для конкретной АР или АМ, призмы и объекта контроля рассчитываются задержки при излучении и приёме в заданном диапазоне углов. После процедуры расчёта задержек, которая может длиться несколько секунд, ФАР-дефектоскоп начинает формировать секторное изображение отражателей (изображение S-типа), либо с некоторым периодом, либо по сигналам с датчика положения. Применяемый дефектоскоп должен обеспечить тип фокусировки согласно требованиям утверждённой методики. Оператор делает заключение о размерах и типе обнаруженного отражателя не по одному эхосигналу, как в традиционной дефектоскопии, а по двумерному растровому изображению S-типа, которое значительно информативнее. Тем не менее, ФАР-дефектоскопы имеют ряд недостатков [5], из которых самый существенный, заключается в ухудшении разрешающей способности при удалении от линии фокусировки. Причём увеличение апертуры антенной решётки или матрицы приводит к парадоксальной ситуации - с одной стороны к повышению качества изображения в области фокусировки, а с другой стороны, к уменьшению размеров этой зоны. Такая особенность формирования изображения особенно заметна при контроле толстостенных изделий антенными решётками с количеством элементов больше чем 32 [6]. Для устранения этого недостатка некоторые ФАР-дефектоскопы способны работать в режиме динамической фокусировки [7]. В этом режиме излучение происходит при фокусировке по одному закону, а принятые эхосигналы обрабатываются несколько раз с использованием законов фокусировки для нескольких глубин. Однако такой режим замедляет скорость формирования изображения отражателей и не позволяет достичь предельной фокусировки, так как при излучении поле всё равно фокусируется на одну глубину.

1.2. Принцип получения изображения антенной решёткой

Альтернативный способ восстановления изображения отражателей при использовании антенных решёток или антенных матриц состоит из двух этапов. На первом этапе регистрируются эхосигналы, излученные и принятые всеми парами элементов АР или АМ. Такой режим регистрации будем называть **режимом двойного сканирования** [8]. В статье [9] регистрация эхосигналов методом двойного сканирования называется **Full Matrix Capture (FMC)**, а в статье [11] – **Sampling Phased Array**. На втором этапе по измеренным эхосигналам восстанавливаются изображения отражателей. Так как размеры элементов АР или АМ соизмеримы с длиной волны, то это обеспечивает широкую диаграмму направленности [10] каждого элемента и позволяет регистрировать большое количество импульсов на продольных и поперечных волнах, отражённых от границ объекта контроля и от отражателя. Реги-

страция эхосигналов движущейся антенной, работающей в режиме двойного сканирования, логично назвать **режимом тройного сканирования**.

Один из алгоритмов, который позволяет обработать этот богатейший объем информации – метод **комбинированного SAFT (C-SAFT)** [11, 12], который легко модифицируется для учёта многолучевого распространения ультразвука в объекте контроля с неровными границами, как для случая применения AP, так и для случая применения AM [13]. В зарубежной литературе алгоритм C-SAFT называется **Total Focusing Method (TFM)** [9]. С его помощью восстанавливаются изображения, на которых блики, соответствующие отражателям, не смещены по осям x и y и имеют предельно высокую фокусировку по всей области восстановления изображения (ОВИ). ОВИ, как правило, выбирают в виде прямоугольной сетки, хотя алгоритм восстановления изображения C-SAFT может работать на любой сетке в трёхмерном пространстве.

Авторы статьи [5] регистрацию эхосигналов в режиме двойного сканирования и получение изображения методом C-SAFT предлагают называть цифровой фокусировкой антенной решётки (ЦФА), поэтому дефектоскоп, работающий в режиме ЦФА, далее будем называть ЦФА-дефектоскопом, а изображение полученное таким дефектоскопом – ЦФА-изображением.

1.3. Описание акустических схем

Под акустической схемой будем подразумевать тип траектории лучей с учётом отражения ультразвуковых импульсов от дна и поверхности объекта контроля при излучении и приёме. Для описания акустических схем 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)-TB(T(SSS))** описывает ситуацию, когда при излучении анализируются лучи однократно отраженные на продольной волне, а при приёме – двукратно отраженные на поперечной волне; акустическая схема **T(L)-TB(SL)** соответствует схеме называемой «самотандем» [14]. Более подробно обозначение акустических схем рассмотрено в статье [32].

1.4. Коммутационная матрица

Для описания пар излучатель-приёмник введём понятие коммутационной матрицы \mathbf{C} размерами $N \times N$, где N – количество элементов АР. По-видимому, такое описание работы антенной решётки послужило основанием для создания термина **Full Matrix Capture**. Если $C_{nm} = 1$, то это означает, что элемент антенной решётки с номером n излучает импульс, а элемент с номером m принимает эхосигнал. Так как эхосигналы, измеренные при $C_{nm} = 1$ и $C_{mn} = 1$, совпадают с точностью до шумовой составляющей, то можно заполнять единицами только верхний (или нижний) треугольник матрицы $C_{nm} = 1, m \geq n$. С такой коммутационной матрицей проводят регистрацию эхосигналов в приборе «A1550 IntroVisor» [15]. Регистрация эхосигналов по всем комбинациям пар ($C_{nm} = 1$ для всех n и m) позволяет получить максимальное отношение сигнал/шум. Если возникает необходимость ещё больше уменьшить объем измеряемых эхосигналов, что приводит к повышению уровня шума изображения, то можно дополнительно проредить матрицу \mathbf{C} . Характерный вид коммутационной матрицы \mathbf{C} для 32-ух элементной антенной решётки при **случайном** выборе 70-ти пар (m, n) приведён на Рис. 1.

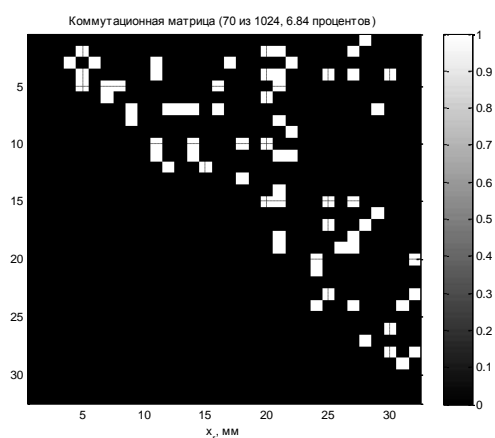


Рис. 1 Типичный вид коммутационной матрицы \mathbf{C} .

2. Обзор аппаратуры, использующей антенные решётки

Автор статьи не ставил перед собой задачу досконально ознакомиться с техническими характеристиками и программами анализа изображений всех ФАР-дефектоскопов, так как изучение этих достаточно сложных приборов с руководствами пользователя в несколько сотен страниц весьма трудоёмкая задача. Поэтому данный обзор не может претендовать на исчерпывающую полноту. В основном дефектоскопы сравниваются по алгоритмам формиро-

вания изображения отражателей. Автор имеет опыт практической работы только с дефектоскопами следующих типов: «X-32» [16], «OLIMPUS MX» [17], «MULTIX SOCKET 64x64» [18], «ISONIC 2009» [19, 20] и «A1550 IntroVisor» [15], – который и позволил ему сформировать точку зрения на работу с ФАР-дефектоскопами. Более того, учитывая то обстоятельство, что следующее поколение системы серии «АВГУР», разрабатываемой и изготавливаемой в научно-производственном центре «ЭХО+», будет использовать идеологию ЦФА-дефектоскопа, то взгляд автора статьи может оказаться не достаточно объективным.

2.1. Аппаратура для ручного контроля

Основными требованиями, которые предъявляют к ФАР-дефектоскопом для ручного контроля, это их малые размеры и вес и возможность сразу на месте контроля сделать вывод о наличии отражателя, его типе и размере.

В настоящее время создан ряд ручных относительно дешевых ФАР-дефектоскопов [21, 22, 23]. Стремление к их удешевлению привело к тому, что количество каналов с 64 или 32 у ранних моделей, уменьшилось до 32 или 16 каналов у более поздних моделей. ФАР-дефектоскопы вызвали огромный интерес у специалистов по ручному неразрушающему ультразвуковому контролю (РУЗК), так как их применение позволяет получать с частотой не менее 20 Гц изображения дефектов в виде секторных сканов в координатах xz . Анализ двумерных изображений дефектов, а не отдельных А-сканов, позволяет на качественно новом уровне решать задачи по выявлению дефектов, измерению их размеров, определению их типа и реальной конфигурации контролируемого сварного соединения. Однако, измерение эквивалентных размеров, которое по-прежнему требуется для множества разработанных методик ультразвукового контроля, затрудняет легитимное использование ФАР-дефектоскопов в практике ультразвукового контроля.

ЦФА-дефектоскопы представлены на рынке не в таком количестве, как ФАР-дефектоскопы. Причина этого в том, что развитие элементной базы позволило хронологически раньше поучить достаточно высокую скорость получения изображений для аппаратуры, работающей по идеологии фазированных антенных решёток. Сейчас скорость получения изображений ЦФА-дефектоскопами достаточно высока, так как алгоритм C-SAFT можно реализовать на аппаратном уровне с использованием, так называемых, программируемых логических матриц [24]. Например, ручной ЦФА-дефектоскоп «A1550 IntroVisor» фирмы «АКС» [15] формирует изображение В-типа методом C-SAFT с частотой 20 Гц, что соизмеримо с частотой обновления экрана ФАР-дефектоскопа. В автоматизированной системе

«A2075 SoNet» той же фирмы частота получения изображения равна 50 Гц [25]. ЦФА-дефектоскоп «A1550 IntroVisor» обладает рядом важных особенностей. Для регистрации эхосигналов используется не многоканальная аппаратура, а всего лишь один канал с электронным коммутатором. Такой подход существенно упрощает аппаратную часть прибора и, что очень важно, позволяет работать от встроенного аккумулятора более шести часов. Ни один из ФАР-дефектоскопов, с которыми довелось работать автору статьи, не в состоянии автономно без смены аккумуляторов проработать больше четырёх часов!

Следует особо отметить, что фирмой «АКС» созданы антенные решётки оригинальной конструкции. Во-первых, в отличие от зарубежных антенных решёток, которые монтируются на плоской поверхности призмы, каждый элемент АР расположен на одинаковой глубине от поверхности объекта контроля и имеет свой наклон для излучения поперечной волны. Во-вторых, на обычной керамике Российского производства удалось получить короткие импульсы, которые получают при использовании композитной пьезокерамики. И, в-третьих, цена антенных решёток фирмы «АКС» практически на порядок меньше зарубежных. Важная особенность антенных решёток фирмы «АКС» ещё и в том, что их апертура равна 40 мм, что в полтора-два раза больше размеров стандартных 32-ух элементных АР зарубежного производства. Это приводит к более высокой фронтальной разрешающей способности изображений полученных прибором «A1550 IntroVisor». К недостаткам антенных решёток конструкции фирмы «АКС» можно отнести занижение амплитуды бликов дефектов, залегающих близко к поверхности.

Аппаратура серии «MULTIX SOCKET» фирмы «M2M» [18] обладает важной архитектурной особенностью, которая позволяет получать изображения, как в режиме ФАР-дефектоскопа, так и измерять эхосигналы в режиме двойного сканирования для реконструкции по ним изображения отражателей. Но, в отличие от ЦФА-дефектоскопа «A1550 IntroVisor», формирование изображений происходит не в масштабе реального времени! В упомянутой выше публикации [9] приведены изображения придонной трещины с учётом трансформации типов волн на неровном дне. Подход фирмы «M2M» к созданию систем использующих антенные решётки и матрицы очень близок к подходу «НПЦ «ЭХО+».

2.2. Аппаратура для автоматизированного контроля

Требования к системам для автоматизированного контроля несколько иные, нежели для систем с ручным контролем, – малый вес и габариты уже не являются решающими критерием, а важнейшим свойством таких систем является возможность получать предельно

точное заключение о типе и размерах отражателей. Часто эти системы стационарны и имеют больше чем 64 канала для излучения и приёма сигналов, укомплектованы автоматизированными сканерами и могут использовать несколько антенных решёток или матриц. Очень важна скорость работы таких систем. В настоящий момент, создано достаточное количество систем для автоматизированного ультразвукового контроля имеющих от 128 до 1024 каналов [26, 27, 28, 29], но их цена может составлять более полумиллиона евро. Как правило, такие системы работают с несколькими антенными решётками и матрицами с количеством элементов больше чем 32.

Следует отметить, что некоторые традиционные ФАР-дефектоскопы при соответствующей настройке можно использовать для регистрации эхосигналов в режиме двойного сканирования. После их конвертации в базу данных системы «**АВГУР**» эти эхосигналы можно использовать для восстановления изображения отражателей методом C-SAFT. Но, так как эти настройки поддерживают не «родные» режимы приборов, то система «**X-32**» работает в режиме двойного сканирования в несколько раз медленнее, чем в режиме ФАР-дефектоскопа, а система «**OMNISCAN MX**» позволяет измерить только 255 эхосигналов, вместо 1024 для 32-ух элементной АР, максимальной длиной только 640 отсчётов. Но при этом «**OMNISCAN MX**» сохраняет высокую скорость работы в режиме двойного сканирования. Для проведения исследовательских работ, когда скорость проведения измерений и иные ограничения не принципиальны, использование ФАР-дефектоскопов для регистрации эхосигналов в режиме двойного сканирования оказалось вполне эффективным. Только аппаратура фирмы «**M2M**» позволяет быстро и в произвольном объеме проводить измерения эхосигналов в режиме двойного сканирования.

Так как восстановление изображений отражателей методом C-SAFT эквивалентно взятию двойного или тройного интеграла в зависимости от модификации метода, то требуются значительные вычислительные ресурсы для эффективной работы ЦФА-дефектоскопа. Современная вычислительная техника позволят решить эту задачу. Так, например, на графической плате серии «**GeForce GTX480**» с технологией CUDA [30, 31], позволяющей распараллеливать вычисления, скорость восстановления изображений программным обеспечением системы «**АВГУР АРТ**» удалось увеличить в тысячу раз в сравнении со скоростью расчётов на процессоре компьютера и довести время получения изображения отражателей в ста слоях до трёх-четырёх секунд. Для автоматизированных систем ультразвукового контроля это вполне приемлемое время. Тем более, что более качественные изображения, получаемые методом C-SAFT, должны позволить построить надёжную систему автоматизированного кон-

троля с распознаванием типа дефектов и определения их размеров. Это уменьшит общее время контроля, который должен завершиться подготовкой протокола с перечнем обнаруженных дефектов и их характеристик.

3. Разрешающая способность в ОВИ и вид функции рассеивания точки

Важной характеристикой любой системы визуализации изображения отражателей является её разрешающая способность и вид функции рассеивания точки (ФРТ), которую можно рассматривать как передаточную функцию. Обычно рассматривают разрешающую способность по лучу $\Delta_{луч}$ (лучевая разрешающая способность) и разрешающую способность в перпендикулярном к лучу направлении $\Delta_{фронт}$ (фронтальная разрешающая способность). Чем симметричнее вид ФРТ, чем больше отношение сигнал/шум и чем выше разрешающая способность $\Delta_{луч}$ и $\Delta_{фронт}$ тем выше качество изображения. Идеальная система визуализации должна формировать изображение точечного отражателя в виде δ -функции.

Лучевая разрешающая способность $\Delta_{луч} \approx \Delta_{луч}(x, z)$ определяется в основном длиной излучённого импульса и слабо зависит от точки (x, z) , принадлежащей ОВИ, и поэтому имеет одинаковое значение для ФАР- и ЦФА-дефектоскопов.

Фронтальная разрешающая способность $\Delta_{фронт}(x, z)$ определяется двумя факторами. **Во-первых**, угловыми размерами апертуры АР для точки (x, z) ОВИ, и, **во-вторых**, способом восстановления изображения. Фронтальное разрешение ЦФА-дефектоскопа определяется только первым фактором, а для изображения полученного ФАР-дефектоскопом добавляется ещё влияние второго фактора. Фронтальное разрешение $\Delta_{фронт}(x, z)$ для ЦФА-дефектоскопа, использующего антенную решётку апертурой $A = N\Delta x$, где Δx шаг между элементами, расположенной на призме с углом наклона β_y из материала со скоростью звука c_w продольной волны, можно оценить по формуле

$$\Delta_{фронт}(x, z) = \frac{\lambda}{4 \sin \alpha_A(x, z)},$$

где $\alpha_A(x, z)$ угловая апертура для точки (x, z) . При расчётах вместо апертуры A надо использовать $A_{эфф} = A \frac{\cos \alpha}{\cos \beta_y}$, где $\alpha = \arcsin(\frac{c}{c_w} \sin \beta_y)$ [14]. Самая высокая фронтальная разре-

шающая способность ФАР- и ЦФА-дефектоскопов достигается на «центральной луче» АР установленной на конкретную призму – в этом случае угловые размеры апертуры антенной решётки максимальны.

Однако, если закон фокусировки ФАР-дефектоскопа рассчитан на глубину 30 мм, а дефект расположен на иной глубине, то эхосигналы по всем элементам антенной решётки будут складываться не в фазе и оптимальная фокусировка не будет достигнута. И это рассогласование будет тем больше, чем больше размеры АР. Влияние этого второго фактора на величину фронтального разрешения можно оценить, анализируя форму фокусного пятна АР. Известно [14], что чем больше волновые размеры фокусирующей системы, тем меньше размеры фокусного пятна вдоль акустической оси преобразователя и наоборот. Поэтому при удалении от линии фокусировки фронтальное разрешение изображения, сформированного ФАР-дефектоскопом, будет ухудшаться сильнее, чем для ЦФА-дефектоскопа. И чем больше размеры АР, тем сильнее будет проявляться этот недостаток ФАР-дефектоскопов [5, 6].

На Рис. 1 представлена оценка фронтального разрешения $\Delta_{\text{фронт}}(x, z)$ при удалении от линии фокусировки на глубине 30 мм в сторону поверхности объекта контроля для антенных решёток с разным количеством элементов. Видно, что область с высоким фронтальным разрешением $\Delta_{\text{фронт}}(x, z)$ тем уже, чем больше апертура антенной решётки. И наоборот, чем меньше апертура АР, тем меньше разница $\Delta_{\text{фронт}}(x, z)$ между ФАР- и ЦФА-изображениями.

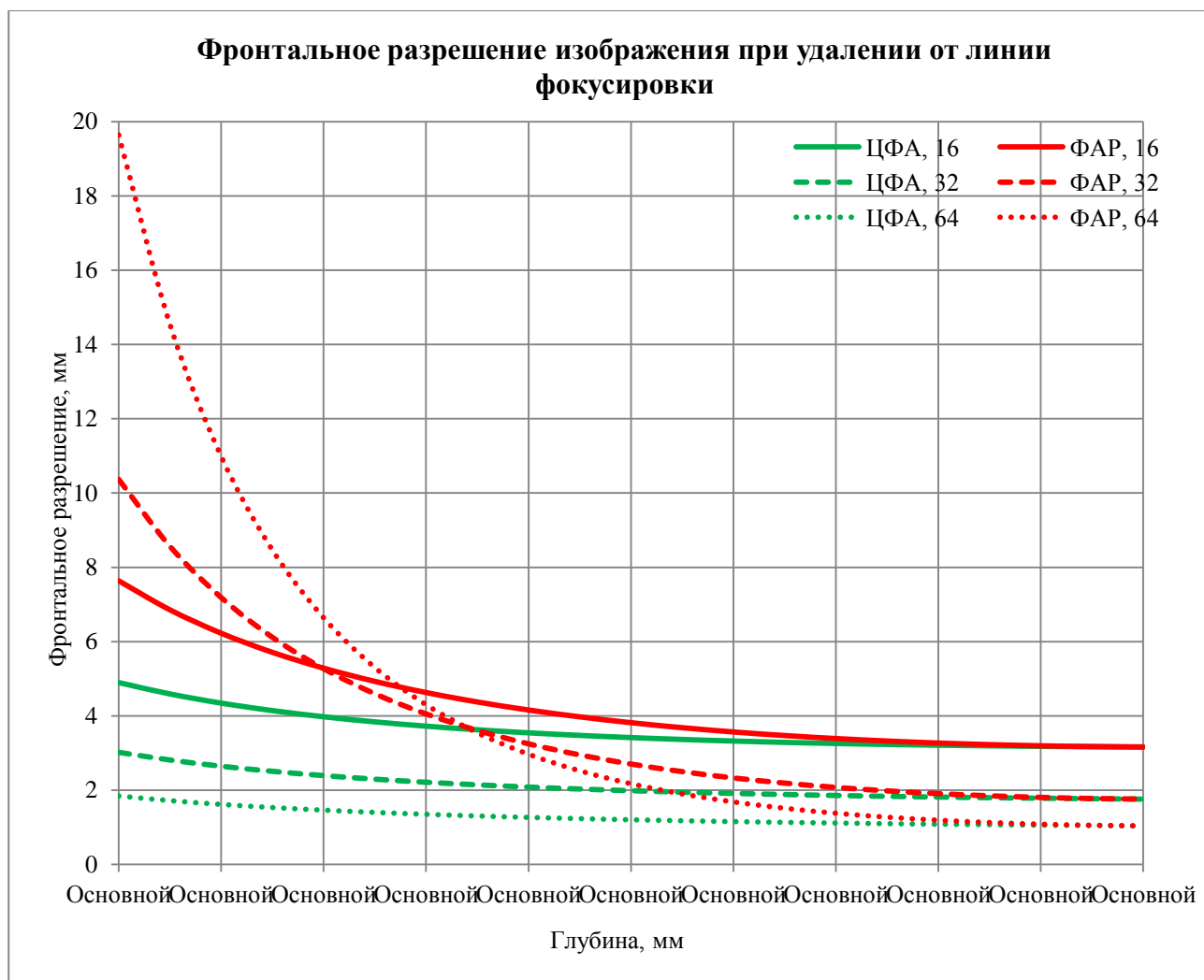


Рис. 2. Фронтальное разрешение в зависимости от глубины для антенных решёток с разным количеством элементов. Линия фокусировки на глубине 30 мм, частота 5 МГц, поперечные волны.

Как следует из графиков на Рис. 2, влиянием второго фактора для антенных решёток из 16 элементов можно пренебречь. 32-ух элементные АР позволяют получить фронтальное разрешение в полтора раза выше, чем 16-и элементные, но при удалении от линии фокусировки на 20 мм разрешение ухудшается более чем в два с половиной раза, в сравнении с ЦФА-изображением. А для 64 элементных антенных решёток влияние второго фактора на фронтальное разрешение становится критическим. Однако для изображений протяжённых отражателей рассмотренное ухудшение фронтального разрешения может оказаться не таким заметным.

3.1. Изображения теста фронтального разрешения

Все изображения в данной статье были получены с помощью приборов «X-32» и «Olimpus MX», которые работали при соответствующей настройке, либо в режим ФАР-дефектоскопа, либо в режиме ЦФА-дефектоскопа. Как правило, регистрация данных происходила при перемещении антенной решётки по одной и той же апертуре с целью корректного сравнения изображений полученных для обоих режимов.

Для иллюстрации изложенных выше рассуждений рассмотрим вариант восстановления изображения ФАР- и ЦФА-дефектоскопами «точечных» отражателей. Измерения проводились на образце «тест фронтального разрешения» из 18 отверстий бокового сверления диаметром 2.0 мм, расположенных на четверти окружности радиуса 50 мм (см. Рис. 3), в стальном образце.

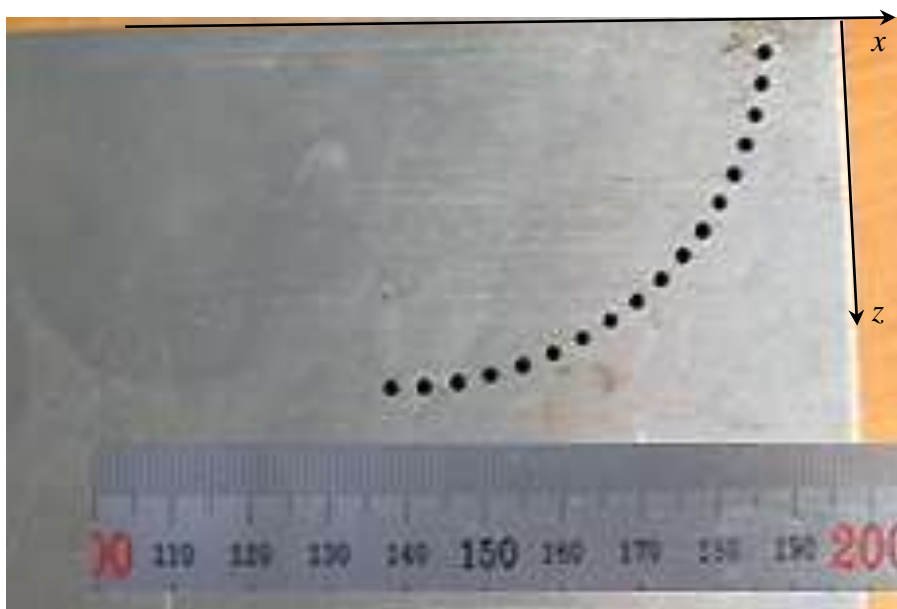


Рис. 3. Тест фронтального разрешения.

Измерения проводились 32-х канальным дефектоскопом «OMNISCAN MX» с помощью антенной решётки 5L32-PWZ3 (апертура 32×1.0 мм) размещённой на призме SPWZ3-N55S-ИНС с углом наклона $\beta_y = 36$ градусов. При работе в режиме ФАР-дефектоскопа линия фокусировки была на глубине 30 мм, а при работе в режиме ЦФА-дефектоскопа использовалось только 255 пар верхнего треугольника коммутационной матрицы С (см. раздел 1.4). Антенная решётка перемещалась вдоль оси x (см. Рис. 3).

На Рис. 4 представлено изображения теста фронтального разрешения, полученное в режиме ФАР-дефектоскопа (слева) и восстановленное в режиме ЦФА-дефектоскопа (справа). Видно, что при удалении от линии фокусировки (глубина 30 мм) фронтальное разрешение $\Delta_{\text{фронт}}(x, z)$ изображения полученного в режиме ФАР-дефектоскопа на глубине 10 мм становится равным примерно 5 мм, а в режиме ЦФА-дефектоскопа примерно 1.5 мм. Кроме того, амплитуда бликов на изображениях, полученных в режиме ЦФА-дефектоскопа при удалении от глубины 30 мм уменьшается не так заметно, как на ФАР-изображении. На глубине фокусировки качество изображений, полученных по обеим технологиям, практически одинаково. Использование только 255 из 1024 доступных эхосигналов привело к тому, что на ЦФА-изображении уровень шума, связанный с большим шагом между элементами антенной решётки, имеет повышенное значение.

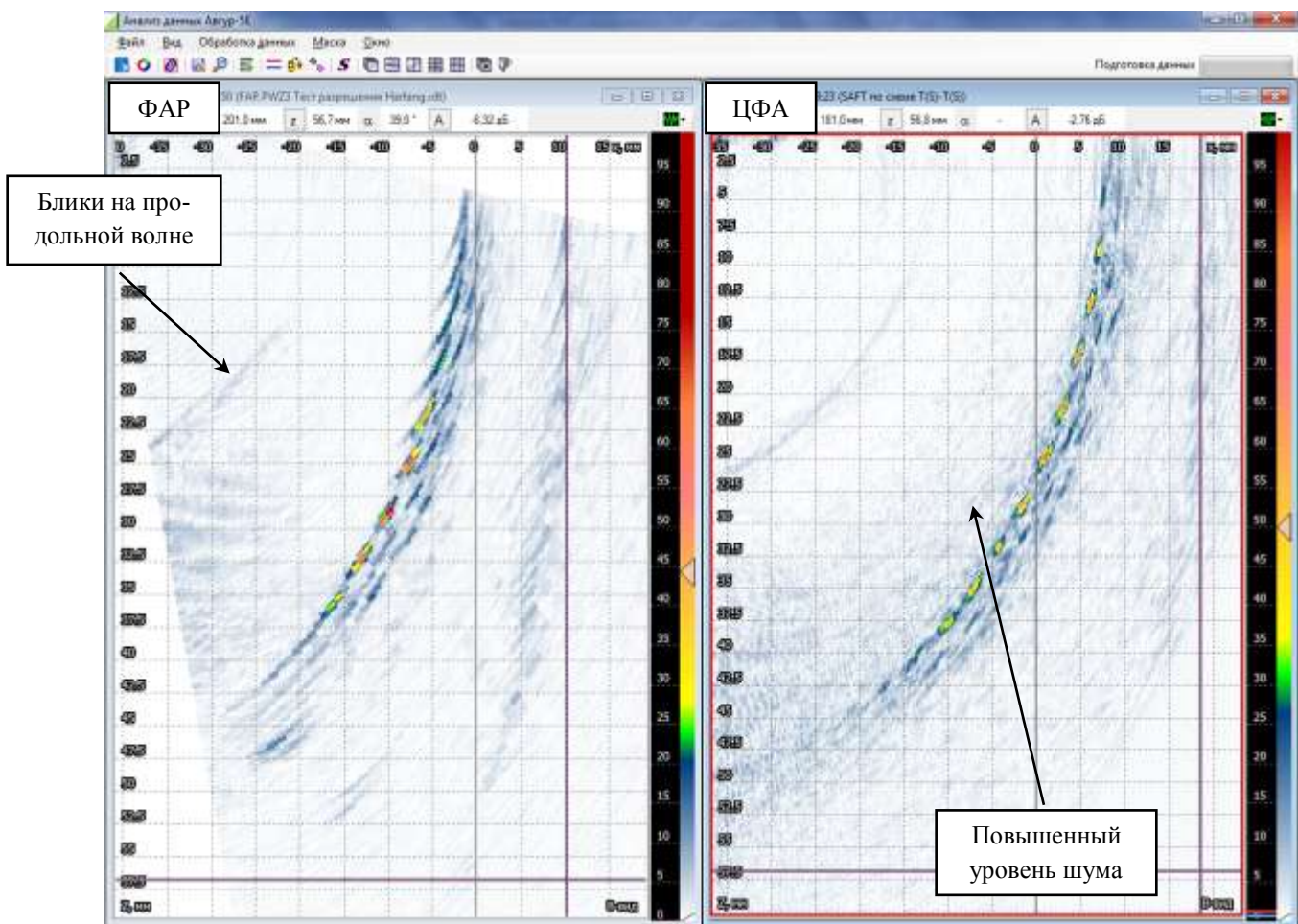


Рис. 4 Изображение теста фронтального разрешения, полученное в режиме ФАР-дефектоскопа (слева) и восстановленное в режиме ЦФА-дефектоскопа (справа).

На Рис. 5 представлен увеличенный фрагмент изображения теста фронтального разрешения с Рис. 4, полученные в режиме ФАР-дефектоскопа (слева) и в режиме ЦФА-дефектоскопа (справа). Хорошо видно насколько лучше фронтальное разрешение $\Delta_{front}(x, z)$ изображения полученного в режиме ЦФА-дефектоскопа. Амплитуда бликов возникших из-за перерассеивания на отверстиях на изображении, полученном в режиме ЦФА-дефектоскопа более чем на 6 дБ выше, чем на изображении, полученном в режиме ФАР-дефектоскопа. На ЦФА-изображении блик самого близкого к поверхности отверстия находится в нужных координатах, в то время как на ФАР-изображении блик этого отверстия сместился на 1 мм в глубину.

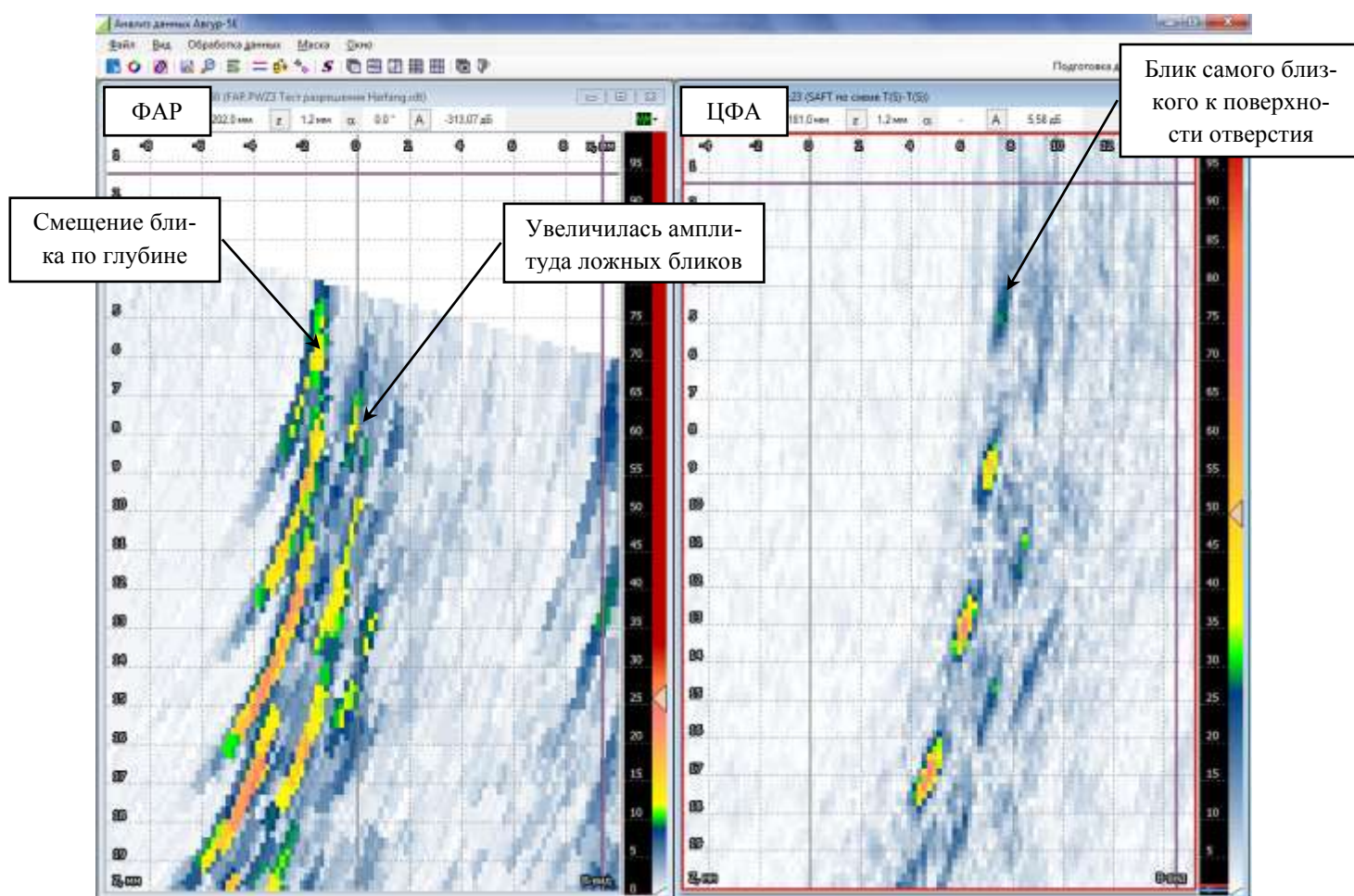


Рис. 5 Увеличенный фрагмент изображения теста фронтального разрешения с Рис. 4, полученный в режиме ФАР-дефектоскопа (слева) и восстановленный в режиме ЦФА-дефектоскопа (справа).

3.2. Изображения моделей трещин в образце Ду800

Рассмотрим ещё один пример получения изображения искусственных отражателей в образце трубопровода диаметром 840 мм (тип Ду800) со сварным соединением. Такие объекты характерны для атомной энергетики. Измерения проводились на той же аппаратуре что и в разделе 3.1. Так как в других разделах статьи будут представлены изображения дефектов в данном образце, то опишем его подробнее. Это достаточно сложный образец с семью искусственными дефектами, которые на Рис. 6 схематически отображены линиями красного цвета. Дефекты с номерами от **одного** до **четырёх** – это модели внутренних продольных трещин высотой около 5 мм и длиной около 25 мм, **шестой** дефект – это модель внутренней поперечной трещины высотой 5 мм и длиной 20 мм, дефект **пять** – это модель трещины высотой около 5 мм, выходящей на нижнюю поверхность образца, а дефект **семь** – это засверловка диаметром 3 мм на глубину 7 мм от нижней поверхности образца. Дефекты **три** и **четыре** имеют наклон 20 и -14 градусов к оси z . Трещины моделировались фрезерованными пазами шириной 1 мм. Сварное соединение на Рис. 6 показано тёмным прямоугольником с градиентной заливкой. Валик усиления сварного шва был удалён.

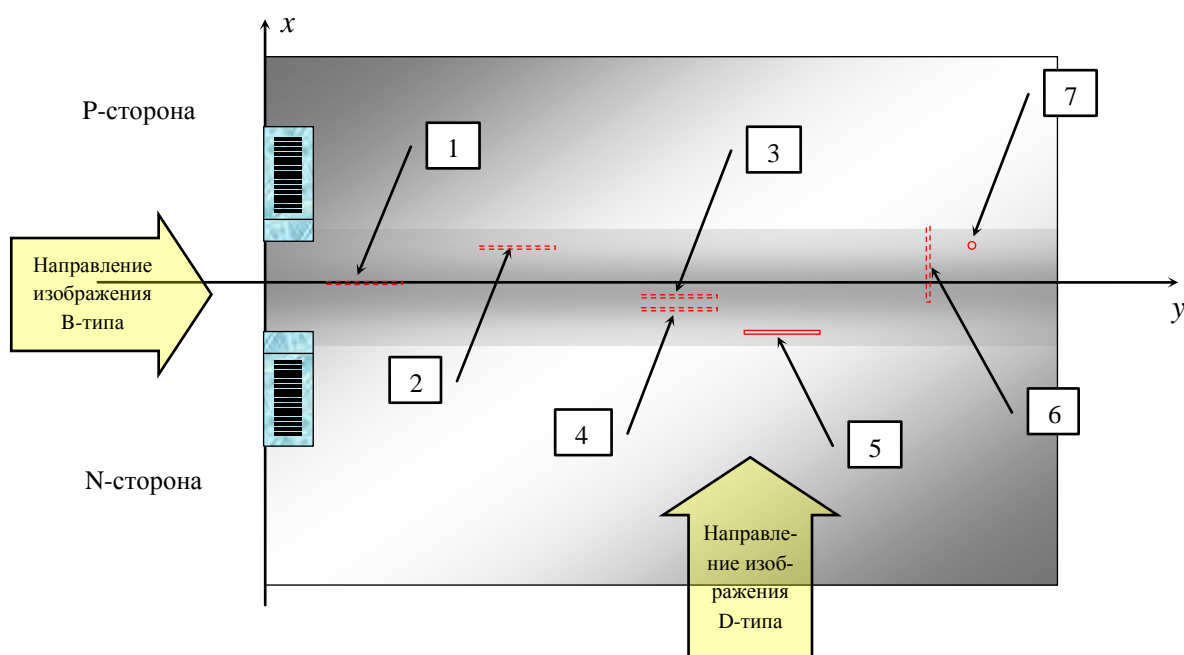


Рис. 6 Схема проведения измерений на образце Ду800. АР показаны в начале апертуры сканирования. Фигурами красного цвета схематически показаны заложенные в образец модели дефектов. Пунктирная линия означает то, что дефект не выходит на поверхности образца, а сплошная указывает на то, что дефект выходит на дно образца.

На Рис. 7 показаны изображения всех отражателей в образце, полученные в режиме ФАР-дефектоскопа (вверху) и в режиме ЦФА-дефектоскопа (внизу) с Р-стороны. Для обоих режимов представлены изображения В-типа и D-типа. Причём изображения D-типа, для повышения информативности, представлены одним слоем с максимумами изображений вдоль оси x . На рисунке полупрозрачными прямоугольниками розового цвета показаны заложенные при изготовлении дефекты. На изображении В-типа видны восстановленные образы висячих трещин (дефекты 3 и 4). Видно, что блики краёв дефекта 4 на ФАР-изображении В-типа сфокусированы значительно хуже, чем на ЦФА-изображении (можно сравнить с изображением на Рис. 5). На ЦФА-изображении D-типа также видно, что дефекты, расположенные выше линии фокусировки на глубине 30 мм, сфокусированы лучше, чем на ФАР-изображении D-типа. Дефект 5, имитирующий трещину, растущую от дна, не виден, так как временная апертура была выбрана так, что отражённые от него импульсы просто не были зарегистрированы. Кроме паспортизованных дефектов на восстановленных изображениях хорошо видно множество незаложенных отражателей в сварном соединении. Чуть более высокий уровень шума ЦФА-изображении объясняется тем, что дефектоскопом «**OMNISCAN MX**» регистрировалась только четверть всех возможных эхосигналов – 255 из 1024 (см. раздел 1.4). Кроме того, можно предположить, что в дефектоскопе «**OMNISCAN MX**», кроме полосовой фильтрации, есть специальная обработка изображения S-типа для дополнительного уменьшения уровня шума.

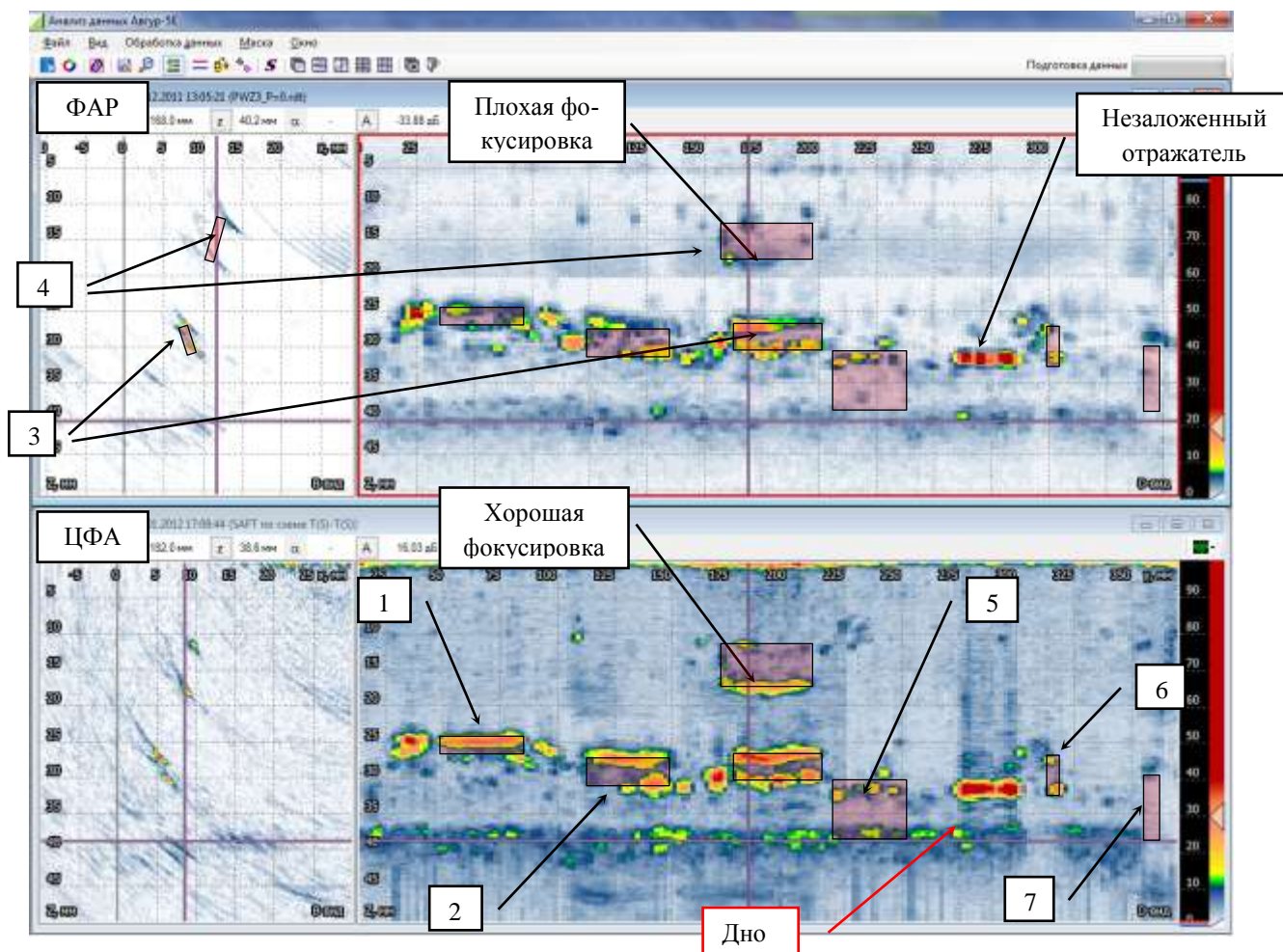


Рис. 7 Изображение моделей трещины в образце Ду800 с Р-стороны, полученное ФАР-дефектоскопом (вверху) и ЦФА-дефектоскопом (внизу).

На Рис. 8 показаны изображения В-типа и D-типа всех отражателей в образце, полученные в режиме ФАР-дефектоскопа (вверху) и в режиме ЦФА-дефектоскопа (внизу) с N-стороны. Изображения D-типа представлены одним слоем с максимумами изображений вдоль оси x . На рисунке полупрозрачными прямоугольниками розового цвета показаны заложённые при изготовлении образца отражатели. На изображении В-типа видны восстановленные образы висячих трещин (дефекты 3 и 4). В отличие от изображения на Рис. 7, блики краёв дефекта 4 на ФАР-изображении В-типа сфокусированы ничуть не хуже, если не лучше, чем на ЦФА-изображении. Это объясняется тем, что дефект 4 при озвучивании с N-стороны виден не как точечный, как это получается при озвучивании с Р-стороны, а как плоскостной дефект. Дефект 5, имитирующий трещину, растущую от дна, не виден, так как отражённые от него импульсы не были зарегистрированы.

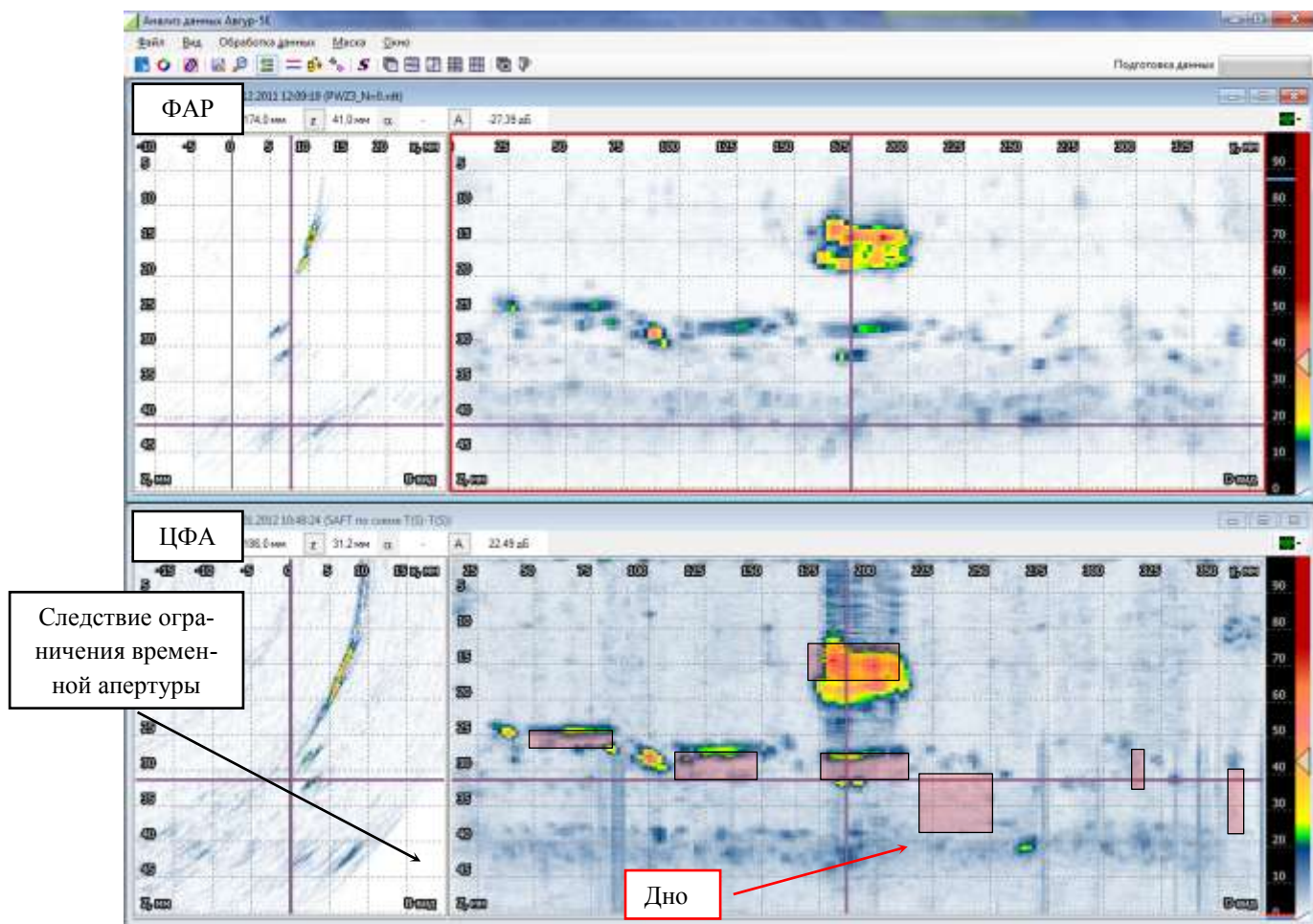


Рис. 8 Изображение моделей трещины в образце Ду800 с N-стороны, полученное ФАР-дефектоскопом (вверху) и ЦФА-дефектоскопом (внизу).

4. Получение изображения дна образца двумя антенными решётками

В практике часто возникает необходимость провести контроль сварных соединений с валиком усиления. В случае двухстороннего доступа можно использовать две антенные решётки, одна из которых при излучении фокусирует волны в точки, в которые фокусируется приёмная антенная решетка, расположенная с другой стороны шва, так как это показано на Рис. 9. Точки фокусировки отмечены на рисунке множеством кругов синего цвета.

Многие ФАР-дефектоскопы, упомянутые в разделе 2, позволяют подключать, как правило, с коммутатором, две 32-ух элементные антенные решётки и проводить необходимую настройку законов фокусировки на излучение и на приём без учёта смены типа волны при отражении. Однако изображения формируются не в виде изображения S-типов, а просто в виде матрицы. Это позволяет уверенно получать изображения отражателей, но в отличие от

изображений S-типа сформированных при излучении и приёме одной АР, полученная матрица не позволяет простым образом определить размеры и местоположение отражателя. Так, по крайней мере, формируются изображения у дефектоскопов «X-32», «OMNISCAN MX» и «MULTIX POCKET 64x64».

Несложная модификация метода C-SAFT позволяет восстановить изображение дефектов в виде матрицы (изображения В-типа) для двух антенных решёток или матриц. Причём по один раз измеренным эхосигналам можно получить несколько изображений дна в достаточно широком диапазоне вдоль оси x . На Рис. 9 схематически показаны три акустические схемы T(S)-T(L), T(S)-T(S) и T(L)-T(S) с эффектом трансформации типа волны при отражении от дна. Линиями зелёного цвета показаны пути распространения продольных волн, а красным пути распространения поперечных волн.

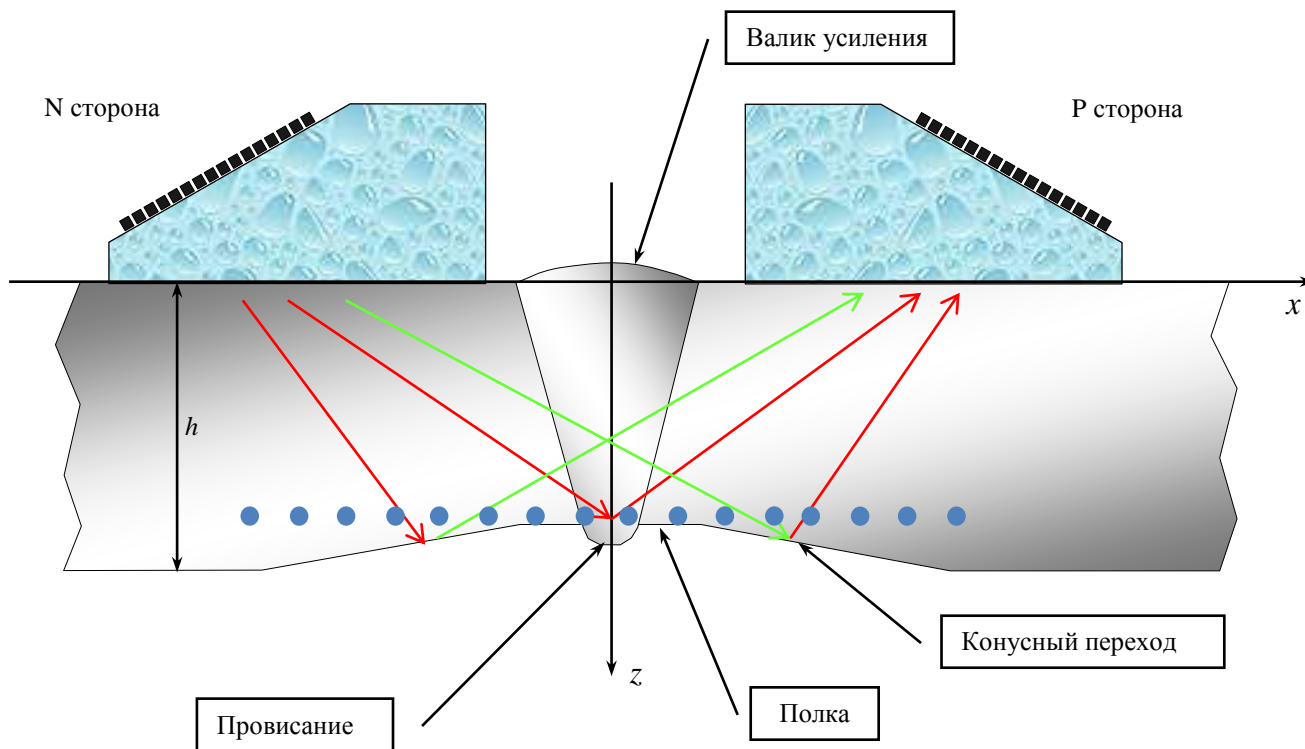


Рис. 9 Схема контроля двумя АР сварного соединения с валиком усиления.

4.1. Изображения дна и отверстия бокового сверления в образце Ду300

Рассмотрим пример получения изображения дна образца имитирующего трубопровод диаметром 325 мм (тип Ду300). На Рис. 10 приведена фотография образца 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 конусной проточки в трубопроводе типа Ду300. Измерения эхосигналов в режиме двойного сканирования проводились ФАР-дефектоскопом «Х-32» с помощью антенной решётки PE-5M32E0.8P (апертура 32×0.8 мм) размещённой на призме T1-35WOR-1 с углом наклона $\beta_y = 35$ градусов. Коммутационная матрица C была вся заполнена единицами.

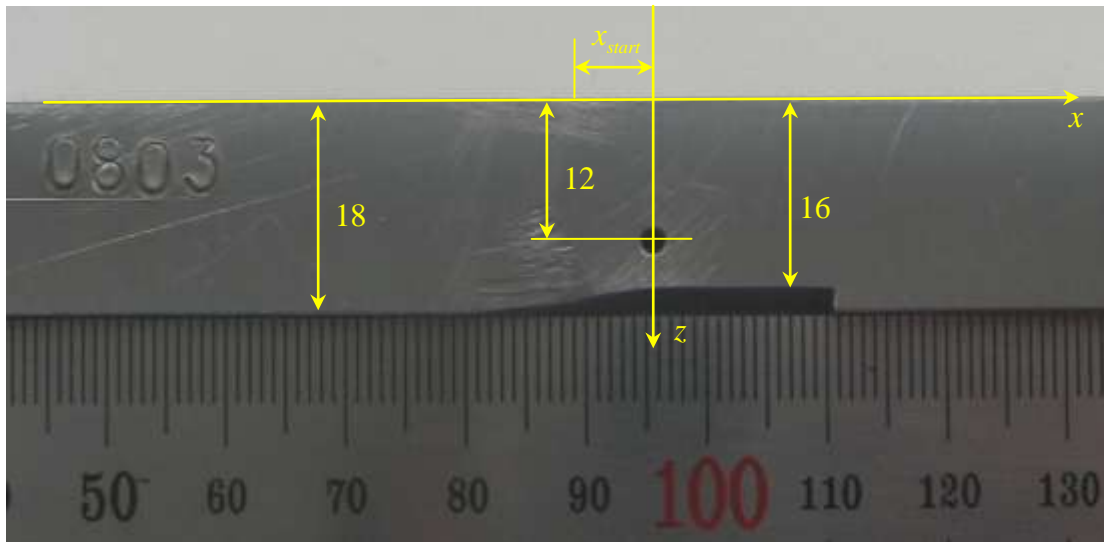


Рис. 10 Фотография образца со сквозным отверстием бокового сверления диаметром 2 мм на глубине 12 мм.

На Рис. 11 показаны изображения, полученные по один раз измеренным эхосигналам и восстановленные методом C-SAFT по трём акустическим схемам **T(S)-T(L)**, **T(S)-T(S)** и **T(L)-T(S)**. Каждая из этих схем позволяет получить изображение своего участка дна. На изображение линиями чёрного цвета наброшена маска образца и отверстия. Хорошо видно, что форма поверхности восстановлена в диапазоне от -15 до 25 мм, то есть в интервале 40 мм.

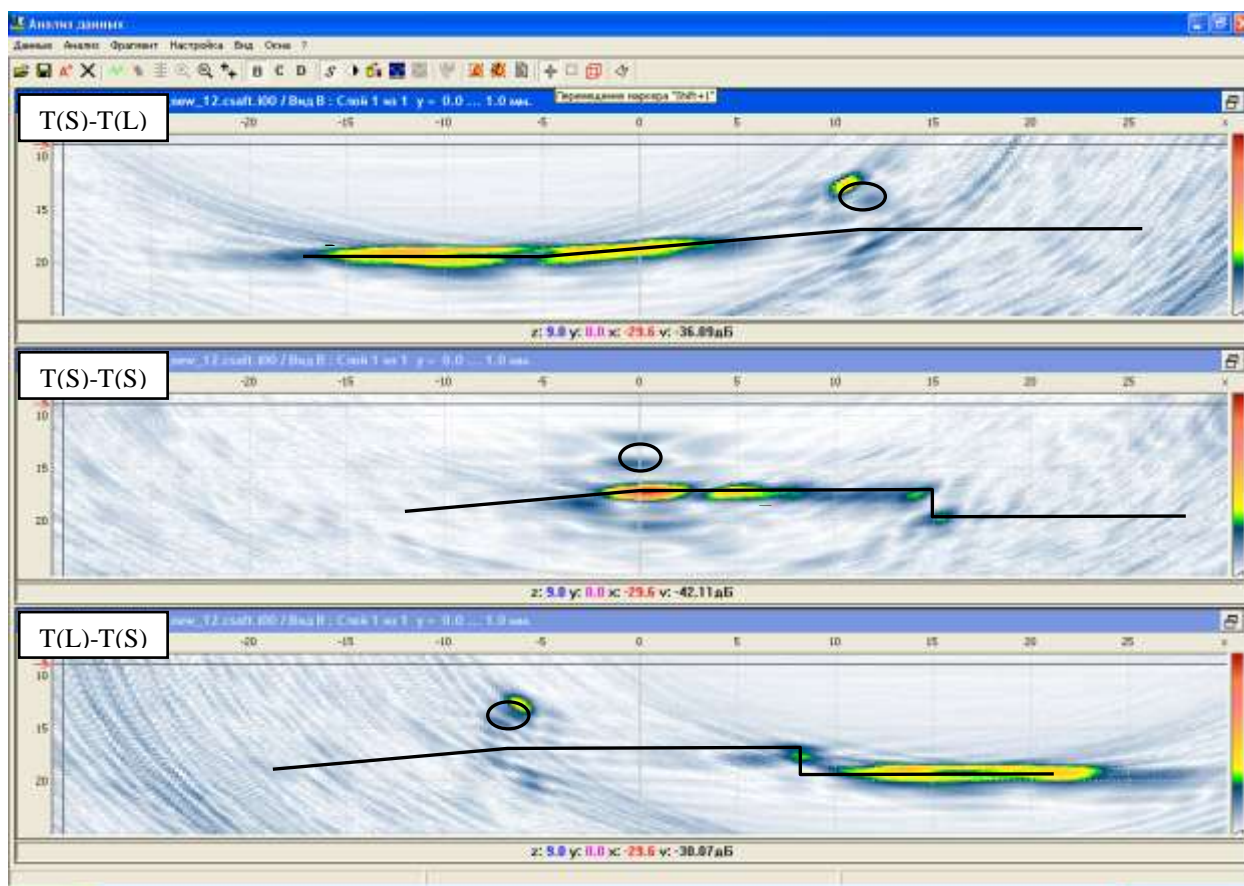


Рис. 11 Изображения дна образца и отверстия бокового сверления, восстановленные по акустическим схемам **T(S)-T(L)**, **T(S)-T(S)** и **T(L)-T(S)**.

5. Когерентное объединение парциальных изображений

В практике автоматизированного ультразвукового контроля используют сканирующие устройства для перемещения антенных решёток по поверхности объекта контроля. В результате получается множество изображений при разных расстояниях от отражателя до призмы. Автору неизвестны способы когерентного объединения парциальных изображений, реализованные в стандартном программном обеспечении ФАР-дефектоскопов. Кроме того, их эффективное сложение возможно только в окрестности линии фокусировки ФАР-дефектоскопа, где блики максимально сфокусированы и фазовые соотношения ещё не нарушены (см. раздел 3). ЦФА-дефектоскопы формируют парциальные изображения с предельной фокусировкой и с сохранением фазовых соотношений во всей ОВИ. Поэтому когерентное сложение парциальных изображений восстановленных методом C-SAFT позволяет получить изображение высокого качества. При этом фронтальное разрешение $\Delta_{\text{фронт}}(x, z) \approx \Delta_{\text{фронт}}$ возрастает в несколько раз и перестаёт сильно зависеть от координат (x, z) , а отношение сигнал/шум возрастает, особенно, если аддитивный шум белый. Такой подход позволяет

объединить преимущества систем ультразвукового контроля с механическим и электронным сканированием.

5.1. Изображения теста фронтального разрешения по акустической схеме T(S)-T(S)

Измерения проводились 32-х канальным ФАР-дефектоскопом «OMNISCAN MX» с использованием антенной решётки 5L32-A11 (апертура 32×0.6 мм) на призме из плексигласа с углом наклона $\beta_y = 42$ градуса. При работе в режиме ФАР-дефектоскопа линия фокусировки была на глубине 30 мм, а при работе в режиме ЦФА-дефектоскопа использовалось только 255 пар верхнего треугольника коммутационной матрицы. Антенная решётка перемещалась вдоль оси x (см. Рис. 3).

На Рис. 12 представлены изображения, полученные на прямом луче на поперечной волне (акустическая схема T(S)-T(S)). На левой панели показано парциальное изображение в одном слое (см. Рис. 4), а на правой – их когерентная сумма. Хорошо видны расфокусированные блики на продольной волне и блики сформированные импульсами при перерасеивании между соседними отверстиями. Амплитуда этих ложных бликов может достигать до 75% от бликов самих отверстий. Фронтальное разрешение суммарного изображения равно примерно 1 мм позволяет уверенно разрешить все 18 отверстий бокового сверления. Малая амплитуда самых глубоких бликов объясняется тем, что на поперечной волне диаграмма направленности даже для элемента шириной 0.6 мм не достаточно широка, и нужно было увеличить область сканирования АР.

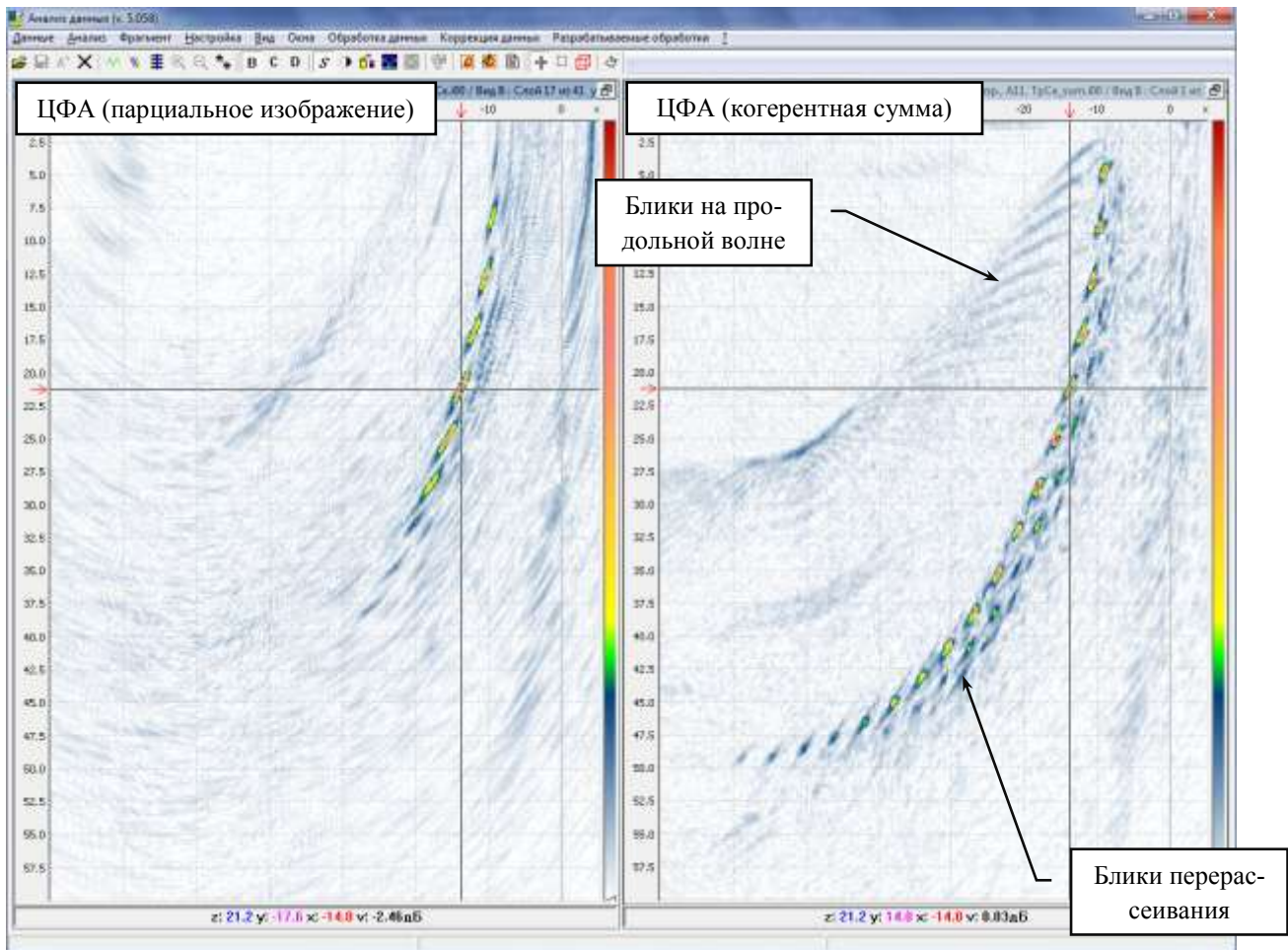


Рис. 12 Изображения теста фронтального разрешения по акустической схеме **T(S)-T(S)**. Слева одно парциальное изображение, а справа когерентная сумма всех парциальных изображений.

6. Получение изображений в режиме 3D при произвольной ориентации антенной решётки

В процессе контроля необходимо обнаружить дефекты разной ориентации. В простейшем случае – это продольно и поперечно ориентированные дефекты. Поэтому методика может содержать требование применять антенные решетки, расположенные на призме с произвольным углом поворота β_z . Сама призма может иметь заданный угол наклона β_y и угол скоса β_x и расположена на объекте контроля под определённым углом разворота β_w относительно системы координат xuz . На Рис. 13 схематически показан объект контроля с двумя дефектами и три антенные решетки AP-1, AP-2 и AP-3, произвольно размещённые на

призмах с разной ориентацией. Для АР-1 угол поворота β_z равен 0 градусов, а для АР-2 – 90 градусов.

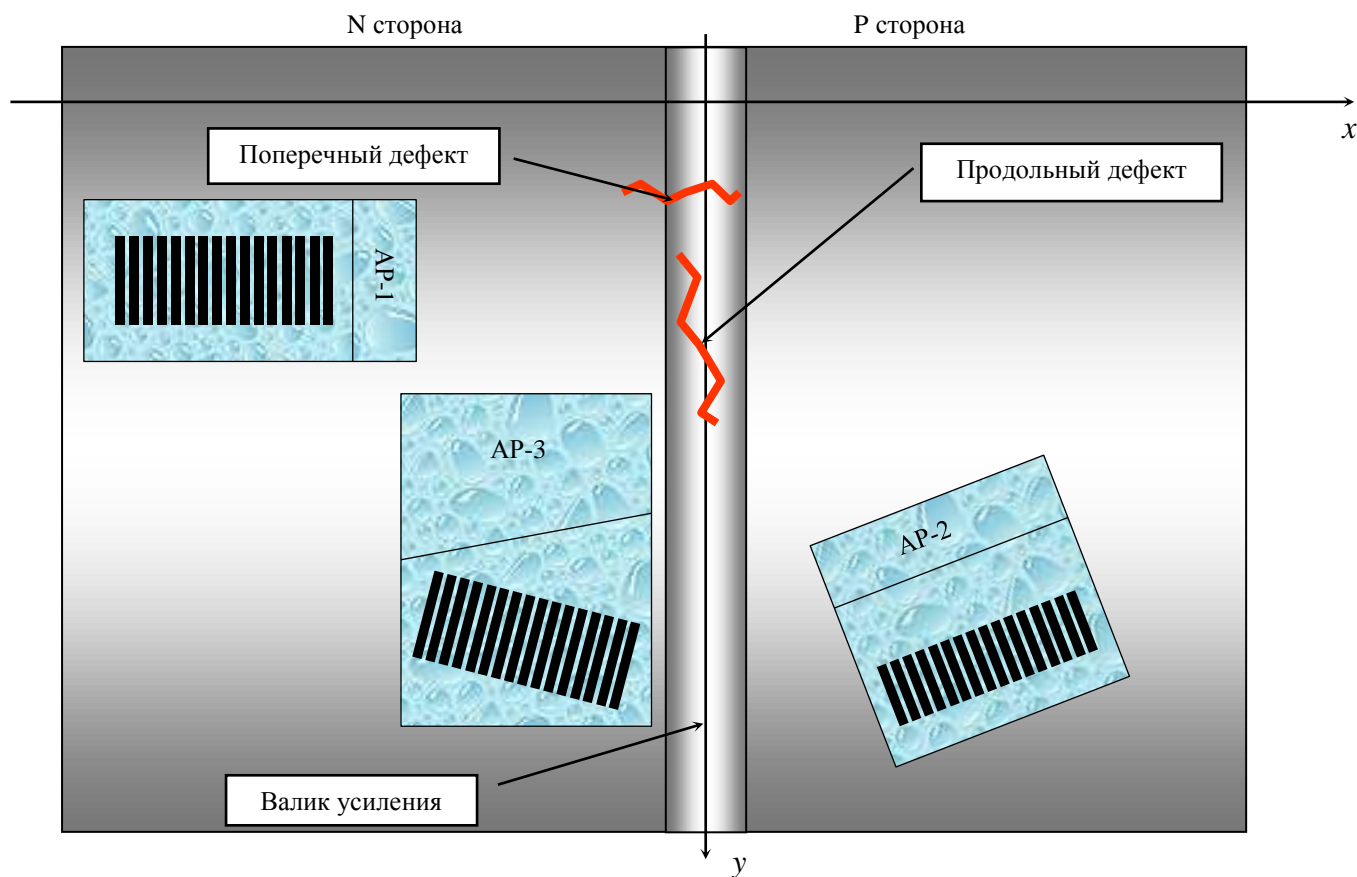


Рис. 13 Объект контроля и дефекты, показаны линиями красного цвета, произвольной ориентации. Схематически показаны призмы и антенные решётки трёх разных типов размещения.

В программном обеспечении ФАР-дефектоскопов, как правило, предусмотрена возможность задавать все углы ориентации β антенной решётки. С точки зрения автора, особенно удачно для этих целей реализовано программное обеспечение дефектоскопов фирмы «М2М», которое позволяет задавать линию фокусировки произвольной формы в трёхмерном пространстве. Однако, попытка совместно проанализировать изображения S-типа полученные ФАР-дефектоскопом с разными антенными решётками вызывает затруднения, так как между ними достаточно сложно установить пространственную связь без специального программного обеспечения. Изображения, восстановленные ЦФА-дефектоскопом можно восстановить на пространственной сетке одинаковой для всех антенных решёток и анализиро-

вать их в режиме синхронного просмотра. Можно объединить парциальные изображения в одно и анализировать не несколько изображений, а одно изображение более высокого качества.

Обычно, изображения восстанавливаются методом C-SAFT в предположении, что по одному слою с эхосигналами восстанавливается один слой с изображениями. Метод C-SAFT для обеспечения максимальной фокусировки не только в основной xz , но и в дополнительной плоскости $xу$, легко обобщается на трёхмерный случай. Суть обобщения заключается в том, что для формирования одного слоя изображения, используется не один, а несколько слоёв исходных эхосигналов. Их количество определяется шириной диаграммы направленности преобразователя в дополнительной плоскости $xу$. Технологию получения изображения указанным выше способом мы будем называть 3D-C-SAFT. Насколько известно автору ни один из упомянутых в обзоре приборов (см. раздел 2) не в состоянии совместно с учётом фазы обрабатывать несколько изображений S-типа.

6.1. Изображения модели поперечной трещины в образце Ду800

В качестве примера совместного анализа изображений полученных разными AP рассмотрим изображения полученные антенной решёткой AP-1 для обнаружения продольных дефектов и решёткой AP-3, предназначенной для обнаружения поперечных дефектов для случая одностороннего доступа к сварному соединению Ду800, рассмотренному в разделе 3.2.

Измерения проводились 32-х канальным дефектоскопом «OMNISCAN MX». Антенная решётка 5L32-PWZ3 (апертура 32×1.0 мм), размещённая на призме SPWZ3-N55S-ИНС с углом наклона $\beta_y = 36$ градусов, использовалась как антенная решётка AP-1. А антенная решётка 5L32-A11 (апертура 32×0.6 мм), размещённая на призме из плексигласа с углами $\beta_z = 90$, $\beta_x = -4$ и $\beta_y = 22$ градусов, соответствовала антенной решётке AP-2. Призма AP-1 ориентирована относительно системы координат $xуz$ под углом $\beta_w = 0$ градусов, а призма AP-3 – под углом $\beta_w = -90$ градусов. При работе в режиме ЦФА-дефектоскопа использовалось только 255 пар верхнего треугольника коммутационной матрицы (см. раздел 1.4). Антенная решётка перемещалась вдоль оси y (см. Рис. 6).

На левой панели Рис. 14 показано изображение B-типа поперечного дефекта б (см. Рис. 6) полученного AP-1 при использовании алгоритма C-SAFT. Так как данная антенная

решётка предназначена для обнаружения продольных дефектов, то поперечный дефект 6 (на рисунке он показан полупрозрачным прямоугольником розового цвета) виден слабо и легко может быть пропущен или опознан как не плоскостной дефект. Зато на этом рисунке хорошо заметны два горизонтальных блика соответствующие изображению дна образца на продольной волне (акустические схемы $T(L)-T(L)$ и $TBT(LLL)-TBT(LLL)$). На правой панели Рис. 14 показано изображение поперечного дефекта 6 (см. Рис. 6) полученного AP-3 при использовании трёхмерной обработки 3D-C-SAFT. Верхний и нижний край дефекта 6 уверенно обнаруживаются, но определение длины даёт ошибку практически в 10 мм. Хорошо виден и блик, сформированный по акустической схеме $T(L)-TB(LL)$. Важное достоинство этих изображений в том, что они восстановлены в единой системе координат, в которой их легче совместно анализировать.

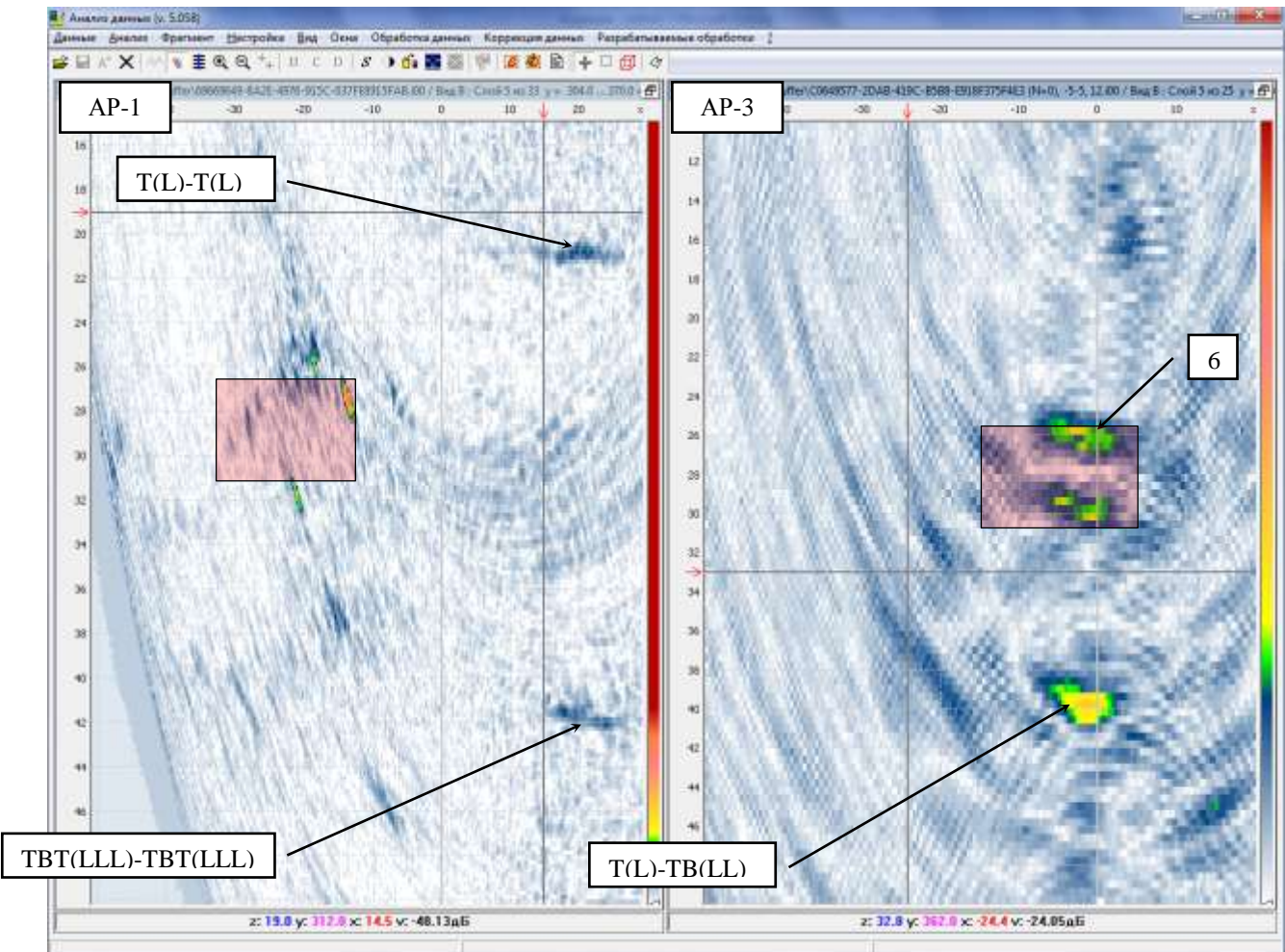


Рис. 14 Изображение модели поперечной трещины в образце Ду800, полученное ЦФА-дефектоскопом при использовании антенных решёток AP-1 (слева) и AP-3 (справа).

На Рис. 15 показаны изображения D-типа дефектов 6 и 7 в том же образце Ду800. На левой панели показано изображение, восстановленное методом C-SAFT, а на правой изображение восстановленное методом 3D-C-SAFT. Для подчёркивания уровня шума и разрешающей способности изображение D-типа в каждой точке uz представлено максимальным значением вектора вдоль оси x . Видно, что на изображении, восстановленном методом 3D-C-SAFT, уверенно видны блики дефектов 6 и 7 и блик соответствующий углу образца Ду800. Изображение, восстановленное методом 3D-C-SAFT, имеет фронтальное разрешение в три раза выше, чем изображение восстановленное методом C-SAFT, а отношение сигнал/шум больше чем на 6 дБ, чем в случае послойной обработки. На изображение линиями белого цвета наброшена маска образца с дефектами 6 и 7.

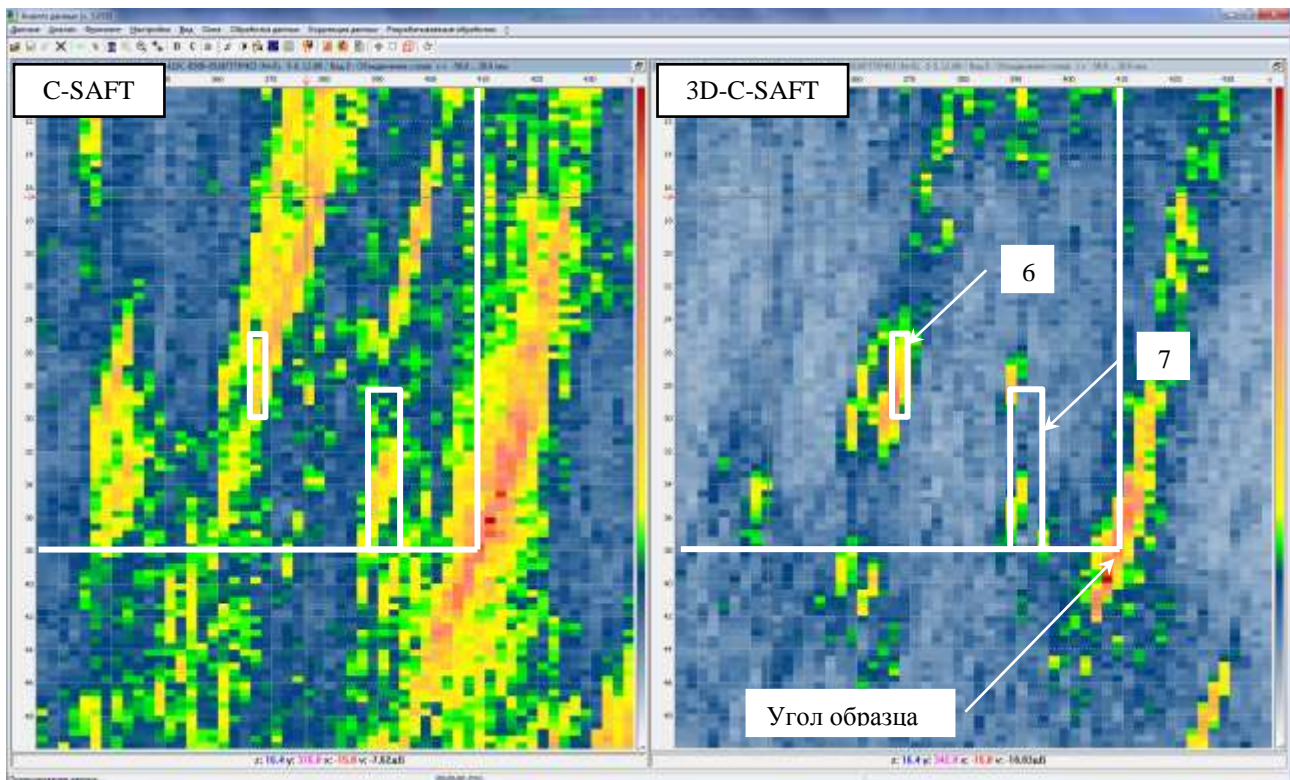


Рис. 15 Изображение D-типа дефектов 6 и 7 в образце Ду800, полученное методом C-SAFT (слева) и методом 3D-C-SAFT (справа).

7. Получение изображений по разным акустическим схемам

Как упоминалось в разделах 1.2 и 1.3, антенными решётками удаётся зарегистрировать множество эхосигналов по разным акустическим схемам. Это эквивалентно тому, что отражатель удаётся «осветить» по многим направлениям и получить более точную информа-

цию о форме отражателя, восстановив методом C-SAFT множество парциальных изображений по единожды измеренным эхосигналам. Такой подход особенно эффективен для тонких объектов, в которых луч может несколько раз отразиться от их границ. С алгоритмической точки зрения этот очень важный вопрос подробно рассмотрен в работе [32].

Некоторые ФАР-дефектоскопы позволяют формировать задержки с учётом отражения от лучей от дна объекта контроля, в том числе и неровного, и проводить измерения в каждой точке по нескольким акустическим схемам для получения дополнительной информации об отражателях. Такими возможностями обладают дефектоскопы «**MULTIX SOCKET 64x64**» и «**ISONIC 2009**». Про возможности остальных дефектоскопов упомянутых в разделе 2, автор не имеет информации, но, похоже, это стандартный режим современных ФАР-дефектоскопов. Работа в таком режиме, который в статье [19] называется «Multigroup», замедляет работу ФАР-дефектоскопа в число раз равное количеству акустических схем, используемых при проведении контроля, в то время как скорость измерения эхосигналов ЦФА-дефектоскопом не изменится. Дополнительное время придётся потратить на этапе восстановления изображения отражателей методом C-SAFT после завершения регистрации эхосигналов, но это, как правило, происходит в более комфортных условиях, нежели процесс измерения.

Как пример можно рассматривать изображение дна образца и отверстия бокового сверления при использовании трёх акустических схем и двух АР приведённое на Рис. 11.

7.1. Изображения теста фронтального разрешения по акустической схеме T(L)-T(L)

Ниже представлены изображения, полученные на прямом луче на продольной волне (акустическая схема T(L)-T(L)) по эхосигналам по которым было получено изображение на Рис. 12 (см. раздел 3.1). На левой панели показано одно парциальное изображение, а на правой их когерентная сумма. На суммарном изображении отчётливо видна боковая стенка на глубину до 20 мм. Фронтальное разрешение парциального изображения не позволяет различить ни одного отверстия, в то время как фронтальное разрешение суммарного изображения равно примерно 2 мм и все 18 отверстий на глубине 50 мм отчётливо разрешаются. Сравнивая этот рисунок с Рис. 12, видно, что применение новой схемы даёт дополнительную информацию о дефектах и об образце. Так как на продольной волне диаграмма направленности элемента шириной 0.6 мм более широкая, чем на поперечной волне, то амплитуды бликов всех отверстий стала практически одинаковы при прежней апертуре механического сканирования. Анализируя два объединённых изображения показанных на Рис. 12 и Рис. 16 и полу-

ченных по одному набору эхосигналов можно точнее определить размеры и, главное, тип отражателя.

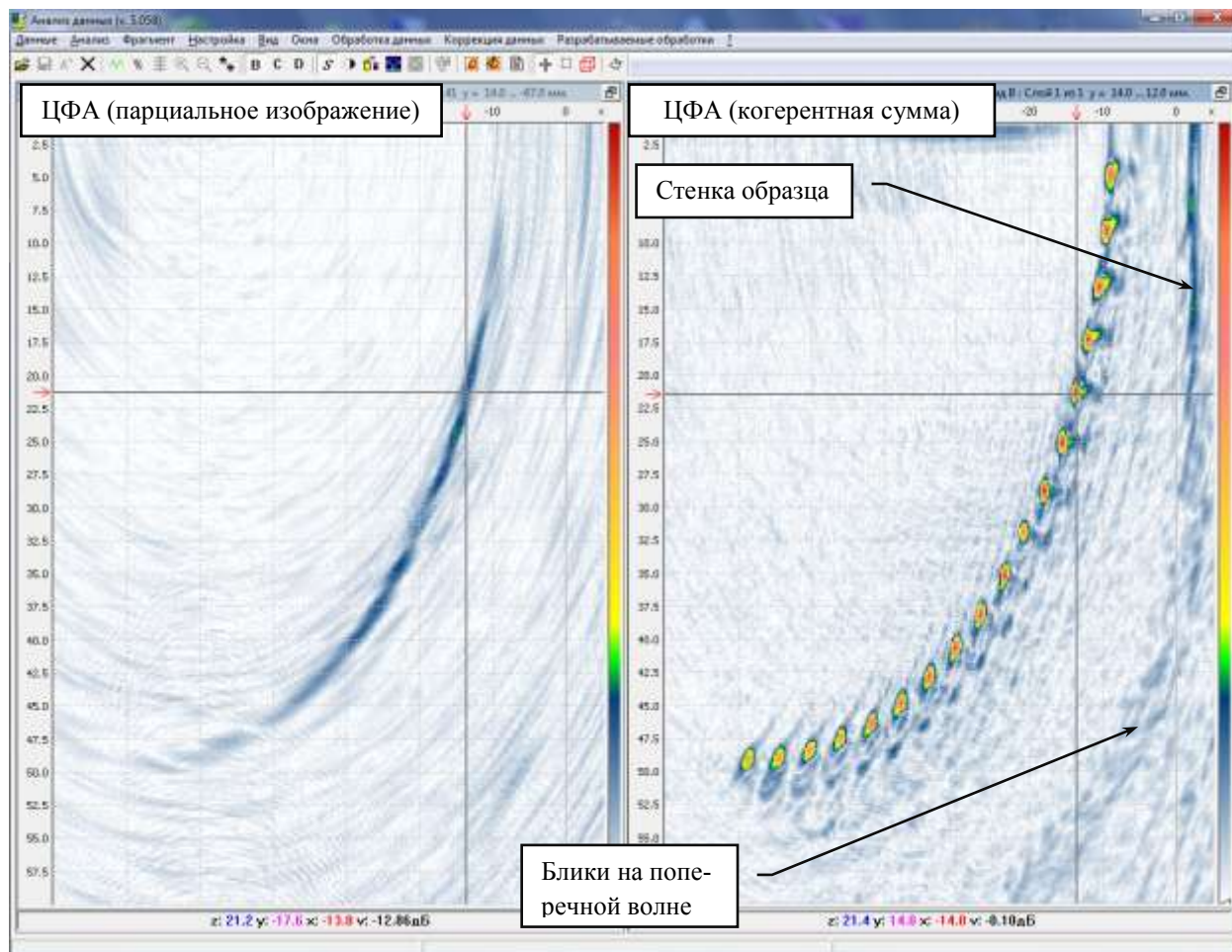


Рис. 16 Изображения теста фронтального разрешения по акустической схеме T(L)-T(L). Слева одно парциальное изображение, а справа когерентная сумма всех парциальных изображений.

7.2. Изображение вертикальной усталостной трещины в образце Ду800

Рассмотрим ещё один пример получения изображения отражателя по дополнительным акустическим схемам. В сварном соединении фрагмента трубопровода Ду800 на глубине около 30 мм была накачана продольная усталостная трещина. Измерения эхосигналов в режиме двойного сканирования проводились ФАР-дефектоскопом «Х-32» с помощью антенной решётки РЕ-5М32Е0.8Р (апертура 32×0.8 мм) размещённой на призме Т1-35WОР-1 с углом наклона $\beta_y = 35$ градусов, которая перемещалась сканирующим устройством вдоль оси y . Коммутационная матрица \mathbf{C} была вся заполнена единицами.

На Рис. 17 представлено изображение усталостной трещины образца трубопровода Ду800 с усталостной трещиной с использованием ФАР-дефектоскопа (слева) и ЦФА-дефектоскопа (в центре и справа) по разным акустическим схемам. Так фокусировка в режиме ФАР-дефектоскопа проводилась на глубину 30 мм, то ФАР- и ЦФА-изображения очень близки. Однако дополнительная обработка эхосигналов измеренных в режиме двойного сканирования по акустической схеме **T(S)-ТВ(LL)** позволяет получить изображение, на котором видна практически вся поверхность усталостной трещины. К сожалению, ФАР-изображения были получены с завышенным усилением, что привело к выравниванию амплитуд бликов краёв трещины и к восстановлению изображения наплавки. Измерения в ЦФА-режиме проводились без «зашкаливания» эхосигналов, поэтому изображения наплавки не видно и амплитуды бликов краёв трещины отличаются более чем на 6 дБ. Таким образом, если размеры дефекта не велики и он находится на линии фокусировки, то ФАР- и ЦФА-изображения очень близки, что согласуется с рассуждениями раздела 3.

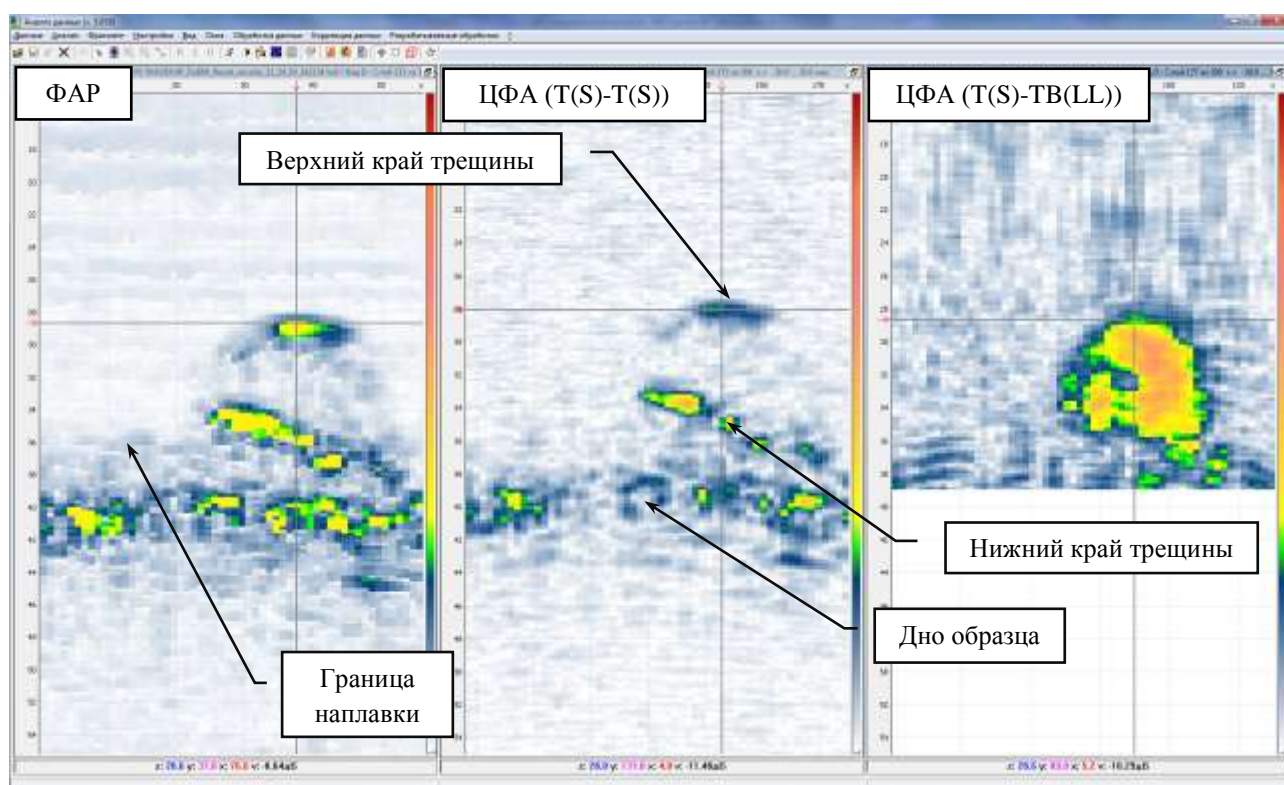


Рис. 17 Результат контроля образца трубопровода Ду800 с усталостной трещиной с использованием ФАР-дефектоскопа (слева) и ЦФА-дефектоскопа (в центре и справа) по разным акустическим схемам.

Следует отметить, что многие дефектоскопы, в частности «**MULTIX SOCKET 64x64**» и «**ISONIC 2009**», можно настроить так, чтобы получать ФАР-изображения с учётом

отражения от неровного дна. Дефектоскоп «**ISONIC 2009**» может даже учитывать смену типа волны при отражении от дна. При соответствующей модификации программного обеспечения любой ФАР-дефектоскоп сможет получать изображения отражателей с учётом трансформации типов волн при отражении от неровного дна образца.

ЦФА-дефектоскоп «**A1550 IntroVisor**» имеет возможность формировать изображения отражателей по одной из четырёх акустических схем с учётом до двух отражений импульса от плоскопараллельных границ объекта контроля, но без учёта трансформации типов волн. Более того, этот ЦФА-дефектоскоп формирует объединённое изображение в виде суммы модулей парциальных изображений, восстановленных по акустическим схемам $T(*)-T(*)$, $T(*)-ТВ(**)$, $ТВ(**)-ТВ(**)$, $ТВ(**)-ТВТ(***)$, где знак может принимать только значение **S** или **L**.

8. Получение изображения отражателей в материалах со структурным шумом

Применение антенных решёток очень эффективно для проведения контроля объектов из материалов с высоким уровнем структурного шума. Так как АР излучает короткий импульс длиной около периода центральной частоты, то можно ожидать, что применение АР позволит повысить отношение сигнал/шум [33]. Кроме того, как показано в работе [34], минимальный уровень структурного шума при формировании изображения отражателей можно получить с помощью многоканальной пространственно-временной обработки эхосигналов в предположении, что эхосигналы регистрируются в режиме двойного сканирования. Рассмотренный в разделе 5.1 режим когерентного сложения многих парциальных изображений полученных в режиме тройного сканирования позволяет повысить отношение сигнал/шум. Таким образом, можно ожидать, что получение изображения отражателей с использованием ЦФА-дефектоскопа более перспективно, чем применением для этих же целей ФАР-дефектоскопов.

8.1. Изображения отверстий бокового сверления в образце Ду800 с заваркой

Материалы данного раздела уже излагались в статье [35]. Образец, на котором проводились измерения, представлял собой фрагмент реального трубопровода Ду800 толщиной h равной 38 мм с наплавкой толщиной около 5 мм (Рис. 18). В образце была сделана заварка из никельсодержащей стали ЦТ-36. С одного края на границе заварка-основной металл (перлит) на глубинах 10, 20 и 30 мм были сделаны три отверстия бокового сверления диаметром 2.2 мм, обозначенные цифрами 1, 2 и 3 на Рис. 18.

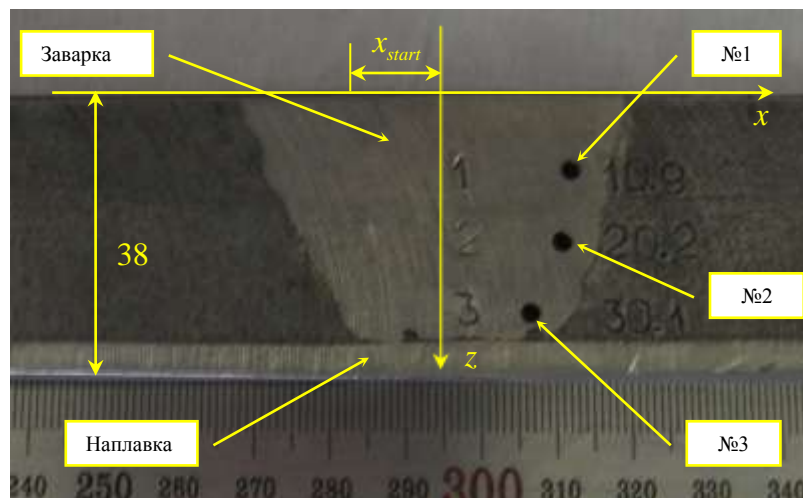


Рис. 18 Схема образца трубопровода Ду800 толщиной 38 мм с никельсодержащей заваркой и тремя отверстиями бокового сверления диаметром 2 мм.

Регистрация сигналов от дефектов проводилась в режиме тройного сканирования с помощью ФАР-дефектоскопа «Х-32» с использованием 20-элементной антенной решётки PE-2.25M20E1.2P (апертура 20×1.2 мм), работающей на частоте 2.25 МГц и установленной на призму из плексигласа с углом наклона $\beta_y = 20$ градусов. Коммутационная матрица **C** была вся заполнена единицами. Антенная решётка перемещалась вдоль оси x .

На Рис. 19 слева показано изображение отверстий бокового сверления, полученное в режиме ФАР-дефектоскопа, а справа ЦФА-дефектоскопом в режиме тройного сканирования. На изображения линиями чёрного цвета наброшена маска образца. Фронтальная разрешающая способность на ЦФА-изображении более чем в два раза выше, уровень реверберационного шума практически ноль, шум, связанный с достаточно грубым шагом элементов антенной решётки, уменьшился на 18 дБ, отношение сигнал/шум возросло более чем на 12 дБ. По всем параметрам, характеризующим качество изображения, ЦФА-изображение лучше, чем ФАР-изображение. На ЦФА-изображении отчётливо видно изображение дна образца. Комплексные парциальные ЦФА-изображения перед когерентным суммированием были пространственно профильтрованы. Так как блики отверстий смещены от своих положений, то скорость продольной волны в заварке отличается от 5.6 мм/мкс, используемой при восстановлении.

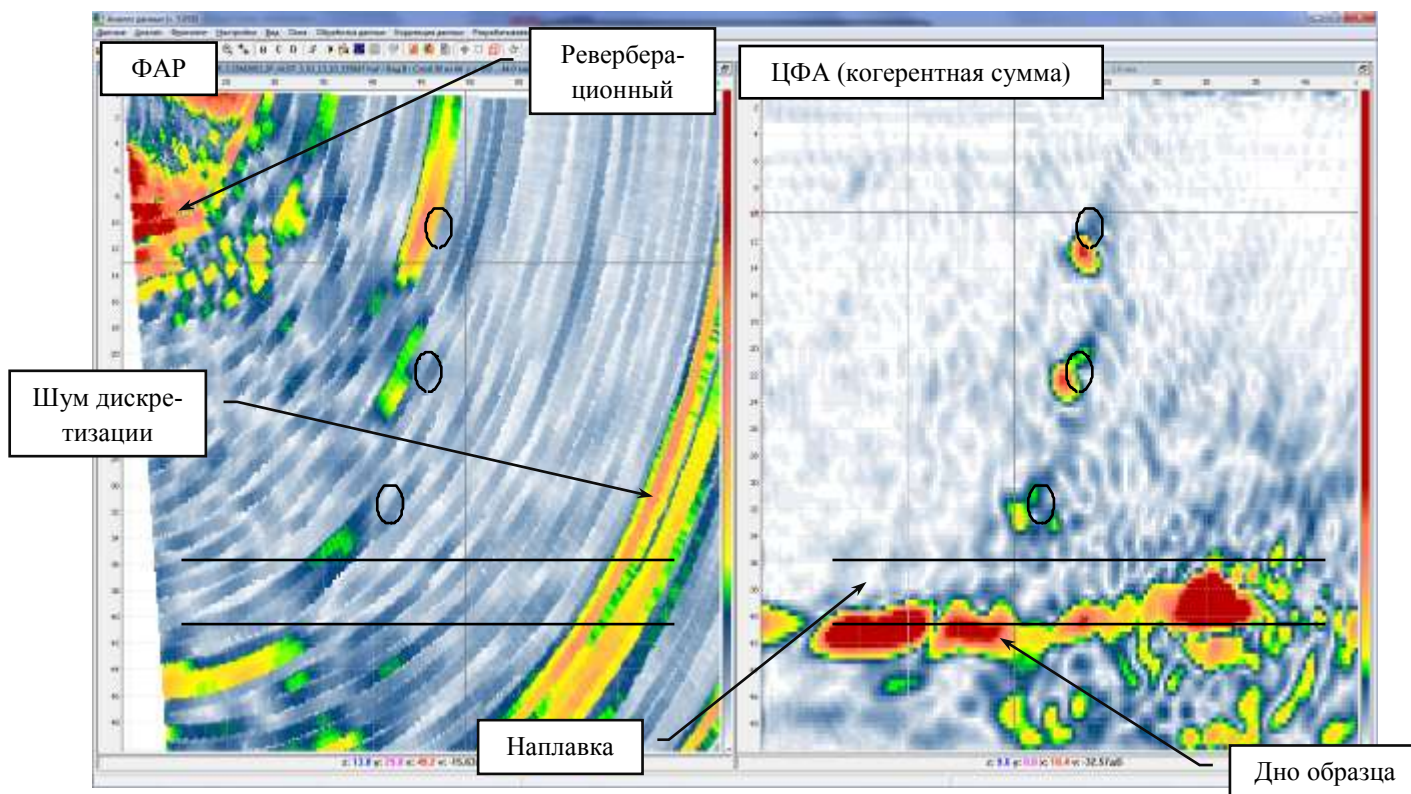


Рис. 19 Результат контроля образца с ремонтными никельсодержащими заварками трубопровода Ду800 с использованием ФАР-дефектоскопа (слева) и ЦФА-дефектоскопа (справа).

9. Величина амплитуды смещения

Принципиальная разница между ФАР- и ЦФА-дефектоскопами заключается в том, что при физической фокусировке акустических волн в режиме ФАР-дефектоскопа амплитуда колебания элементов объекта контроля в десять и более раз больше, чем в случае работы ЦФА-дефектоскопа, когда излучение происходит только одним элементом АР. Если нелинейные эффекты отсутствуют, то различия в чувствительности между изображениями, полученными ФАР- и ЦФА-дефектоскопами практически нет. Но если контроль проводится с учётом нелинейных эффектов [36, 37], то чувствительность ЦФА-дефектоскопа будет существенно меньше чем у ФАР-дефектоскопа. Это с точки зрения автора принципиальное различие между ФАР- и ЦФА-дефектоскопами.

10. Скорость получения изображения и объем данных

Как упоминалось выше частота формирования изображения ФАР- и ЦФА-дефектоскопами соизмерима и может быть около 50 Гц, что совершенно подходит для ручного контроля. Для автоматизированного контроля нет необходимости сразу видеть изобра-

жение отражателей, но нужно иметь текущую информацию о качестве акустического контакта.

Оценим объем информации необходимый для работы ФАР- и ЦФА-дефектоскопов. Будем полагать, что изображение S-типа формируется ФАР-дефектоскопом в диапазоне от 30 до 80 градусов с шагом 0.5 градусов ($N_s = 100$). Размер изображения по лучу обозначим N_t . Путь N – число элементов АР, N_{ix} , N_{iz} – размеры области восстановления изображения, N_{ip} – количество парциальных изображений по разным акустическим схемам. Требуемый объем памяти для хранения и пересылки изображения S-типа равно

$$M_{\text{ФАР}} = N_s N_t N_{ip}.$$

Для ЦФА-дефектоскопа требуется сначала провести измерения эхосигналов, а затем восстановить по ним N_{ip} парциальных изображений по разным акустическим схемам. Поэтому необходимый объем памяти, при использовании только верхнего треугольника коммутационной матрицы (см. раздел 1.4), можно определить как

$$M_{\text{ЦФА}} = \frac{N^2 N_t}{2} + N_{ix} N_{iz} N_{ip}.$$

Первый член выражения этого выражения определяет объём памяти необходимый для хранения эхосигналов, а второй для хранения восстановленных изображений по разным акустическим схемам. Для случая $N_t = 1024$, $N_{ix} = N_{iz} = 256$ и для значений количества парциальных изображений равных одному и пяти расчёт необходимой памяти $M_{\text{ЦФА}}$ и $M_{\text{ФАР}}$ приведён в Таблица 1.

Таблица 1

	N	$N_{ip} = 1$		$N_{ip} = 5$	
		$M_{\text{ЦФА}}$, Мбайт	$M_{\text{ФАР}}$, Мбайт	$M_{\text{ЦФА}}$, Мбайт	$M_{\text{ФАР}}$, Мбайт
1.	16	0.19	0.1	0.44	0.49
2.	32	0.56	0.1	0.81	0.49
3.	64	2.06	0.1	2.31	0.49

Видно, что для 64-ёх элементной антенной решётки при расчёте одного парциального изображения требуется в **двадцать** раз больше объем памяти для хранения эхосигналов и

изображений. Значения $M_{ЦФА}$ и $M_{ФАР}$ для АР из 16-и элементов соизмеримы. А вот в случае, если ФАР-дефектоскоп может получать изображения для нескольких законов фокусировки, то разница между значениями $M_{ЦФА}$ и $M_{ФАР}$ для пяти парциальных изображений равна уже **пяти**. Отсюда можно сделать вывод, ЦФА-дефектоскопы должны иметь более скоростные каналы передачи эхосигналов, и чем больше элементов в АР, тем более жесткие требования к скорости передачи. Это важная особенность работы ЦФА-дефектоскопов. Но производители элементной базы год от года предлагают всё более и более скоростные каналы, как-то USB 3.0, или EtherNet со скоростью обмена 1 Гбит/с. Оригинально эта проблема решена в автоматизированной системе «A2075 SoNet» [25], где в одном блоке размещены АР, модуль регистрации эхосигналов и модуль восстановления изображения. Поэтому на управляющий компьютер передаются не эхосигналы, а восстановленное изображение, требующее меньший объём памяти и, следовательно, меньшую скорость передачи информации по линии связи.

11. Выводы

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Для автоматизированных систем неразрушающего контроля целесообразнее использовать ЦФА-дефектоскопы, по следующим причинам:
 - 1.1. ЦФА-дефектоскопы имеют более высокое фронтальное разрешение изображения отражателей на всей ОВИ;
 - 1.2. ЦФА-изображения, полученные при механическом сканировании антенной решёткой, можно когерентно складывать. Это позволяет получить высокое и однородное фронтальное разрешение во всём визуализируемом объеме толстостенных изделий и повысить отношение сигнал/шум;
 - 1.3. Изображения, полученные методом C-SAFT, с использованием антенных решёток на призмах разной конфигурации и ориентации можно восстанавливать в единой системе координат, что облегчает совместный анализ нескольких изображений;
 - 1.4. Метод C-SAFT легко модифицируется для трёхмерной обработки эхосигналов, что приводит к повышению фронтального разрешения в дополнительной плоскости АР;
 - 1.5. ЦФА-изображения восстановленные по нескольким акустическим схемам по единой измеренным эхосигналам можно объединять в одно высококачественное изображение, что позволит надёжно автоматизировать процесс распознавания и размеривания отражателей. Решение этой проблемы особенно актуально для тонкостенных объектов контроля.

2. Если размеры дефекта не велики и он находится на линии фокусировки, то между ФАР- и ЦФА-изображениями нет принципиальной разницы при работе на прямом луче.
3. Если методика контроля основана на использовании нелинейных эффектов, то ФАР-дефектоскопы имеют неоспоримое преимущество перед ЦФА-дефектоскопами. Но в случае работы в рамках линейной акустики у ФАР-дефектоскопов нет преимуществ перед ЦФА-дефектоскопами, за исключением их большей коммерческой «раскрученности» и массированного присутствия на рынке.
4. ЦФА-дефектоскопы требуют более скоростных каналов передачи информации, в отличие от ФАР-дефектоскопов.
5. Восстановление изображений методом C-SAFT с алгоритмической точки зрения более перспективно, нежели простая аппаратная фокусировка на излучение и приём реализованная в ФАР-дефектоскопах. Все упомянутые в статье алгоритмы для получения ЦФА-изображений реализованы в макетном образце многоканального дефектоскопа «**АВГУР АРТ**».
6. С точки зрения автора, проблемы современных дефектоскопов, использующих антенные решётки, не в аппаратных средствах, а в новых нетрадиционных и эффективных алгоритмах получения информации об отражателях, имея которую можно будет уверенно автоматизировать процесс распознавания и образмеривания.

Автор выражает благодарность заместителю генерального директора по научным вопросам «НПЦ «ЭХО+» Бадаляну В.Г. и начальнику лаборатории «НПЦ «ЭХО+» Базулину А.Е. за замечания, высказанные в процессе обсуждения статьи, руководителю участка УЗК отдела ядерной безопасности и надёжности Ленинградской АЭС Шнелю О.О. за предоставление образца Ду800, а также сотрудникам научно-методического отдела «НПЦ «ЭХО+» КокOLEву С.А. и Исмаилову Г.М. за проведение многочисленных экспериментов.

12.Список литературы

- 1 Самойленко В.И., Шишов Ю.А. Управление фазированными антенными решетками. М.: Радио и связь, 1983. – 240 с.
- 2 Осипов Л. В. Ультразвуковые диагностические приборы: практ. руководство для пользователей / Л.В.Осипов. – М.: ВИДАР, 1999. – 255 с.
- 3 Гурвич А.К. Способы сканирования при ультразвуковом контроле. – В мире неразрушающего контроля, 2010, № 3 (49), с 4-6
- 4 Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Publisher: Waltham, MA : Olympus NDT, 2007. <http://www.olympus-ims.com/en/books/>
- 5 Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. О применимости технологии антенных решёток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов. - В мире неразрушающего контроля, №1 (51), март 2011, с. 64-70
- 6 Braconnier D., Okuda S., Dao G. A Detailed Study of Inspecting Thick Parts Using Large Aperture Phased Arrays and DDF. - 7th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, 12-15 May 2009, Yokohama, Japan
- 7 Миллер Э., Хилл К., Бэмбер Дж., Дикинсон Р., Фиш П., тер Хаар Г. Применение ультразвука в медицине. Физические основы. – М.: Мир, 1989. – 560 с.
- 8 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.
- 9 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.
- 10 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.
- 11 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.
- 12 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.

-
- 13 Базулин Е.Г. Восстановление изображения дефектов методом C-SAFT по эхосигналам измеренным антенной матрицей в режиме тройного сканирования. Дефектоскопия, 2012, №1, с. 3-19.
- 14 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.
- 15 Высокочастотный ультразвуковой томограф «**A1550 IntroVisor**»,
http://acsys.ru/production/?type_id=16&subtype_id=7&product_id=106
- 16 ФАР-дефектоскоп «**X-32**», <http://www.harfang.ru/content/x-32.html>
- 17 ФАР-дефектоскоп «**OMNISCAN MX**», <http://www.olympus-ims.com/ru/omniscan-mx/>
- 18 ФАР-дефектоскоп «**MULTIX POCKET 64x64**», <http://www.m2m-ndt.com/products-1-25-en.html>
- 19 ФАР-дефектоскоп «**ISONIC 2009**», <http://www.sonotronndt.com/i2009.htm>
- 20 ФАР-дефектоскоп «**Sonatest veo**»,
<http://www.metamak.com.tr/web/metamak/VEO%20%20Brochure.pdf>
- 21 ФАР-дефектоскоп «**PHASOR XS**», <http://spektr-ksk.ru/pribor.php?id=1411>
- 22 ФАР-дефектоскоп «**AGR TD**», <http://www.newcoinc.com/detail.aspx?ID=1478>
- 23 ФАР-дефектоскоп «**CTS-602**»,
http://www.siui.com/enH/products_view_c5_9_21_35_i28.html
- 24 Угрюмов Е. П. Глава 7. Программируемые логические матрицы, программируемая матричная логика, базовые матричные кристаллы / Цифровая схемотехника. Учебное пособие для вузов. Изд. 2, БХВ-Петербург, 2004. – с. 357.
- 25 Сканер-дефектоскоп «A2075 SoNet», http://acsys.ru/production/?type_id=16&subtype_id=40
- 26 Система контроля с использованием ФАР-технологии «**FlashFocus**», VF128,
<http://www.kjtd-indes.com/>
- 27 Система контроля с использованием ФАР-технологии «**MultiX**», <http://www.m2m-ndt.com/products-1-25-en.html>
- 28 Система контроля с использованием ФАР-технологии «**3D Focus-UT**»,
http://www.hitachi.com/rev/field/powersystems/_icsFiles/afieldfile/2009/04/28/r2009_02_107.pdf
- 29 Schenk Gottfried, Ploigt Roy, Dohse Elmar, Bauer Lukas, Deutsch Wolfram A. Karl, COMPAS-XXL – a novel phased array system with extended capabilities,
http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_03_28.pdf
- 30 Технология NVIDIA CUDA™, http://www.nvidia.ru/object/cuda_what_is_ru.htmlCUDA.

-
- 31 Боресков А. Харламов А, Основы работы с технологией CUDA – М.: ДМК-Пресс, 2010. – 232 с.
- 32 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.
- 33 Ермолов И.Н. К вопросу о выборе оптимальных параметров эхо-метода ультразвуковой дефектоскопии. – Дефектоскопия, 1965, №6, с. 51-61.
- 34 Кремер И.Я., Кремер А.И., Петров В.М. и др. Пространственно-временная обработка сигналов. Под ред. Кремера И.Я. - М.: Радио и связь, 1984. – 223 с.
- 35 Базулин Е.Г. Контроль заварок Ду800 антенными решётками методом тройного сканирования. – Дефектоскопия, 2010, №7, с. 498–506.
- 36 Буров В.А., Шмелёв А.А. Численное и физическое моделирование процесса томографирования на основе акустических нелинейных эффектов третьего порядка. - Акуст. журн., 2009, Т. 55, № 4-5, с. 466-480.
- 37 Solodov I.Yu, Zheng Y., Maev R.G. Nonlinear acoustic application for material characterization: A review. – Canadian Journal of Physics, 1999, V. 77, № 12, p. 927-967.