

УДК 620.179.162 : 534.87

PACS: 43.60.+d

Сегментация ультразвукового изображения отражателей, основанная на анализе близости гистограммы к распределению Рэля

Базулин Е.Г.

ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»

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

E-mail: bazulin@echoplus.ru

В настоящее время для повышения скорости подготовки протокола ультразвукового контроля и уменьшения влияния человеческого фактора активно разрабатываются системы распознавания (классификации) отражателей на основе искусственных нейронных сетей. Для более эффективной работы нейронных сетей изображения отражателей целесообразно обработать с целью повышения отношения сигнал/шум изображения и его сегментации (кластеризации). В статье предлагается метод сегментации, основанный на построении бинарной маски, скрывающей блики отражателей. Маска создаётся из условия получения максимально близкого вида гистограммы изображения к распределению Рэля. Для решения задачи поиска минимума используется генетический алгоритм. В модельных экспериментах продемонстрирована эффективность применения данного подхода для сегментации изображений отражателей, восстановленных по эхосигналам, измеренным с помощью антенных решёток. Для определения типа отражателя применялся метод, основанный на анализе амплитуд бликов изображений, восстановленных по разным акустическим схемам.

Ключевые слова: антенная решётка, цифровая фокусировка антенной (ЦФА), Full Matrix Capture (FMC), Total Focusing Method (TFM), распределение Рэля, генетический алгоритм (ГА), сегментация (кластеризация).

1 Введение

Ультразвуковой неразрушающий контроль (УЗК) широко применяется для контроля различного оборудования на таких ответственных объектах, как атомные электростанции, различные трубопроводы, оборудование нефтехимических предприятий и т.д.. Современная аппаратура для УЗК должна позволять быстро проводить регистрацию эхосигналов, восстановление изображения отражателей и его анализ на предмет определения типа

отражателя и его размеров. К сожалению, восстановленные изображения отражателей могут быть недостаточно высокого качества для быстрой подготовки протокола контроля. Ручной анализ изображений отражателей может значительно увеличить время подготовки протокола контроля и повысить вероятность принятия неправильного решения из-за усталости или недостаточной квалификации оператора. Развитие техники проведения УЗК позволяет получать изображения отражателей с достаточно высокой скоростью, используя антенные решётки, как по технологии фазированных решёток (ФАР) [1], так и по технологии цифровой фокусировки антенной (ЦФА) [2]. Совместная обработка эхосигналов, измеренных антенной решёткой при перемещении её в направлении, поперечном сварному сведению, понижает уровень шума и повышает разрешающую способность изображения. Такой метод получения изображения будем называть ЦФА-Х или режимом тройного сканирования. Тем не менее, решение задачи определения типа отражателей по их изображению остаётся сложной задачей, так как далеко не всегда удаётся полностью восстановить границу отражателя, а наличие в изображении шума и ложных бликов также усложняет решение задачи. В результате время анализа изображения оператором может стать больше, чем время регистрации эхосигналов и восстановления изображения. В статье [3] был предложен простой метод определения типа отражателя, основанный на анализе амплитуд бликов изображений, восстановленных по разным акустическим схемам.

Таким образом, создание систем автоматизированного распознавания (классификации) отражателей по их изображениям – это актуальная задача, решение которой позволит повысить скорость подготовки протокола контроля и уменьшить влияние оператора на объективность определения типа отражателя и его размеров. Бурными темпами развиваются системы автоматизированного распознавания на основе искусственных нейронных сетей [4].

Как упоминалось выше, для эффективного решения задачи распознавания целесообразно специальным образом подготовить изображение отражателей. Один из этапов – это сегментация (кластеризация) изображения. В настоящий момент для сегментации оптических изображений разработано множество методов [5]. Приведённый ниже список не претендует на полный охват всех способов сегментации.

1. Адаптивный анизотропный диффузный фильтр (в зарубежной литературе 2D или 3D AADF) [6]. В статьях [7, 8] рассмотрено применение метода AADF для обработки изображений, полученных при проведении рентгеновского контроля, а в статье [9] для повышения качества ЦФА-изображений отражателей.
2. Модифицированный метод нечёткой кластеризации C-средних (в зарубежной литературе Modified Fast Fuzzy C-Means (MFFCM)) [10].

3. Построение матрицы яркостной зависимости (в зарубежной литературе Gray Level Co-Occurrence Matrix (GLCM)) [11].
4. Метод нечёткой логики второго типа (в зарубежной литературе 2D Band-let Transform (2D BT)) [12].
5. Алгоритм вычисления порога бинаризации для полутонового изображения (Otsu's method) [13].
6. Технология Deep Claster (нейронные сети без обучения) [14].

Сегментация ЦФА-изображения должна позволить определить на изображении блики отражателей, что должно повысить достоверность и скорость анализа изображения на предмет наличия отражателя и оценки его типа. Каждый из упомянутых выше методов сегментации имеет как минусы, так и плюсы. Одни методы очень быстрые, но дают не всегда хорошие результаты. А другие методы позволяют получить хороший результат, но их быстроедействие оставляет желать лучшего. В статье предлагается метод сегментации, основанный на построении бинарной маски, скрывающей блики отражателей. Маска создаётся из условия получения максимально близкого вида гистограммы изображения, умноженного на маску, к распределению Рэля. Для решения задачи поиска минимума используется генетический алгоритм.

2 Рэлеевская сегментация изображения отражателей

Распределение Рэля – это распределение плотности вероятности случайной величины v [15], которую можно описать следующим образом

$$f(v; \sigma) = \frac{v}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{v^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

где $v \geq 0$, $\sigma > 0$ коэффициент определяющий вид распределения. Обозначим через $I(x, z)$ модуль ЦФА-изображения. В статье [16] показано, что шум ЦФА-изображения описывается распределением Рэля. Если на изображении будут присутствовать блики отражателей, то его гистограмма будет отличаться от распределения Рэля. Идея заключается в нахождении двумерной маски $M(x, z)$, которая равна нулю в области бликов, и равна единице, там где бликов нет, а есть шум изображения. Маска $M(x, z)$ подбирается так, чтобы гистограмма матрицы её поэлементного умножения на ЦФА-изображение $I(x, z)$ была максимально близка к распределению Рэля. Обозначим гистограмму произведения маски на ЦФА-изображение как

$$h(v; M(x, z)) = \mathbf{H}(M(x, z)I(x, z)), \quad (2)$$

где через \mathbf{H} обозначен оператор получения гистограммы изображения. По гистограмме $h(v; M(x, z))$ можно оценить коэффициент $\hat{\sigma}$ для наиболее близкого Распределения Рэлея [17]. Предлагаемый способ сегментации можно записать так

$$M(x, z) = \arg \min_{M(x, z) \in R^{N_x \times N_z}} (\|h(v; M(x, z)) - f(v; \hat{\sigma})\|_2), \quad (3)$$

где $\|\dots\|_2$ норма вектора в метрике L_2 . Иными словами нужно найти такую маску $M(x, z)$, которая, будучи умноженной на ЦФА-изображение $I(x, z)$, позволит получить гистограмму изображения (2) наиболее близкую к распределению Рэлея.

Если ОВИ имеет размеры $N_x \times N_z = 100 \times 100$, то нужно найти минимум функции 10 000 переменных. Для решения уравнения (3) можно использовать генетический алгоритм (ГА), который эффективно использовать для бинарных векторов большой размерности [18]. В данной статье при использовании ГА полагалось, что популяция содержит 256 членов, и существует 150 поколений.

3 Модельные эксперименты

Для регистрации эхосигналов в режиме двойного и тройного сканирования использовался дефектоскоп «АВГУР-АРТ», разработанный и изготовленный в Научно-производственном центре «ЭХО+» [19].

3.1 Образец трубопровода толщиной 65 мм с разнородным сварным соединением

В образце трубопровода толщиной 65 мм с разнородным сварным соединением было просверлено три БЦО диаметром 3 мм, отмеченные на Рис. 1 выносками с номерами от 4 до 6. Антенная решётка (5 МГц, 32 элемента, размер пьезоэлемента $0,9 \times 10$ мм, расстояние между краями элементов 0,1 мм) на плексигласовой призме 20 градусов перемещалась по поверхности образца 16 раз с шагом 0,93 мм (режим тройного сканирования) при фиксированном положении по оси y , направленной перпендикулярно плоскости рисунка. Так как наиболее сложно получить изображение самого глубокого БЦО 6, то будем рассматривать только его изображение в области восстановления изображения (ОВИ), которая на Рис. 1 показана полупрозрачным прямоугольником розового цвета¹.

¹ Использование цвета для пояснения рисунков доступно только в электронном варианте статьи или в её печатном издании журнала «Дефектоскопия»

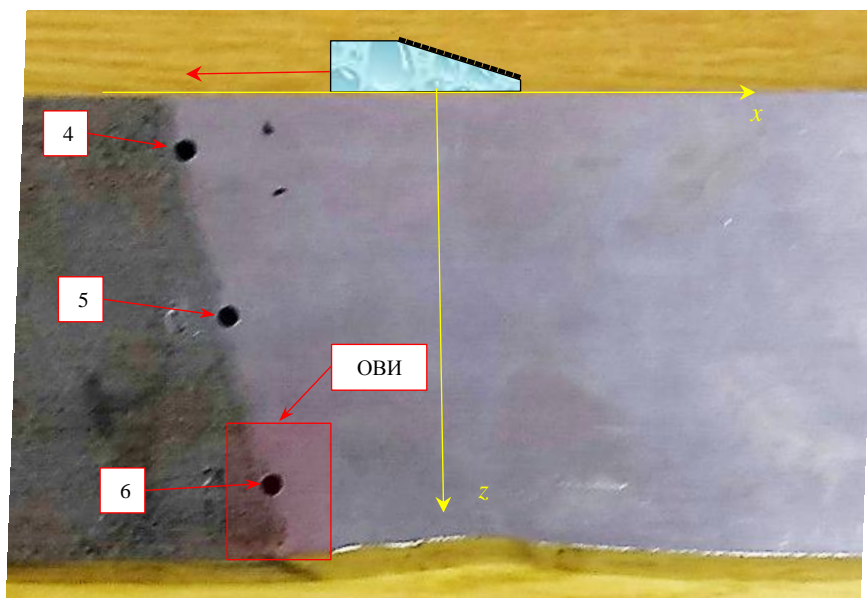


Рис. 1. Фотография образца трубопровода толщиной 65 мм с разнородным сварным соединением. Стрелкой красного цвета схематически показана апертура сканирования

На Рис. 2а показано ЦФА-Х-изображение БЦО 6, которое было получено как когерентная сумма 17 парциальных ЦФА-изображений, восстановленных для каждого положения антенной решётки в предположении, что излучается и принимается продольная волна (акустическая схема LdT). На рисунок линиями чёрного цвета нанесены контуры сварного соединения образца и БЦО 6. На ЦФА-Х-изображении блик границы БЦО 6 слабо заметен из-за достаточно высокого уровня структурного шума. Кроме того, блик границы БЦО 6 смещён от своего истинного положения, так как при восстановлении изображения полагалось, что образец однороден и изотропен. На Рис. 2б показан результат обработки методом AADF ЦФА-Х-изображения. Здесь и далее выбирался квадратичный вариант определения коэффициента диффузии [9]. Коэффициент K полагался равным 0,1 для получения максимально контрастного изменения «коэффициента диффузии». Поэтому для получения эффекта «растворения» бликов число итераций было равно 100 000. На AADF-изображении остались блики с максимальной фокусировкой, а плохо сфокусированные блики исчезли («растворились»). Средний уровень структурного шума уменьшился примерно на 6 дБ и блик границы БЦО 6 стал более заметен. На Рис. 2в показана маска ЦФА-Х-изображения, полученная по порогу бинаризации (отсечка Оцу) для полутонного изображения. Она вы-

делила более чем пять областей, которые могут соответствовать блику от реального отражателя. На Рис. 2г показана маска ЦФА-Х-изображения, полученная по предложенному алгоритму (3), который устранил практически все блики структурного шума.

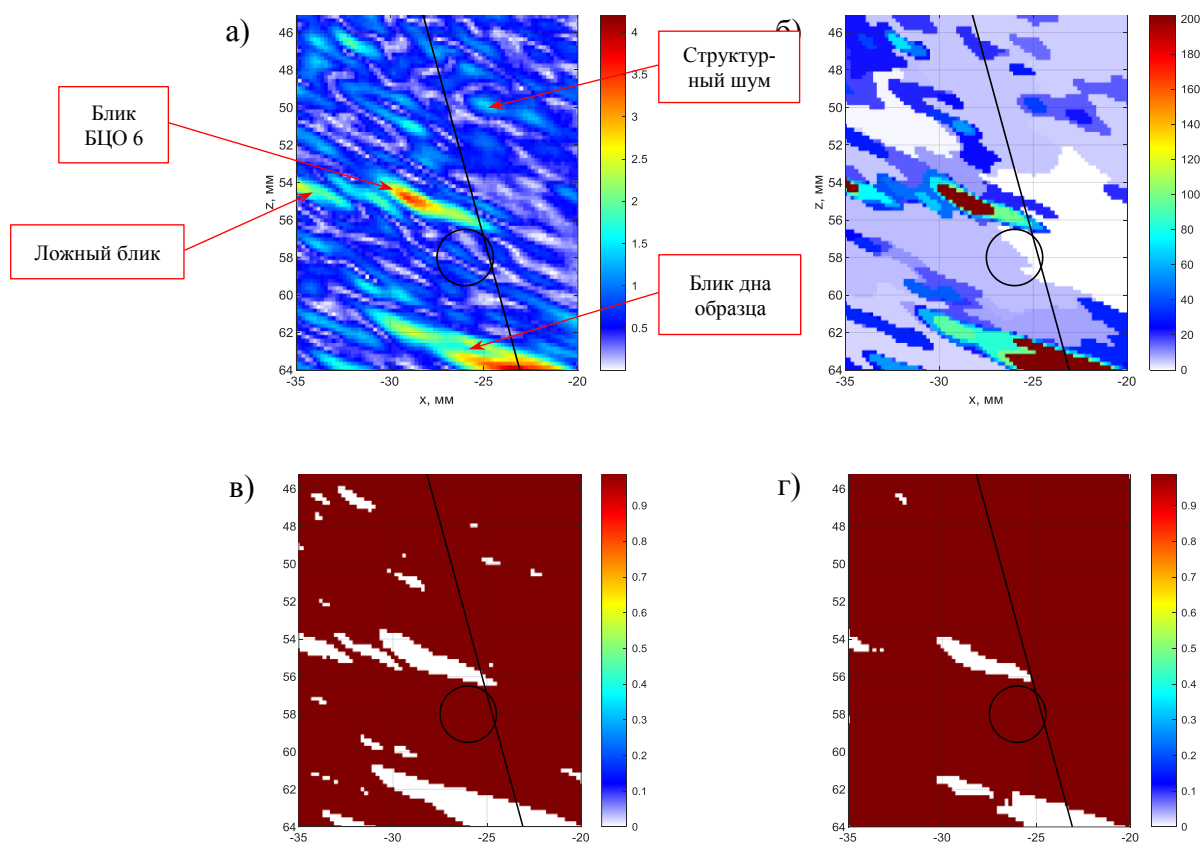


Рис. 2. ЦФА-Х-изображение БЦО 6 (а), результат обработки методом AADF (б), результат бинаризации по отсечки Оцу (в) и маска полученная по предложенному алгоритму (3) (г)

3.2 Образец корпуса парогенератора толщиной 145 мм с узким сварным соединением

В образце корпуса парогенератора толщиной 145 мм были изготовлены БЦО диаметром 3 мм и модель висящей трещины в виде электроэрозионного пропила высотой 10 мм и толщиной 0,5 мм. Антенная решётка (5 МГц, 32 элемента, размер пьезоэлемента 0,9×10 мм, расстояние между краями элементов 0,1 мм) на плексигласовой призме 20 градусов перемещалась по поверхности образца 27 раз с шагом 2 мм (режим тройного сканирования). Для оценки типа отражателя использовался подход изложенный в статье [3].

3.2.1 БЦО диаметром 3 мм на глубине 75 мм

На Рис. 3а показано ЦФА-Х-изображение БЦО диаметром 3 мм просверленного на глубине 75 мм, полученное как когерентная сумма 27 парциальных ЦФА-изображений, восстановленных для каждого положения антенной решётки в предположении, что излучение

и приём происходят на поперечной волне (акустическая схема TdT). На рисунках окружностями чёрного цвета показан контур границы БЦО. На Рис. 3а хорошо виден блик границы БЦО и ложный блик, сформированной импульсом волны обегания-соскальзывания Рэлея-ского типа. Блики, рассеянные границей сварного соединения, слабо заметны. На Рис. 2б показано изображение после обработки методом AADF, на котором остались только два блика, один из которых ложный. На Рис. 2в показана маска ЦФА-Х-изображения, полученная по порогу бинаризации (отсечка Оцу) для полутонного ЦФА-Х-изображения. Она выделила только один блик границы БЦО. На Рис. 2г показана маска ЦФА-Х-изображения, полученная по предложенному алгоритму (3), на которой, как и на AADF-изображении, остались два блика.

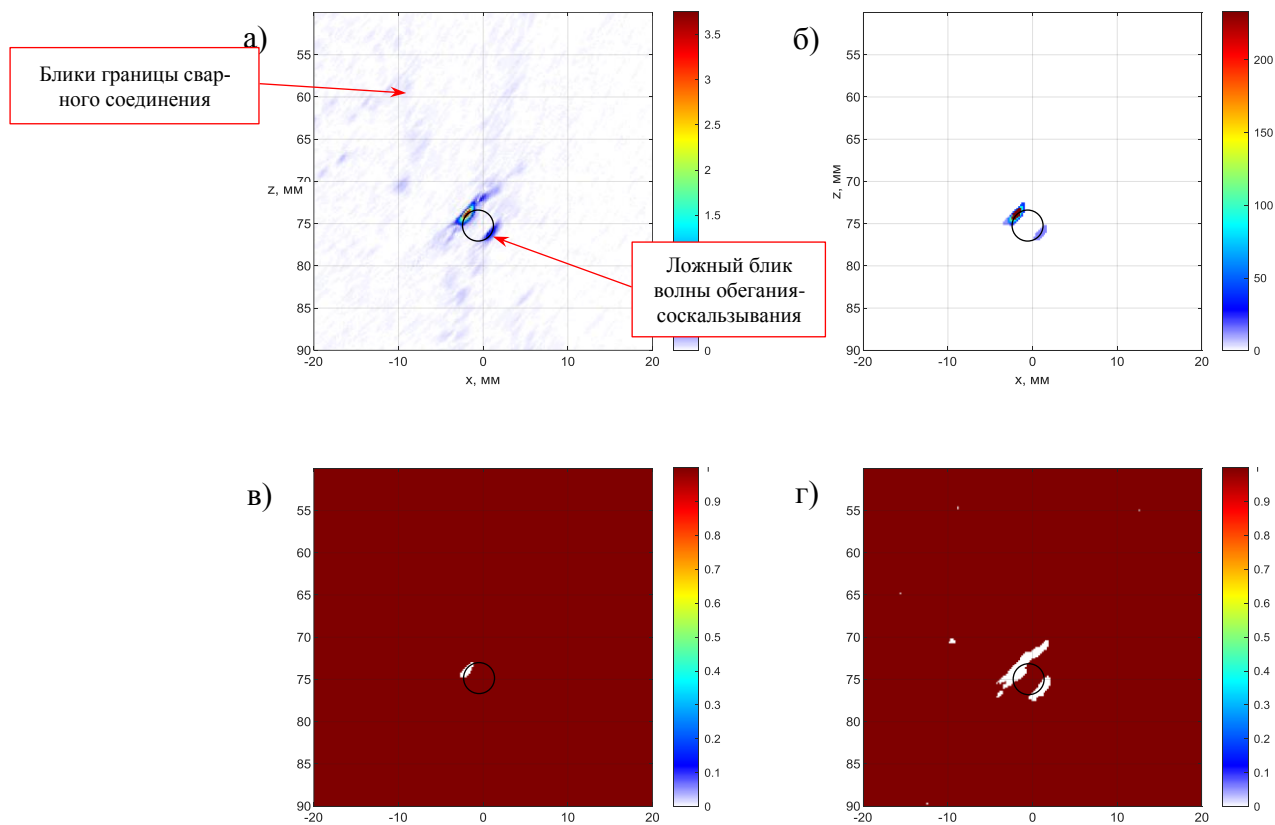


Рис. 3. ЦФА-Х-изображение БЦО, восстановленное по акустической схеме TdT (а), результат обработки методом AADF (б), результат бинаризации по отсечки Оцу (в) и маска полученная по предложенному алгоритму (3) (г)

На Рис. 4 показаны изображения подобные тем, что на Рис. 3, но восстановленные в предположении, что излучается продольная волна, а принимается поперечная (акустическая схема LdT). Амплитуда блика границы БЦО на ЦФА-Х-изображении мала (Рис. 4а),

но на AADF-изображении (Рис. 4б), и на изображении, полученном по предложенному алгоритму (3) (Рис. 4г), блик границы БЦО уверенно обнаруживается. На изображении, полученном по порогу бинаризации (отсечка Оцу), обнаружить блик границы БЦО невозможно (Рис. 4в).

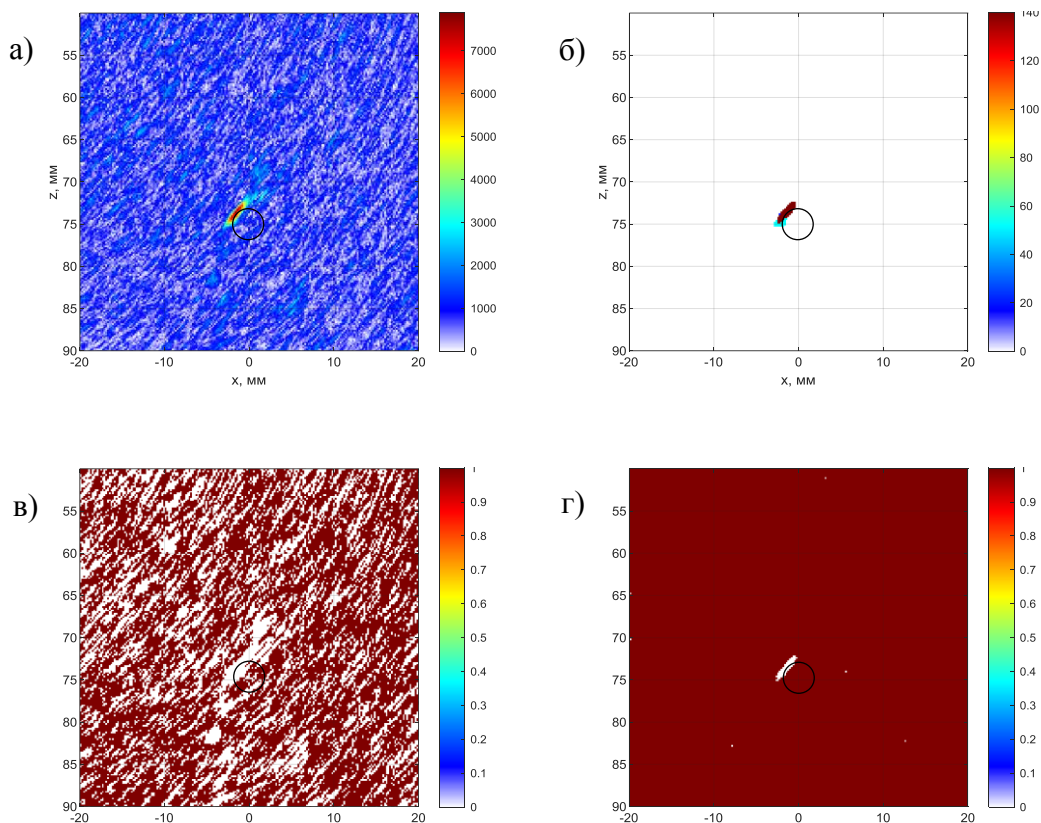


Рис. 4. ЦФА-Х-изображение БЦО, восстановленное по акустической схеме LdT (а), результат обработки методом AADF (б), результат бинаризации по отсечки Оцу (в) и маска полученная по предложенному алгоритму (3) (г)

На Рис. 5 показаны изображения подобные тем, что на Рис. 3, но восстановленные в предположении, что излучается и принимается продольная волна (акустическая схема LdT). На всех четырёх изображениях уверенно обнаруживается только один блик границы БЦО. Ложный блик, сформированный импульсом волны обегания-соскальзывания, имеет пренебрежимо малую амплитуду и ни на одном изображении не виден.

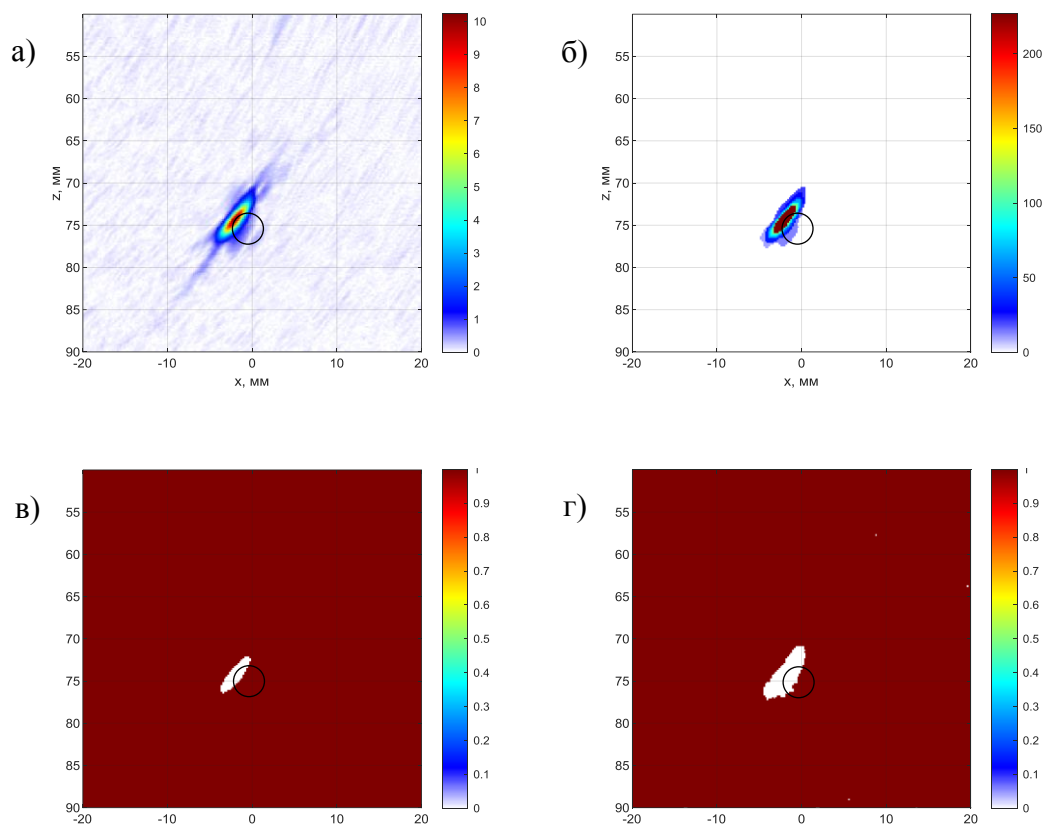


Рис. 5. ЦФА-Х-изображение БЦО, восстановленное по акустической схеме LdL (а), результат обработки методом AADF (б), результат бинаризации по отсечки Оцу (в) и маска полученная по предложенному алгоритму (3) (г)

3.2.2 Висящая трещина высотой 15 мм на глубине 105 мм

На Рис. 6а показано ЦФА-Х-изображение электроэрозионного паза высотой 15 мм и толщиной 0,5 мм с центром на глубине 105 мм, восстановленное по акустической схеме TdT. На изображении хорошо виден блик верхнего края паза, а вот определить блик нижнего края паза затруднительно. Блики, сформированные при диффузном отражении на границе сварного соединения, слабо заметны. На Рис. 6б показано изображение после обработки методом AADF, на котором остались шесть бликов, четыре из которых ложные. На Рис. 6в показана маска ЦФА-Х-изображения, полученная по порогу бинаризации (отсечка Оцу) для полутонного ЦФА-Х-изображения. Она выделила только один блик верхнего края паза. На Рис. 6г показана маска ЦФА-Х-изображения, полученная по предложенному алгоритму (3), на которой, как и на AADF-изображении, остались несколько бликов. Оценка высоты паза по самому глубокому блику на Рис. 6б и г даёт значение около 15 мм, что хорошо согласуется с истинными размерами паза.

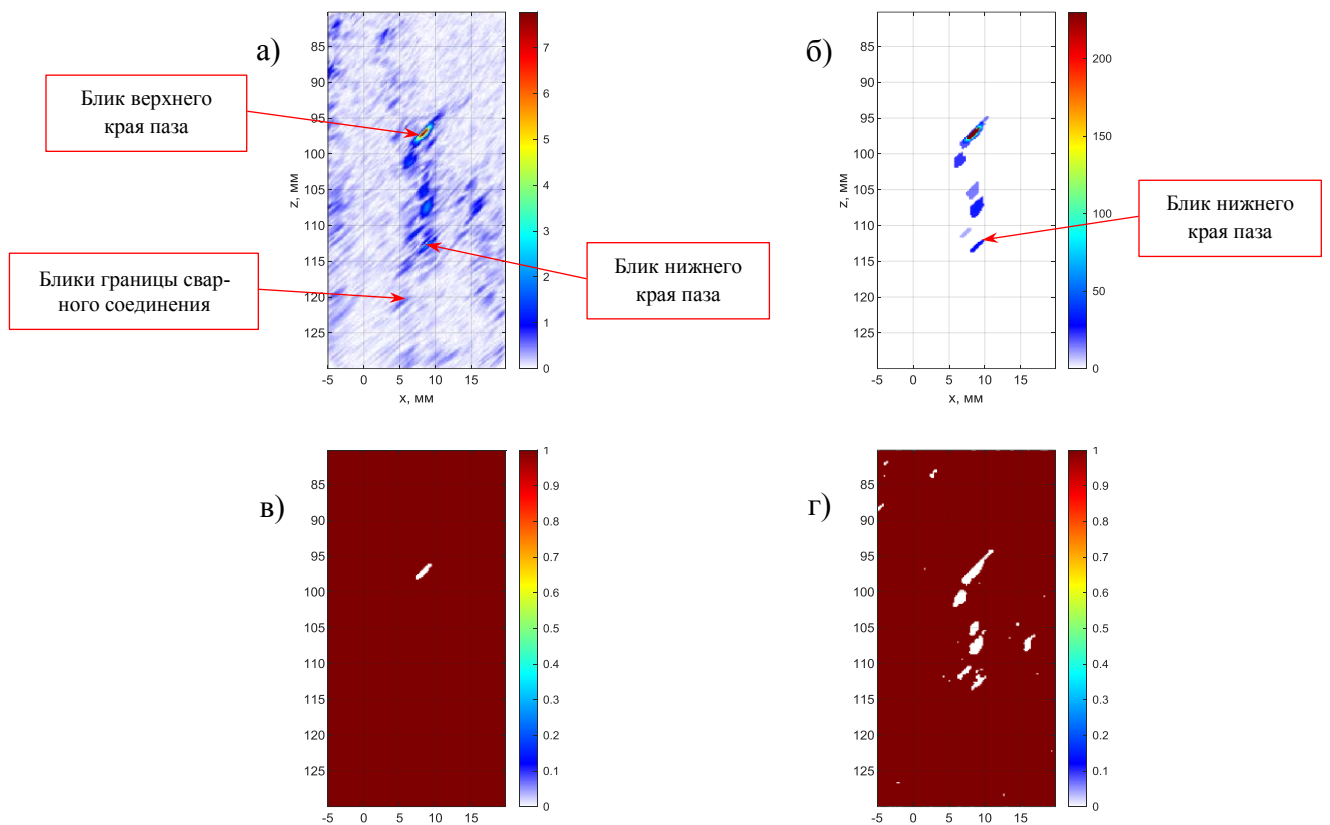


Рис. 6. ЦФА-Х-изображение электроэрозионного паза, восстановленное по акустической схеме TdT (а), результат обработки методом AADF (б), результат бинаризации по отсечки Оцу (в) и маска полученная по предложенному алгоритму (3) (г)

На Рис. 7 показаны изображения подобные тем, что на Рис. 6, но восстановленные в предположении, что излучается продольная волна, а принимается поперечная (акустическая схема LdT). На ЦФА-Х-изображении блик нижней границы паза стал более заметен (Рис. 7а). На AADF-изображении амплитуды бликов верхнего и нижнего края выровнялись и стали хорошо заметны. На изображении, полученном по предложенному алгоритму (3), вообще остались только блики краёв трещины. На изображении, полученном по порогу бинаризации (отсечка Оцу), обнаружить блики краёв паза невозможно (Рис. 7б).

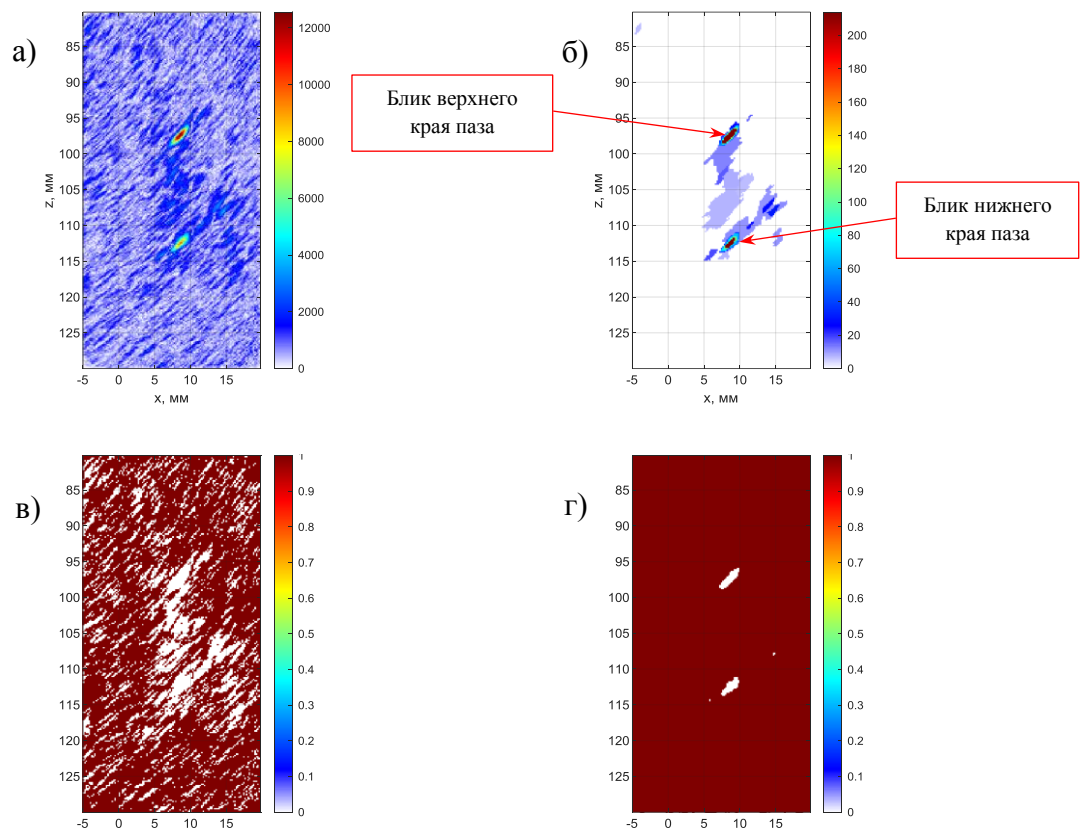


Рис. 7. ЦФА-Х-изображение электроэрозионного паза, восстановленное по акустической схеме LdT (а), результат обработки методом AADF (б), результат бинаризации по отсечки Оцу (в) и маска полученная по предложенному алгоритму (3) (г)

На Рис. 8 показаны изображения подобные тем, что на Рис. 6, но восстановленные в предположении, что излучается и принимается продольная волна (акустическая схема LdT). На изображении, полученном по порогу бинаризации (отсечка Оцу) остался только блик верхнего края паза (Рис. 8в). На остальных трёх изображениях уверенно обнаруживаются два блика краёв паза.

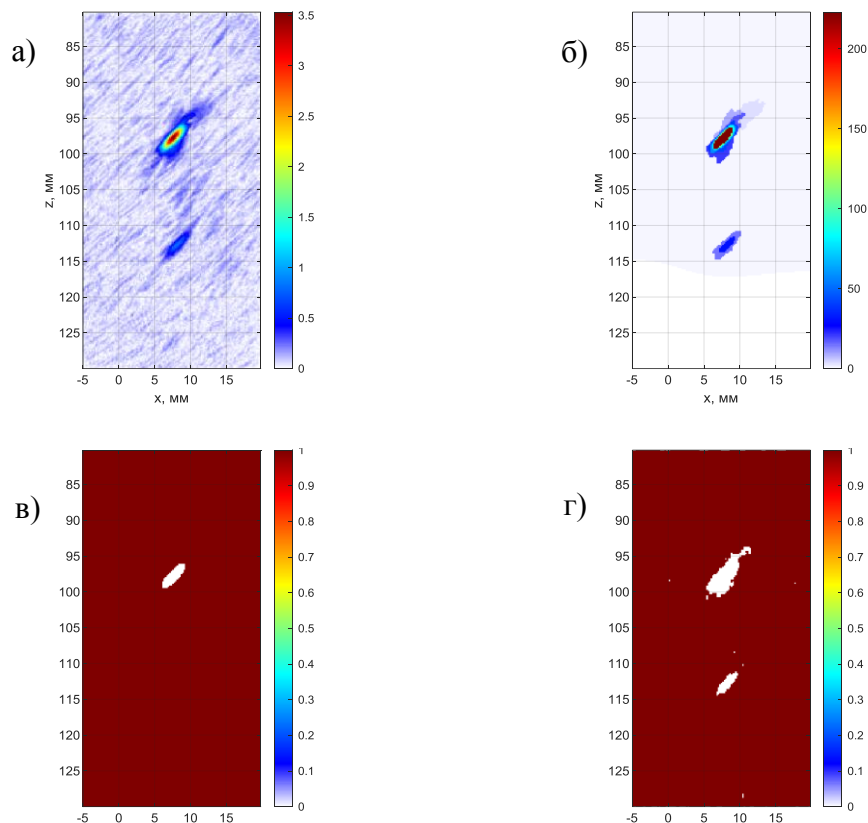


Рис. 8. ЦФА-Х-изображение электроэрозионного паза, восстановленное по акустической схеме LdL (а), результат обработки методом AADF (б), результат бинаризации по отсечки Оцу (в) и маска полученная по предложенному алгоритму (3) (г)

3.2.3 Определение типа отражателя

В статье [3] было показано, что, используя особенности поведения коэффициента отражения для разных типов волн, по ЦФА-изображениям, восстановленным только на прямом луче по разным акустическим схемам, можно сделать обоснованное заключение о типе отражателя. Если обозначить через A_{LL} , A_{LT} и A_{TT} амплитуды бликов отражателя на изображениях, восстановленных по разным акустическим схемам, то можно ввести следующий коэффициент

$$K = \frac{A_{LT}}{(A_{LL} + A_{TT})/2}.$$

Если K меньше уровня $K_{level} = 0,1$, то можно утверждать, что блик соответствует отражателю объёмного типа. Если K будет больше уровня K_{level} , то можно утверждать, что обнаруженный блик соответствует краю плоскостного отражателя. Как видно из Табл. 1, составленной по изображениям на Рис. 3а, Рис. 4а, Рис. 5а, Рис. 6а, Рис. 7а и Рис. 8а, можно по

значению коэффициента K сделать обоснованное предположение о типе отражателя. Предполагаю, что для реальной трещины с раскрытием 5..10 мкм, а не для электроэрозионного паза, сделанного с помощью пластины толщиной около 0,5 мм, значение коэффициента K только увеличится.

Табл. 1. Оценка типа отражателя

	Амплитуда блика БЦО	Амплитуда бликов краёв паза	
		Верх	Низ
Акустическая схема TdT	360 000	75 000	28 000
Акустическая схема LdT	8 000	12 800	11 000
Акустическая схема LdL	120 000	35 000	12 000
$(A_{LL} + A_{TT})/2$	240 000	55 000	20 000
K	0,03	0,23	0,55

4 Выводы

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

- Предложен метод построения бинарной маски для сегментации изображения отражателей на области, в которых блики отражателей либо есть, либо нет. Эффективность метода продемонстрирована на нескольких модельных экспериментах.
- Использование ЦФА- или ЦФА-Х-изображений, восстановленных по акустическим схемам TdT, LdT и LdL, позволяет отделить ложные блики от реальных, и тем самым повысить достоверность проведения контроля (см., например, Рис. 6, Рис. 7 и Рис. 8).
- Ещё раз подтверждена эффективность подхода определения типа отражателя (см. Табл. 1) по значениям коэффициента K , предложенного в статье [3].

20 мая, 09, 27 июня, 04, 06, 12, 14, 15 июля, 16 августа, 02 сентября 2022 года

5 Список литературы

1. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Publisher: Waltham, MA : Olympus NDT, 2007. URL: <https://www.olympus-ims.com/en/resources/books/> (дата обращения: 15 июля 2022 года)

2. Базулин Е.Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решётки или фазированные антенные решётки // Дефектоскопия. 2013. №7. С. 51-75.
3. Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Определение типа отражателя по амплитудам бликов изображений, восстановленных по разным акустическим схемам // Дефектоскопия. 2021. №4. С. 3-12.
4. Бадалян В.Г., Вopilкин А.Х. Применение нейронных сетей в ультразвуковом неразрушающем контроле (обзор) // Контроль. Диагностика. 2022. №5. С. 12-25. DOI: 10.14489/td.2022.05.pp.012-025
5. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Image_segmentation (дата обращения: 12 июля 2022 года)
6. Perona P., Malik J. Scale space and edge detection using anisotropic diffusion // IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.. 1990. V. 12, №6. P. 629-639.
7. Ben Mhamed, I., Abid, S. & Fnaiech, F. Weld defect detection using a modified anisotropic diffusion model. EURASIP J. Adv. Signal Process. 2012, 46 (2012). <https://doi.org/10.1186/1687-6180-2012-46>
8. Artyukov I.A., Irtuganov N.N. Noise-Driven Anisotropic Diffusion Filtering For X-Ray Low Contrast Imaging // Journal of Russian Laser Research. 2019. №3. P. 150-154. DOI: 10.1007/s10946-019-09782-8
9. Базулин Е.Г. Применение адаптивного анизотропного диффузного фильтра для повышения качества изображения отражателей при проведении ультразвукового неразрушающего контроля // Дефектоскопия. 2021. №5. С. 3-12.
10. Bezdek, James C. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. — 1981. — ISBN 0-306-40671-3.
11. Haralick R.M., Shanmugam K., Dinstein I. Textural Features for Image Classification// IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1973. SMC-3 (6). P. 610–621. DOI:10.1109/TSMC.1973.4309314
12. Tizhoosh H.R. Type II Fuzzy Image Segmentation. In: Bustince H., Herrera F., Montero J. (eds) Fuzzy Sets and Their Extensions: Representation, Aggregation and Models. Studies in Fuzziness and Soft Computing, 2008. V. 220. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73723-0_31
13. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1979. V. 9, № 1. P. 62-66.
14. URL: <https://neurohive.io/ru/papers/deep-claster/> (дата обращения: 12 июля 2022 года)

15. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Распределение_Рэля (дата обращения: 12 июля 2022 года)
16. Bevan R., Zhang J., Budyn N., Croxford A.J., Wilcox P.D. Experimental quantification of noise in linear ultrasonic imaging // Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2018. TUFFC-08970-2018 DOI:10.1109/TUFFC.2018.2874720
17. Джонсон, Н. Л. Одномерные дискретные распределения: Монография / Джонсон Н.Л., Коц С., Кемп А.У., - 4-е изд., (эл.) - Москва : Лаборатория знаний, 2017. - 563 с.: ISBN 978-5-00101-457-7. URL: <https://znanium.com/catalog/product/541882> (дата обращения: 12.07.2022).
18. Fraser A.S. Simulation of genetic systems // J. of Theor. Biol. 1962. Vol. 2. P. 329-346.
19. Научно-производственный центр «ЭХО+»: официальный сайт фирмы. URL: <http://www.echoplus.ru> (дата обращения: 15.07.2022).