УДК 620.179.162: 534.87

СЕГМЕНТАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЕЙ, ОСНОВАННАЯ НА АНАЛИЗЕ БЛИЗОСТИ ГИСТОГРАММЫ К РАСПРЕДЕЛЕНИЮ РЭЛЕЯ

© 2022 г. Е.Г. Базулин^{1,*}

¹ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+» Россия 123458 Москва, ул. Твардовского, 8, Технопарк «Строгино» E-mail: *bazulin@echoplus.ru

Поступила в редакцию 19.08.2022; после доработки 03.09.2022 Принята к публикации 06.09.2022

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 создается из условия получения максимально близкого вида гистограммы изображения к распределению Рэлея. Для решения задачи поиска минимума используется генетический алгоритм. В модельных экспериментах продемонстрирована эффективность применения данного подхода для сегментации изображений отражателя, восстановленных по эхосигналам, измеренным с помощью антенных решеток. Для определения типа отражателя применялся метод, основанный на анализе амплитуд бликов изображений, восстановленных по разным акустическим схемам.

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

DOI: 10.31857/S0130308222100013, EDN: BSUEMA

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 решетки как по технологии фазированных решеток (ФАР) [1], так и по технологии цифровой фокусировки антенной (ЦФА) [2]. Совместная обработка эхосигналов, измеренных антенной решеткой при перемещении ее 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. Однако решение задачи определения типа отражателей по их изображению остается сложной задачей, так как далеко не всегда удается 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]. Приведенный 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 ЦФАизображений отражателей.

2. Модифицированный метод нечеткой кластеризации С-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 нечеткой 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 быстродействие оставляет желать лучшего. В статье предлагается метод сегментации, основанный на построении бинарной маски, скрывающей блики отражателей. Маска создается из условия получения максимально близкого вида гистограммы изображения, умноженного на маску, к распределению Рэлея. Для решения задачи поиска минимума используется генетический алгоритм.

2. РЭЛЕЕВСКАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

Распределение Рэлея — это распределение плотности вероятности случайной величины *v* [15], которую можно описать следующим образом:

$$f(v;\sigma) = \frac{v}{\sigma^2} \exp(-\frac{v^2}{2\sigma^2}),\tag{1}$$

где $v \ge 0$, $\sigma > 0$ — коэффициенты, определяющие вид распределения. Обозначим через I(x, z) модуль ЦФА-изображения. В статье [16] показано, что шум ЦФА-изображения описывается распределением Рэлея. Если на изображении будут присутствовать блики отражателей, то его гистограмма будет отличаться от распределения Рэлея. 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 ее поэлементного умножения на ЦФА-изображение I(x, z) была максимально близка к распределению Рэлея. Обозначим гистограмму произведения маски на ЦФА-изображение как

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

где через **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:

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

где $\|...\|_2$ — 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 $N_x \times N = 100 \times 100$, 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 решетка (5 МГц, 32 элемента, размер пьезоэлемента 0.9×10 мм, расстояние между краями элементов 0,1 мм) на плексигласовой призме 20 град перемещалась по поверхности образца 16 раз с шагом 0.93 мм (режим тройного сканирования) при фиксированном положении по оси *у*, 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.



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

На рис. 2*а* показано ЦФА-Х-изображение БЦО 6, которое было получено как когерентная сумма 17 парциальных ЦФА-изображений, восстановленных для каждого положения антенной решетки в предположении, что излучается и принимается продольная волна (акустическая схема LdT). На рисунок линиями черного 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 смещен от своего истинного положения, так как при восстановлении изображения полагалось, что образец однороден и изотропен. На рис. 2*6* показан результат обработки методом ААDF ЦФА-Х-изображения. Здесь и далее выбирался квадратичный вариант определения коэффициента диффузии [9]. Коэффициент *K* полагался равным

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



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

0,1 для получения максимально контрастного изменения «коэффициента диффузии». Поэтому для получения эффекта «растворения» бликов число итераций было равно 100 000. На AADFизображении 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. 26 показана маска ЦФА-Х-изображения, полученная по порогу бинаризации (отсечка Оцу) для полутонового изображения. Она выделила более чем пять областей, которые могут соответствовать блику от реального отражателя. На рис. 2*г* показана маска ЦФА-Х-изображения, полученная по предложения, которые могут соответствовать блику от реального отражателя. На рис. 2*г* показана маска ЦФА-Х-изображения, полученная по предложенному алгоритму (3), который устранил практически все блики структурного шума.

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 решетка (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. 3*а* 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 решетки в предположении, что излучение и прием происходят



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

на поперечной волне (акустическая схема TdT). На рисунках окружностями черного цвета показан контур границы БЦО. На рис. За хорошо виден блик границы БЦО и ложный блик, сформированной импульсом волны обегания—соскальзывания рэлеевского типа. Блики, рассеянные границей сварного соединения, слабо заметны. На рис. Зб показано изображение после обработки методом AADF, на котором остались только два блика, один из которых ложный. На рис. Зв показана маска ЦФА-Х-изображения, полученная по порогу бинаризации (отсечка Оцу) для полутонового ЦФА-Х-изображения. Она выделила только один блик границы БЦО. На рис. Зг показана маска ЦФА-Х-изображения, полученная по предложенному алгоритму (3), на которой, как и на AADF-изображении, остались два блика.

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. 4a), но на AADF-изображении (рис. 4δ) и на изображении, получено по предложенному алгоритму (3) (рис. 4ϵ), блик границы БЦО уверенно обнаруживается. На изображении, полученном по порогу бинаризации (отсечка Оцу), обнаружить блик границы БЦО невозможно (рис. 4ϵ).

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 четырех 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.

3.2.2. Висящая трещина высотой 15 мм на глубине 105 мм

На рис. 6*а* 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



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



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



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

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. 66 показано изображение после обработки методом AADF, на котором остались шесть бликов, четыре из которых ложные. На рис. 66 показана маска ЦФА-Х-изображения, полученная по порогу бинаризации (отсечка Оцу) для полутонового 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. 66 и г дает значение около 15 мм, что хорошо согласуется с истинными размерами паза.

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. 7*a*). На AADFизображении амплитуды бликов верхнего и нижнего края выровнялись и стали хорошо заметны. На изображении, полученным по предложенному алгоритму (3), вообще остались только блики краев трещины. На изображении, полученном по порогу бинаризации (отсечка Оцу), обнаружить блики краев паза невозможно (рис. 7*в*).

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. 8*в*). На остальных трех изображениях уверенно обнаруживаются два блика краев паза.

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



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



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

обозначить через A_{LL} , A_{LT} и A_{TT} амплитуды бликов отражателя на изображениях, восстановленных по разным акустическим схемам, то можно ввести следующий коэффициент:

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

Если *К* меньше уровня $K_{level} = 0,1$, то можно утверждать, что блик соответствует отражателю объемного типа. Если *К* 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. 3*a*, рис. 4*a*, рис. 5*a*, рис. 6*a*, рис. 7*a* и рис. 8*a*, можно по значению коэффициента *К* сделать обоснованное предположение о типе отражателя. Полагаю, 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 *К* только увеличится.

Таблица 1

	Амплитуда блика БЦО	Амплитуда бликов краев паза	
		Bepx	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
Κ	0,03	0,23	0,55

Оценка типа отражателя

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).

Еще раз подтверждена эффективность подхода определения типа отражателя (см. табл. 1) по значениям коэффициента *K*, предложенного в статье [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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).
Базулин Е.Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих

антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51—75.

3. *Bazulin E.G., Vopilkin A.Kh., Tikhonov D.S.* Determining the Type of Ref lector from Amplitudes of Flares Reconstructed in Various Acoustic Schemes // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 4. Р. 251—260. [*Базулин Е.Г., Вопилкин А.Х., Тихонов Д.С.* Определение типа отражателя по амплитудам бликов изображений, восстановленных по разным акустическим схемам // Дефектоскопия. 2021. \mathbb{N}° 4. С. 3—12.]

4. Бадалян В.Г., Вопилкин А.Х. Применение нейронных сетей в ультразвуковом неразрушающем контроле (обзор) // Контроль. Дианостика. 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. V. 46. 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. *Bazulin E.G.* Application of Adaptive Anisotropic Diffusion Filter To Improve the Ref lector Image Quality when Performing Ultrasonic Nondestructive Testing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 5. P. 343—351. [*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. No. 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/Paспределение_Рэлея (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 Fre-quency Control. 2018. TUFFC-08970-2018. DOI: 10.1109/TUFFC.2018.2874720

17. Джонсон Н.Л., Коц С., Кемп А.У. Одномерные дискретные распределения / Монография, 4-е изд. (эл.) М.: 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. V. 2. P. 329-346.

19. Научно-производственный центр «ЭХО+»: официальный сайт фирмы. URL: http://www. echoplus.ru (дата обращения: 15.07.2022).