

ПОВЫШЕНИЕ СКОРОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ЭХОСИГНАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ ЗА СЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОРЕЖИВАНИЯ КОММУТАЦИОННОЙ МАТРИЦЫ С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

© 2021 г. Е.Г. Базулин^{1,*}, Л.В. Медведев²

¹ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+», Россия 123458 Москва, ул. Твардовского, 8,
Технопарк «Строгино»

²Московский Энергетический Институт (Национальный исследовательский университет),
Россия 111250 Москва, Красноказарменная ул., 14

*E-mail: bazulin@echoplus.ru

Поступила в редакцию 03.09.2021; после доработки 11.10.2021

Принята к публикации 11.10.2021

Для повышения скорости регистрации эхосигналов и повышения скорости восстановления изображения отражателей предложено использовать прореженную коммутационную матрицу (SMC). Для получения коммутационной матрицы, позволяющей получать изображения минимально отличающиеся от изображения, полученного по полной коммутационной матрице (FMC), предложено использовать генетический алгоритм. Рассмотрено два варианта оптимизации коммутационной матрицы: поэлементное прореживание и прореживание по столбцам. В численном и модельных экспериментах показано, что определенная с помощью генетического алгоритма прореженная коммутационная матрица, заполненная на 25 %, позволяет сформировать изображения, отличающиеся от изображения, полученного по FMC, с ошибкой около 3 %. Работа с коммутационной матрицей по столбцам позволяет повысить скорость регистрации эхосигналов в 4 раза. Во столько же раз повышается скорость восстановления изображения.

Ключевые слова: антенная решетка, коммутационная матрица, двойное сканирование, Full Matrix Capture (FMC), Sparse Matrix Capture (SMC), тройное сканирование, C-SAFT, Total Focusing Method (TFM), цифровая фокусировка антенной решеткой (ЦФА), генетический алгоритм (ГА).

DOI: 10.31857/S0130308221110026

1. ВВЕДЕНИЕ

Одна из практических задач ультразвукового контроля — это уменьшение интервала времени от начала регистрации эхосигналов до выдачи заключения. Поэтому повышение скорости регистрации эхосигналов антенной решеткой, уменьшение их объема и времени восстановления изображения отражателей являются актуальными задачами.

Применение метода цифровой фокусировки антенной решеткой (ЦФА) предполагает излучение зондирующего сигнала и регистрацию эхосигналов всеми парами антенной решетки (АР). Матрицу, в которой единицами отмечены активные пары «излучатель—приемник», будем называть коммутационной. Набор эхосигналов, при излучении одним элементом АР и принятый всеми элементами АР, будем называть выстрелом. При использовании 32-элементной АР нужно излучить 32 раза зондирующий сигнал и каждый раз измерить 32 выстрела, то есть залп, состоящий из 1024 эхосигналов (100 % заполнение коммутационной матрицы единицами). Для 64-элементной АР на регистрацию 4096 эхосигналов нужно уже 64 такта на излучение. Работа в режиме ЦФА-Х, когда изображение формируется по эхосигналам, измеренным в нескольких положениях АР, делает проблему еще более актуальной.

Для повышения скорости регистрации эхосигналов разработаны разные методы. Например, метод Plane Wave Imaging (PWI) [1], позволяющий получать изображения отражателей при излучении порядка 10 плоских волн в объект контроля (ОК). Это повышает скорость регистрации примерно в три раза для 32-элементной АР, работающей в режиме ЦФА. Один из недостатков метода PWI заключается в том, что с его помощью можно получить качественное изображение в ограниченном объеме ОК. Метод Code Division Multiple Access (CDMA) позволяет одновременно излучать всеми элементами АР, каждому из которых приписан зондирующий импульс из ортогонального набора кодовых последовательностей [2], т.е. в идеальном случае эхосигналы можно измерить за один такт — в 32 раза быстрее, чем в режиме ЦФА. Однако для данного метода характерен достаточно большой межканальный шум после декодирования эхосигналов с помощью согласованной фильтрации из-за малой длины кодовых последовательностей. Существует ряд нелинейных методов, позволяющих получать высококачественные изображения по эхосигналам, измерен-

ным с нарушением теоремы Котельникова. К таким методам относятся метод максимальной энтропии [3] и метод распознавания со сжатием Compressive Sensing (CS) [4]. Нелинейные методы позволяют восстанавливать изображения отражателей со сверхразрешением по экосигналам нескольких выстрелов. Недостатком этих методов является достаточно большое время проведения расчетов.

Возникает простая мысль — прореживать коммутационную матрицу. Такая матрица в зарубежной литературе называется Sparse Matrix Capture (SMC) [5]. Заполняя единицами только нижний или верхний треугольник коммутационной матрицы (Half Matrix Capture (HMC) [5]), можно примерно на 50 % уменьшить объем измеряемых экосигналов [6], но при этом не удастся увеличить скорость регистрации экосигналов, так как придется излучить зондирующий сигнал каждым элементом решетки. Случайное 25 % прореживание коммутационной матрицы приводит к заметному повышению шума изображения отражателей. Перебирая разные варианты случайной коммутационной матрицы можно выбрать вариант, минимально отличающийся от идеального изображения, полученного по 100 % коммутационной матрице. Но гарантии, что подобранная коммутационная матрица будет оптимальной, нет. С подобной проблемой сталкиваются и при управлении фазированными антенными матрицами (АМ) самолетов. Проблема в том, чтобы, используя меньше 50 % элементов фазированной АМ, получить максимально узкую диаграмму направленности при минимальном уровне ее боковых лепестков. Эта задача успешно решается при использовании генетического алгоритма (ГА) [7]. Применение ГА может позволить сформировать прореженную коммутационную матрицу, позволяющую получить ЦФА-изображение отражателей с минимальным увеличением шума [8].

2. ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ

Генетический алгоритм (ГА) — это метод поиска глобального экстремума функции, основанный на принципе естественного отбора [9]. Процесс естественного отбора начинается с отбора наиболее приспособленных особей из популяции. Они производят потомство, которое наследует характеристики родителей и которое будет добавлено к следующему поколению. Если родители имеют лучшую физическую форму (функцию приспособляемости), то их потомство будет лучше, чем родители, и у него будет больше шансов выжить. Этот процесс повторяется итерационно до тех пор, пока не будет найдено поколение с наиболее приспособленными особями. ГА относится к классу методов направленного случайного поиска экстремумов функций и эффективнее, чем простой случайный поиск [10].

3. ИДЕЯ ПРИМЕНЕНИЯ

В нашем случае особь — это вариант прореженной коммутационной матрицы, нули и единицы которой рассматриваются как ее «гены». Функция, определяющая ее приспособляемость, — это отличие ЦФА-изображения, полученного с использованием прореженной коммутационной матрицы (SMC), от идеального ЦФА-изображения, восстановленного по полной коммутационной матрице (FMC). В качестве отличия (функции приспособляемости) можно рассматривать разные критерии: модуль максимальной разницы, среднеквадратичное отклонение, среднее значение изображения, дисперсия разницы двух изображений, размеры блика отражателя, уровень спеклового шума и прочее. Далее в расчетах использовалась функция приспособляемости в виде среднеквадратичной разницы между двумя изображениями.

На первом этапе определяется оптимальная прореженная коммутационная матрица. Для этого нужно рассчитать экосигналы от отражателей заданного типа, расположенных по всей области восстановления изображения (ОВИ), и восстановить идеальное ЦФА-изображение по полной коммутационной матрице. Тип антенной решетки, тип призмы, ее расположение относительно сварного соединения и размеры ОВИ определяются конкретной методикой контроля. Такой расчет проводится один раз. На втором этапе рассчитанная прореженная коммутационная матрица используется для регистрации экосигналов при проведении контроля.

Отметим, что ГА может работать в двух режимах: поэлементная оптимизация коммутационной матрицы, что дает больше возможностей для манипуляций с «генами», которых для 32-элементной решетки будет 1024, и оптимизация по выстрелам, каждому из которых в коммутационной матрице соответствует столбец. Во втором случае длина «гена» будет равна 32, но только в этом случае можно ускорить измерение экосигналов.

4. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Расчет эхосигналов, рассеянных пятью точечными отражателями, проводился для одного положения АР (32 элемента, размер элемента 0,55 мм, зазор между их краями 0,05 мм, частота 5 МГц), работающей без призмы. Полагалось, что ультразвук распространяется в образце, изготовленном из стали Ст20. На рис. 1а показано идеальное изображение¹, восстановленное по полной коммутационной матрице, а на рис. 1б — изображение при использовании прореженной коммутационной матрицы, показанной на рис. 1г, полученной случайным прореживанием. Далее в разделе будем полагать, что коммутационная матрица прореживается до 25 %, то есть в коммутационной матрице содержится 256 единиц, в результате чего будет измерено не 1024, а 256 эхосигналов. На рис. 1в показан модуль разницы между двумя изображениями. Среднеквадратичное отклонение между ними равно 1,92, а модуль максимальной разницы равен 9,2 %. Изображение, полученное по прореженной коммутационной матрице, по сравнению с идеальным изображением имеет более высокий уровень фоновых шумов, в котором имеются ложные блики, и конечно оно является более сложным для анализа оператором.

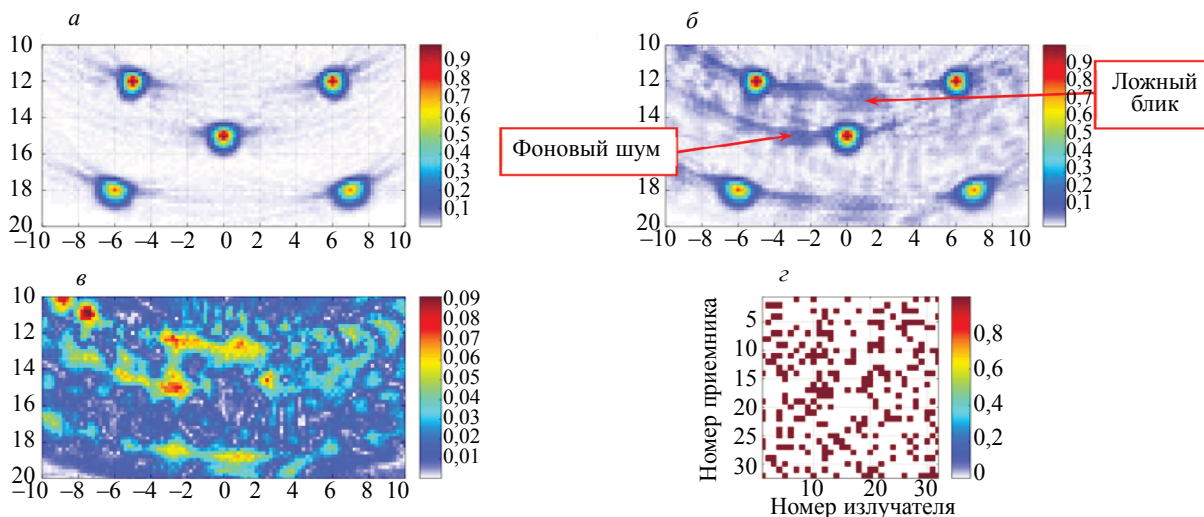


Рис. 1. Случайное прореживание коммутационной матрицы:

а — идеальное ЦФА-изображение; б — ЦФА-изображение, восстановленное по прореженной коммутационной матрице; в — модуль разницы двух изображений; г — прореженная коммутационная матрица.

Перебрав 200 вариантов случайного заполнения коммутационной матрицы, удалось получить изображение со среднеквадратичным отклонением от идеального равным 1,51 (рис. 2а), что лучше, чем у изображения на рис. 1б. Вновь полученное изображение более высокого качества, так как отличие от идеального изображения уменьшилось с 9,22 до 7,5 %. Увеличивая количество случайных вариантов коммутационной матрицы до 2 000, можно получить изображение еще ближе к идеальному. Но такой подбор носит исключительно случайный характер и не гарантирует получения оптимального результата даже при случайном переборе 20 000 или 200 000 вариантов коммутационной матрицы. Формирование коммутационной матрицы с помощью ГА позволяет оптимизировать расположение элементов для ее 25 % заполнения с более высокой вероятностью. На рис. 2б показано восстановленное изображение, которое приближено по качеству к изображению на рис. 1а, полученному по полной коммутационной матрице. Среднеквадратичное отклонение от идеального изображения уменьшилось практически на 9 дБ — с 1,51 до 0,58, а максимальное отклонение уменьшилось с 7,5 до 3,3 %, то есть на 7 дБ. Формирование коммутационной матрицы по выстрелам с помощью ГА позволяет получить изображение (рис. 2в) несколько худшего качества, чем на рис. 2б: среднеквадратичное отклонение с 0,58 возросло до 0,75, а максимальное отклонение возросло с 3,3 до 4,6 %. Но незначительное ухудшение качества изображения порядка

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

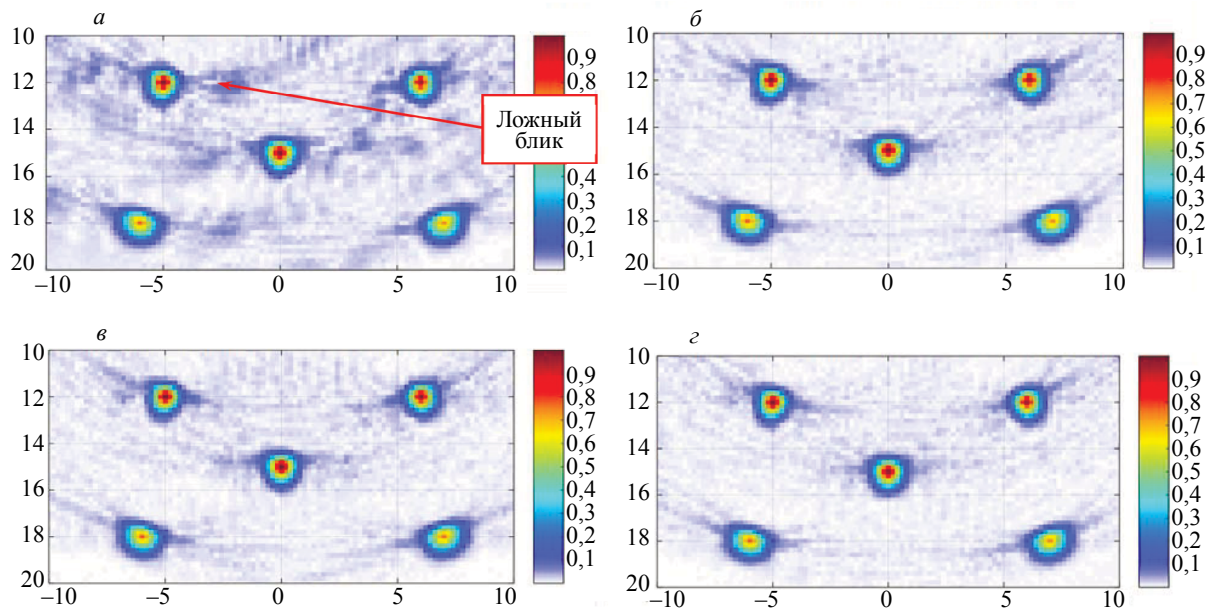


Рис. 2. ЦФА-изображение, полученное по прореженной коммутационной матрицы:

а — случайное прореживание; *б* — ГА полной матрицы; *в* — ГА матрицы по выстрелам; *г* — ГА полной матрицы в режиме миграции.

3 дБ позволяет в четыре раза повысить скорость регистрации эхосигналов. Работа с ГА в режиме миграции, когда создаются несколько подмножеств коммутационных матриц (субпопуляций особей), которые по прошествии заданного количества итераций обмениваются «генами» лучших вариантов коммутационных матриц, повышает вероятность попасть в глобальный минимум функции приспособляемости (рис. 2г). Среднеквадратичное отклонение уменьшилось до 0,539 (на 0,7 дБ меньше, чем на рис. 2б), а максимальное отклонение уменьшилось до 2,83 % (на 1,3 дБ меньше, чем рис. 2б). Разница между изображениями на рис. 2б и 2г незначительная.

При анализе изображения оператором очень важным аспектом является выбор палитры, так как некоторые цветные палитры неявно проводят операцию отсечки изображения. На рис. 3а в черно-белой палитре показано идеальное ЦФА-изображение, а на рис. 3б — изображение по прореженной коммутационной матрице. Изображения визуально отличаются незначительно, хотя максимальная разница между изображениями достигает 4,8 %.

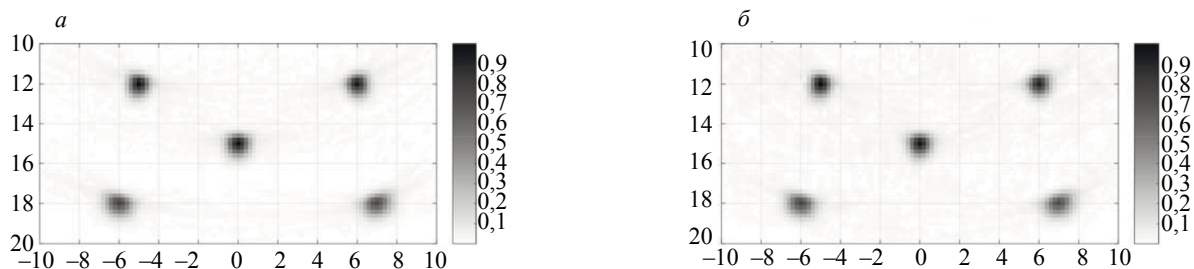


Рис. 3. ЦФА-изображение, представленное в черно-белой палитре:

а — идеальное изображение; *б* — изображение по прореженной коммутационной матрице.

Также нужно учитывать, что оператор может работать с изображением отражателей, обработанным алгоритмами, повышающими качество изображения. Это может быть операция сглаживания, операция отсечки, применяемые для повышения отношения сигнал/шум. Возможна обработка изображения текстурным фильтром, например, адаптивным анизотропным диффузным фильтром (AADF) [11], который выделяет на изображении блики с самыми резкими границами и значительно уменьшает уровень фонового шума.

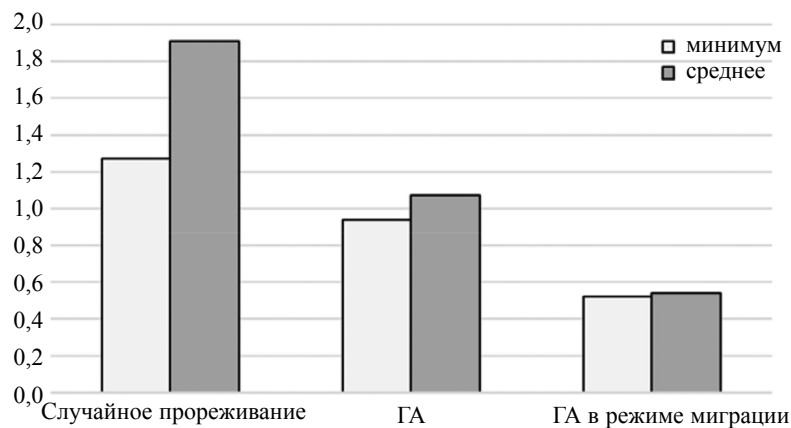


Рис. 4. Средние и лучшие решения, полученные при прореживании коммутационной матрицы.

Выбор функции пригодности очень ответственное дело и представляет собой отдельную тему для исследований. Важным моментом является и тот факт, что каждый элемент коммутационной матрицы может быть равен не только нулю или единице, как полагалось в данной статье, а может быть равным числу в интервале $[0, 1]$. При таком подходе можно дополнительно уменьшить уровень шума, но за счет некоторого ухудшения разрешающей способности изображения [12].

В качестве обобщения результатов, изложенных в этом разделе, на рис. 4 показаны средние (столбцы темно-серого цвета) и лучшие значения (столбцы светло-серого цвета) среднеквадратических отклонений между изображениями при прореживании коммутационной матрицы случайным образом (при использовании ГА и при использовании ГА в режиме миграции). Лучший результат расчета коммутационной матрицы при случайном прореживании имеет среднеквадратичную ошибку на 7,4 дБ больше, чем в случае применения ГА в режиме миграции. Отметим, что при прореживании коммутационной матрицы по выстрелам в случае применения ГА в режиме миграции решение часто приходило в глобальный минимум, так как длина гена была равна всего 32.

5. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Модельные эксперименты проводились с использованием дефектоскопа «АВГУР АРТ», разработанного и изготавливаемого в «Научно-производственном центре «ЭХО+» [13].

5.1. Образец Т-Б-39-60-Пл, режим ЦФА

Образец представляет собой плексигласовый параллелепипед толщиной 60 мм, в котором сделано шесть пронумерованных, как показано на рис. 5, боковых цилиндрических отверстий (БЦО) диаметром 1,5 мм. Эхосигналы регистрировались неподвижной АР (5 МГц, 64 элемента, размер пьезоэлемента $0,55 \times 10$ мм, зазор между пьезоэлементами 0,05 мм).

На первом этапе прореживание коммутационной матрицы до 25 % с помощью ГА позволило получить изображение, отличающееся от идеального по критерию максимальной разницы всего на 1,6 % и по среднеквадратичному отклонению на 0,21. Прореживание коммутационной матрицы до 16 выстрелов позволило восстановить изображение, отличающееся от идеального по критерию максимальной разницы всего на

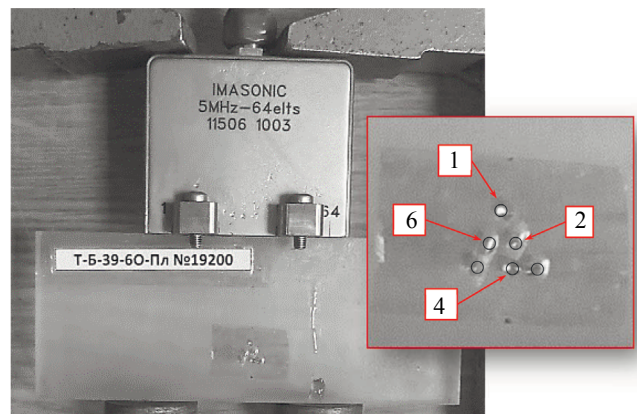


Рис. 5. Фотография образца и используемой АР.

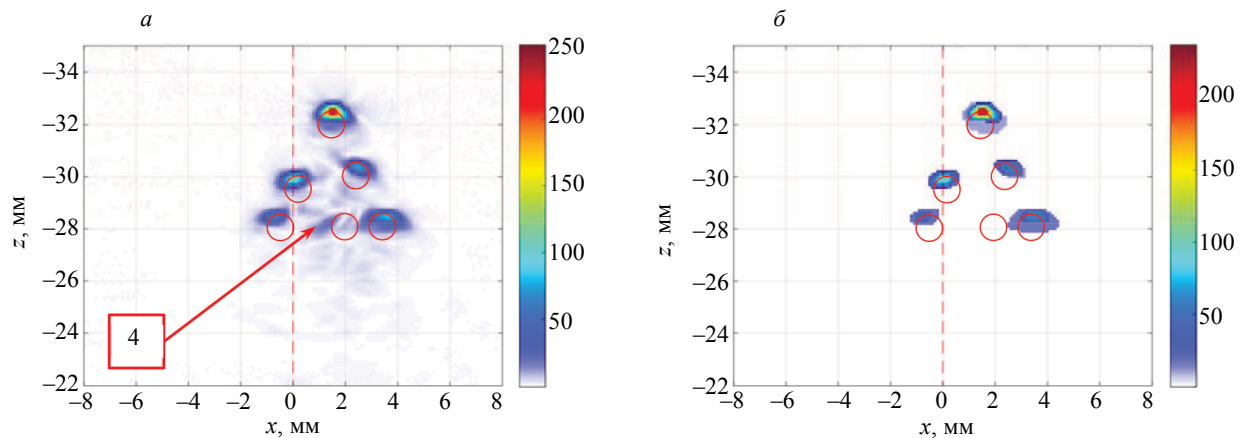


Рис. 6. Идеальное ЦФА-изображение (а) и результат его обработки AADF (б).

1,4 % и по среднеквадратичному отклонению на 0,19. Пять точечных отражателей распределялись по углам и центру ОВИ, размеры которой можно оценить по рис. 6.

На рис. 6 показано идеальное ЦФА-изображение (а) и результат его обработки текстурным фильтром AADF (б). На обоих изображениях различимы пять из шести БЦО. Изображение границы БЦО № 4 восстановить не удалось, так как он затенен другими БЦО. На рис. 6 окружностями красного цвета показаны контуры шести БЦО.

На втором этапе рассчитанная прореженная коммутационная матрица использовалась для регистрации эхосигналов при проведении контроля. На рис. 7а показано ЦФА-изображение, восстановленное с использованием прореженной до 25 % коммутационной матрицы. Полученное ЦФА-изображение отличается от идеального по критерию максимальной разницы на 2,3 % и по среднеквадратичному отклонению на 0,27. Уровень фонового шума ЦФА-изображения по сравнению с изображением на рис. 6а увеличился незначительно — меньше, чем на 2 дБ, и на нем также хорошо видны блики пяти БЦО. На рис. 7б представлено ЦФА-изображение, восстановленное с использованием прореженной до 16 выстрелов коммутационной матрицы. ЦФА-изображение отличается от идеального по критерию максимальной разницы на 1,9 % и по среднеквадратичному отклонению на 0,21, что очень близко к разнице между изображениями, полученной при расчете коммутационной матрицы на первом этапе.

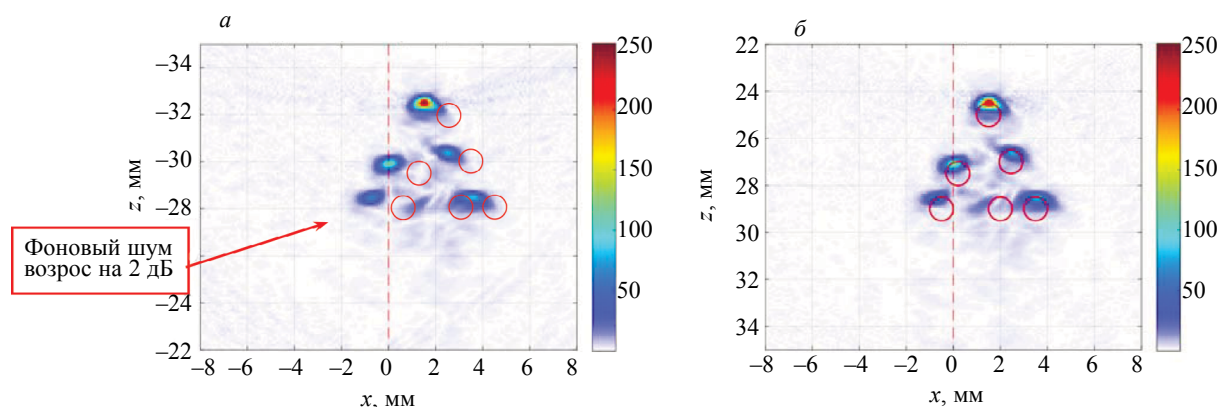


Рис. 7. ЦФА-изображение, восстановленное с использованием коммутационной матрицы, прореженной до 25 % (а), и коммутационной матрицы, прореженной до 16 выстрелов (б).

После обработки AADF изображений на рис. 7 блики границ БЦО по форме отличаются от представленных на рис. 6б буквально на несколько пикселей, а различие по амплитуде около 1 дБ. Можно предположить, что при работе с AADF-изображениями коммутационную матрицу можно проредить больше чем на 25 %, что позволит еще больше повысить скорость регистрации эхосигналов.

5.2. Образец СО-1, режим ЦФА-Х

Для регистрации в образце СО-1 эхосигналов в режиме ЦФА-Х в трех положениях с шагом 9,8 мм (апертура сканирования схематически показана на рис. 8 стрелкой красного цвета) использовалась АР (5 МГц, 32 элемента, размер пьезоэлемента 0,55×10 мм, зазор между пьезоэлементами 0,05 мм). Восстанавливались изображения БЦО с центрами на глубинах 25, 30 и 35 мм. ОВИ показана на рис. 8 четырехугольником с полупрозрачной заливкой красного цвета.

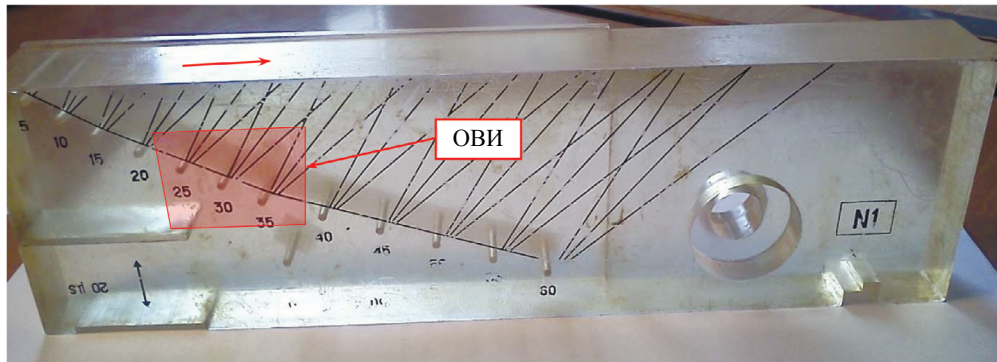


Рис. 8. Образец СО-1.

На первом этапе прореживание коммутационной матрицы до 25 % с помощью ГА для каждого положения АР позволило получить изображение, отличающееся от идеального по критерию максимальной разницы на 3,4 % и по среднеквадратичному отклонению на 0,79. Прореживание коммутационной матрицы до 8 выстрелов для каждого положения АР позволило получить изображение, отличающееся от идеального по критерию максимальной разницы на 3,5 % и по среднеквадратичному отклонению на 1,1. Восемь точечных отражателей распределялись по всей ОВИ, размеры которой можно оценить по рис. 9.

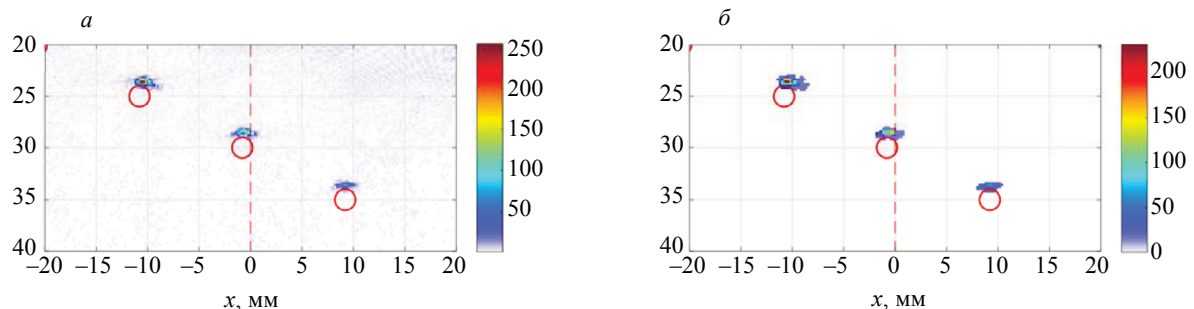


Рис. 9. Идеальное ЦФА-Х-изображение (а) и результат его обработки AADF (б).

На рис. 9 показано идеальное ЦФА-Х-изображение (а) и результат его обработки AADF (б). На изображениях окружностями красного цвета показаны контуры трех БЦО.

На втором этапе рассчитанные прореженные коммутационные матрицы для каждого положения АР использовались для проведения контроля. На рис. 10а показано ЦФА-Х-изображение, восстановленное с использованием прореженной до 25 % коммутационной матрицы. ЦФА-Х-изображение отличается от идеального по критерию максимальной разницы на 6,3 % и по среднеквадратичному отклонению на 0,79. Уровень фонового шума ЦФА-Х-изображения по сравнению с изображением на рис. 9а увеличился незначительно — в среднем на 2 дБ, и на изображении также хорошо видны блики 3 БЦО. Так как шаг между элементами АР равен 1 мм, то прореживание коммутационной матрицы привело к повышению шума (отмечен выноской «Шум грубого шага АР»), связанного с нарушением теоремы Котельникова. У АР, используемой в разделе 5.1,

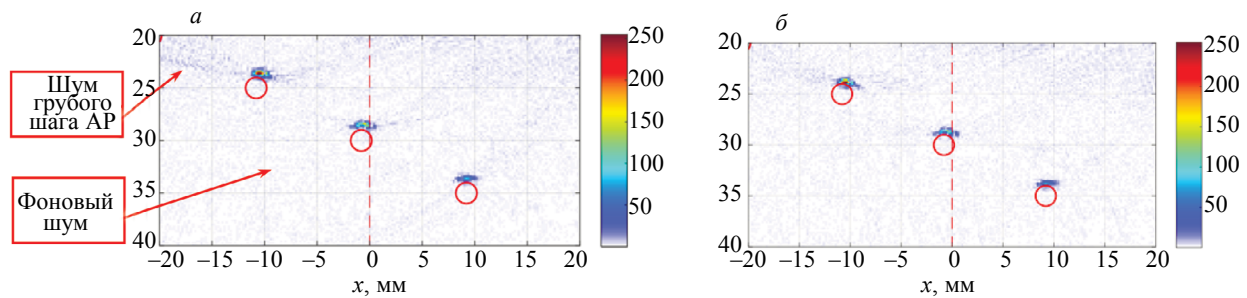


Рис. 10. ЦФА-Х-изображение, восстановленное с использованием коммутационной матрицы, прореженной до 25 % (а), и коммутационной матрицы, прореженной до 8 выстрелов (б).

шаг между элементами равен 0,6 мм и шум этой природы не так заметен. На рис. 10б представлено ЦФА-Х-изображение, восстановленное с использованием прореженной до 8 выстрелов коммутационной матрицы для каждого положения АР. Восстановленное ЦФА-Х-изображение отличается от идеального по критерию максимальной разницы на 6,4 % и по среднеквадратичному отклонению на 0,73.

Блики границы БЦО на AADF-изображениях, полученных при обработке изображений на рис. 10, по форме отличаются от бликов на рис. 9б буквально на несколько пикселей, а амплитуды отличаются примерно на 1 дБ. По этой причине эти AADF-изображения в статье не представлены.

Отметим еще раз, что прореживание коммутационной матрицы по выстрелам позволяет не только в 4 раза уменьшить объем измененных эхосигналов, но и в 4 раза повысить скорость регистрации эхосигналов.

6. ВЫВОДЫ

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

Прореживание коммутационной матрицы с помощью ГА позволяет уменьшить шум изображения на 3—6 дБ по сравнению с изображением, полученным при случайном прореживании коммутационной матрицы (см. рис. 4).

Использование ГА для прореживания коммутационной матрицы до 25 % позволяет уменьшить объем измеренных эхосигналов в 4 раза. При этом его отличие от идеального ЦФА-изображения будет в среднем около 3 %.

Использование ГА для формирования коммутационной матрицы, прореженной по выстрелам до 25 %, повышает скорость регистрации эхосигналов в 4 раза.

Применение режима миграции для ГА позволяет дополнительно уменьшить ошибку еще примерно на 1,5 дБ.

Применение текстурного фильтра AADF сделало разницу между идеальным AADF-изображением и AADF-изображением, полученным по прореженной коммутационной матрице, еще меньше.

Предложенный подход для расчета прореженной коммутационной матрицы и ее использования при проведении контроля можно использовать и для АР, установленной на призму.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jeune L. Imagerie ultrasonore par emission d'ondes planes pour le contrôle de structures complexes en immersion / Pour l'obtention du grade de Docteur de l'université Paris-Diderot. Paris, 2016. P. 119.
2. Avagyan V.K., Bazulin E.G. Increasing the Rate of Recording Echo Signals with an Ultrasonic Antenna Array Using Code Division Multiple Access Technology // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 11. P. 873—886. [Авагян В.К., Базулин Е.Г. Увеличение скорости регистрации эхосигналов ультразвуковой антенной решеткой с применением технологии множественного доступа с кодовым разделением // Дефектоскопия. 2020. № 11. С. 3—16.]
3. Bazulin E. The maximum entropy method in ultrasonic non-destructive testing — increasing the resolution, image noise reduction and echo acquisition rate // Entropy. 2018. V. 20 (8). P. 621. DOI: <https://doi.org/10.3390/e20080621>

4. Базулин Е.Г., Соколов Д.А. Восстановление ультразвуковых изображений отражателей по неполным данным методом распознавания со сжатием // Акуст. журн. 2019. № 4. С. 520—532.
5. ISO 23865:2021 Non-destructive testing — Ultrasonic testing — General use of full matrix capture/total focusing technique (FMC/TFM) and related technologies. URL: <https://www.iso.org/standard/78034.html> (дата обращения: 27.08.2021).
6. Дефектоскоп-томограф A1550 IntroVisor. URL: <https://acsys.ru/defektoskop-tomograf-a1550-introvisor/> (дата обращения: 01.07.2021).
7. Anselmi N., Gottardi G., Oliveri G., Salucci M. Planar thinned array design by hybrid analytical-stochastic optimization // IET Microwaves, Antennas & Propagation.
8. Hu H., Du J., Ye C., Li X. Ultrasonic phased array sparse-TFM imaging based on sparse array optimization and new edge-directed interpolation // Sensors. 2018. V. 18. P. 1830. DOI:10.3390/s18061830
9. Fraser A.S. Simulation of genetic systems // J. of Theor. Biol. 1962. V. 2. P. 329—346.
10. Методы оптимизации: Конспект лекций / Б.Ю. Лемешко. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. 126 с.
11. Bazulin E.G. Application of Adaptive Anisotropic Diffusion Filter To Improve the Reflector 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.]
12. Jiang Z.-J., Zhao S.-M., Chen Y.-Y., Cui T.-J. Method of array optimization for circular-boundary grid layout plane array based on differential evolution algorithm // IET Micro-waves, Antennas & Propagation.
13. Официальный сайт фирмы «ЭХО+». URL: <http://www.echoplus.ru/> (дата обращения: 03.07.2021).