

УМЕНЬШЕНИЕ УРОВНЯ СЛАБО МЕНЯЮЩИХСЯ ПОМЕХ МЕТОДОМ ДЕКОРРЕЛЯЦИИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

© 2020 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 07.02.2020; после доработки 21.02.2020
Принята к публикации 21.02.2020

При проведении ультразвукового контроля с использованием антенных решеток в измеренных эхосигналах могут присутствовать помеховые импульсы, которые после восстановления изображения отражателей могут сформировать ложные блики, затрудняющие анализ изображения. К таким нежелательным импульсам можно отнести импульсы реверберационных помех, возникающие при отражении зондирующего импульса от границ призмы, и/или импульсы, отраженные от конструктивного отражателя объекта контроля. Простейший способ уменьшения амплитуды таких импульсов, в случае их высокой стабильности от измерения к измерению, заключается в вычитании из измеренных эхосигналов шаблона с помеховыми импульсами. Однако, если помеховые импульсы слабо меняются при проведении ультразвукового контроля, незначительно изменяя время прихода и амплитуду, то их подавление за счет вычитания шаблона шума не будет эффективно. Для уменьшения уровня слабо меняющихся помех предложено применять процедуру декорреляции. В модельных экспериментах показана эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: антенная решетка, Full Matrix Capture (FMC), C-SAFT, Total Focusing Method (TFM), цифровая фокусировка антенной (ЦФА), метод декорреляции.

DOI: 10.31857/S0130308220040028

1. ВВЕДЕНИЕ

При проведении ультразвукового контроля (УЗК) с использованием антенных решеток в измеренных эхосигналах могут возникнуть импульсы, которые после восстановления изображения отражателей могут сформировать ложные блики, затрудняющие анализ изображения. К таким нежелательным импульсам можно отнести импульсы реверберационных помех, возникающие при отражении зондирующего импульса от границ призмы. Импульсы, отраженные от конструктивного отражателя объекта контроля, например, от его галтели, так же могут сформировать в изображении блики, которые могут замаскировать блик дефекта. Простейший способ уменьшения амплитуды таких импульсов, в случае их высокой стабильности от измерения к измерению, состоит в вычитании из измеренных эхосигналов шаблона с помеховыми импульсами. Однако при проведении ультразвукового контроля время прихода и амплитуда помехового импульса могут незначительно меняться: до четверти периода рабочей частоты и больше чем 3 дБ по амплитуде, поэтому вычитание шаблона шума уже не будет эффективно подавлять нежелательные импульсы. Для подавления реверберационного шума существуют методы, основанные на пространственной фильтрации измеренных эхосигналов. В работе [1] показано, что полосовая пространственная фильтрация эхосигналов при их регистрации наклонным одноэлементным преобразователем является эффективным способом устранения реверберационного шума. Однако такой способ не подходит для случая регистрации эхосигналов антенной решеткой. Это связано с тем, что шаг антенных решеток, используемых в УЗК, соизмерим с длиной волны, а число элементов антенной решетки, обычно равное 16 или 32, и это не позволяет рассчитать без искажений пространственный спектр эхосигналов. Поэтому задача уменьшения слабо меняющихся помех при регистрации эхосигналов антенной решеткой является актуальной задачей.

2. РЕГИСТРАЦИЯ ЭХОСИГНАЛОВ И ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Один из способов восстановления изображения отражателей заключается в регистрации эхосигналов антенной решеткой в режиме двойного сканирования [2], когда измеряются эхосигналы для любой пары излучатель—приемник. В зарубежной литературе такой режим регистрации эхосигналов называется Full Matrix Capture (FMC) [3]. Регистрация эхосигналов антенной решеткой в режиме двойного сканирования при ее механическом перемещении будем называть режимом

тройного сканирования [4]. На втором этапе по измеренным эхосигналам изображение отражателей восстанавливается методом комбинированного SAFT (C-SAFT) [5]. Метод C-SAFT в литературе, посвященной ультразвуковому контролю, называется Total Focusing Method (TFM) [6]. В статье [7] восстановление изображения отражателей методом C-SAFT по эхосигналам, измеренным в режиме двойного сканирования, предложено назвать методом цифровой фокусировки антенной (ЦФА). Если эхосигналы регистрируются в режиме тройного сканирования при перемещении антенной решетки вдоль оси x , то изображение, полученное как когерентная сумма всех ЦФА-изображений, восстановленных в каждом положении антенной решетки, будет обладать более высокой разрешающей способностью и меньшим уровнем шума. Такой метод восстановления изображения отражателей будем называть ЦФА-Х.

3. МЕТОД ДЕКОРРЕЛЯЦИИ

Для уменьшения уровня слабо меняющихся помех можно применить процедуру декорреляции [8, 9], относящуюся к методам пространственно-временной обработке сигналов. Регистрацию эхосигналов в режиме двойного сканирования и восстановление изображения отражателей можно рассматривать как пример пространственно-временной обработке сигналов. Изначально метод декорреляции разрабатывался для борьбы со структурным шумом или активными помехами в радиолокации [10, 11]. В статье [12] предпринята попытка применить подобный подход для уменьшения уровня структурных шумов при проведении УЗК с помощью антенных решеток. В ней достаточно подробно рассмотрен алгоритм декорреляции структурного шума и поэтому в нашей статье не обсуждается. Было показано, что метод декорреляции позволяет уменьшить уровень структурного шума, если функция корреляции его шаблона отличается от функции корреляции структурного шума при проведении контроля меньше, чем на 10 процентов. В отличие от метода вычитания шаблона шума, метод декорреляции не требует стабильности импульсов шума.

3.1. Реверберационный шум

Реверберационный шум возникает из-за того, что зондирующий сигнал, проходя границу «призма—объект контроля», частично отражается обратно в призму и после многократных отражений от ее границ регистрируется элементами антенной решетки. Если импульсы реверберационного шума не изменяются от измерения к измерению, то простое вычитание шаблона реверберационного шума из измеренных эхосигналов позволяет уменьшить уровень помехи более чем на 12 дБ. Однако такой метод становится неэффективным для случая, когда реверберационный шум меняется при сканировании антенной решеткой, например, из-за изменения качества акустического контакта, в результате чего изменяется амплитуда и время задержки реверберационных импульсов.

3.2. Эхосигналы от конструктивных отражателей

В практике УЗК могут встретиться объекты, в которых имеются конструктивные отражатели, вызывающие отражение падающей ультразвуковой волны. Примером такого конструктивного отражателя является галтель сварного соединения приварки к корпусу парогенератора трубопровода Ду1200. После восстановления изображения отражателей эти импульсы формируют блики, которые могут маскировать блики дефектов, что затрудняет анализ изображения. Эхосигналы от конструктивных отражателей, как и реверберационные импульсы, могут изменять свою амплитуду и время задержки при проведении измерений.

4. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

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

4.1. Уменьшение реверберационного шума

На рис. 1 показана фотография образца толщиной 18 мм из стали 20 со сквозным отверстием бокового сверления диаметром 2 мм, предназначенного для калибровки антенной решетки, установленной на призму. Для регистрации эхосигналов использовали антенную решетку со следующими параметрами: рабочая частота 5 МГц, 32 элемента, размер пьезоэлемента $0,55 \times 10$ мм, зазор

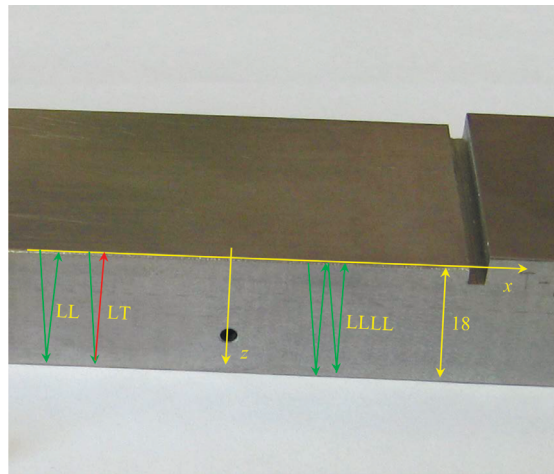


Рис. 1. Фотография образца толщиной 18 мм для калибровки антенной решетки, установленной на призму

между пьезоэлементами 0,05 мм. Антенная решетка установлена на плексигласовую призму с углом наклона 20 град. Передняя грань призмы была расположена в точке $x = 0$ мм.

Описание траектории распространения импульса с учетом трансформации типа волны при отражении его от границ объекта контроля или от несплошности будем называть акустической схемой. Тип волны на участке траектории между касаниями импульса границ объекта контроля или отражателя будем обозначать буквами **L** (продольная) или **T** (поперечная вертикальной поляризации). На рис. 1 зелеными линиями показаны участки траектории, по которым распространяется продольная волна **L**, а красными — поперечная **T**, а также схематически обозначены траектории по акустическим схемам: **LL**, **LT**, **LLLL**. Если отражение происходит от несплошности, то в название акустической схемы будет добавляться буква **d**.

Для регистрации эхосигналов шаблона реверберационного шума призма была развернута на 180 град относительно оси x (см. рис. 1) и удалена влево не меньше, чем на 50 мм от центра отверстия. На рис. 2а в растровом виде показаны эхосигналы 17-ого выстрела при измерении эхосигналов от отверстия бокового сверления, а на рис. 2б — при измерении шаблона реверберационного шума. На рис. 2а выноской **LdL** показаны эхосигналы на прямом луче на продольной волне, отраженные от отверстия бокового сверления, а выноской **TdT** — эхосигналы при отражении на поперечной волне. Отметим, что эхосигналы, отраженные от дна образца, также будут рассматриваться как помеховые эхосигналы, подлежащие устранению. На рис. 2б выноской **LL** показан эхосигнал при однократном отражении от дна образца продольной волны, выносками **LT** и **TL** — эхосигналы, однократно отраженные от дна со сменой типа волны, а выноской **LLLL** — эхосигналы при двукратном отражении продольной волны от дна образца. На рис. 1 схематически показаны лучи этих акустических схем. Визуально реверберационные

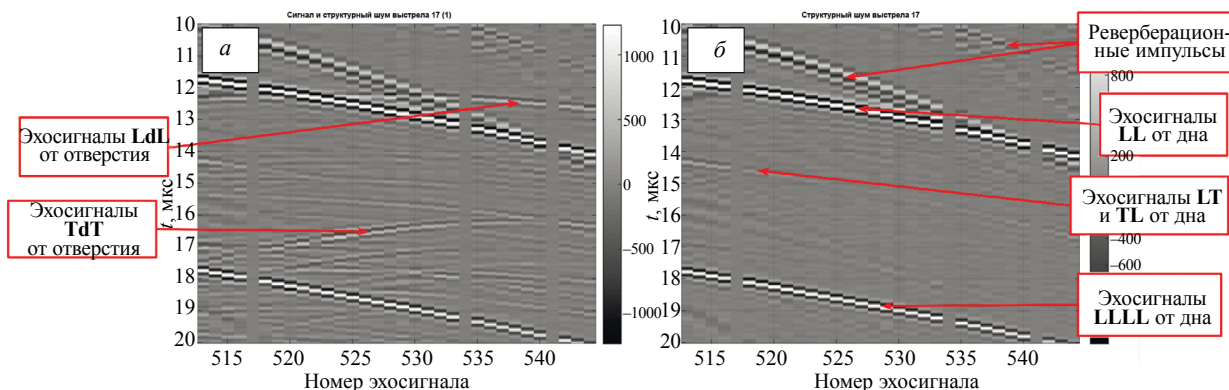


Рис. 2. Эхосигналы в растровом виде 17-го выстрела при измерении эхосигналов от отверстия бокового сверления (а) и при измерении шаблона реверберационного шума (б).

импульсы и эхосигналы, отраженные от дна, очень близки для двух измерений. Отметим, что три элемента антенной решетки не работают (см. рис. 1).

На рис. 3 красным цветом показан фрагмент эхосигнала, полученного при излучении 17-ым элементом антенной решетки и приемом 23 элементом, на котором хорошо видны импульсы, отраженные от отверстия бокового сверления и от дна образца. Черным цветом показан фрагмент подобного сигнала шаблона реверберационного шума. Из-за разного слоя глицерина, которой использовали в качестве контактной жидкости, эхосигналы, отраженные от дна образца для обоих измерений, сдвинулись примерно на 40 нс, что составляет четверть периода несущей частоты. Для когерентной обработки это очень большой сдвиг. Амплитуда эхосигнала от дна изменилась примерно на 1,0 дБ.

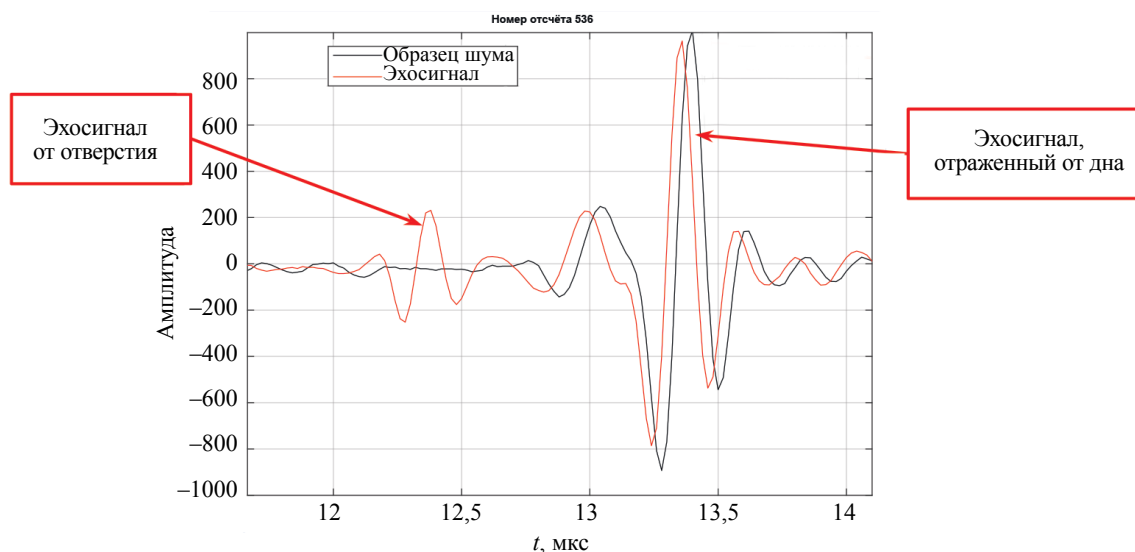


Рис. 3. Эхосигнал с шаблоном шума (график черного цвета) и с эхосигналом, отраженным от отверстия (график красного цвета).

На рис. 4а показаны эхосигналы 17-го выстрела после вычитания шаблона реверберационного шума (см. рис. 2б), а на рис. 4б — после применения процедуры декорреляции. Хорошо видно, что вычитание реверберационного шума из-за смещения на 40 нс его шаблона практически не уменьшило амплитуду реверберационного шума, а процедура декорреляции более чем на 16 дБ уменьшила амплитуду реверберационных импульсов и эхосигналов, отраженных от дна образца.

На рис. 5а представлены ЦФА-изображения границы отверстия бокового сверления диаметром 2 мм с центром на глубине 12 мм в стальном образце толщиной 18 мм, восстановленные на поперечной волне (акустическая схема **TdT**) по исходным эхосигналам. Амплитуда реверберационного

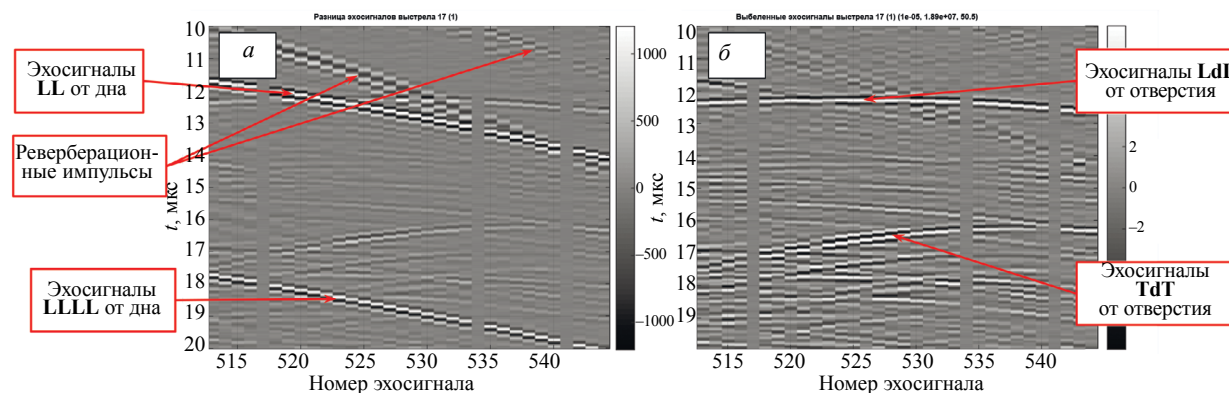


Рис. 4. Эхосигналы в растровом виде 17-го выстрела после вычитания шаблона реверберационного шума (а) и после процедуры декорреляции (б).

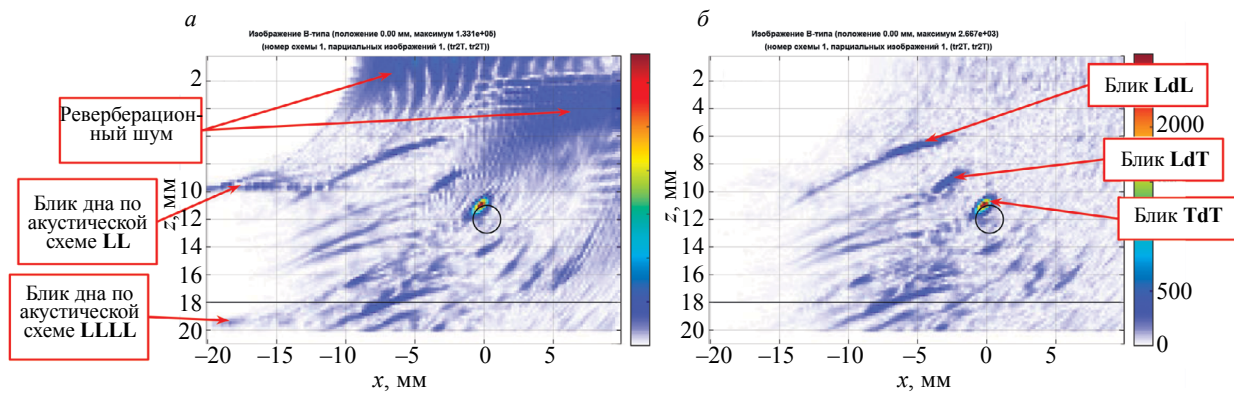


Рис. 5. ЦФА-изображения, восстановленные на поперечной волне (акустическая схема **TdT**) по исходным эхосигналам (а) и по декоррелированным (б).

шума по отношению к амплитуде блика границы отверстия имеет очень высокий уровень, равный примерно -12 дБ. Так же хорошо видны ложные блики дна образца, сформированные эхосигналами по акустическим схемам **LL** и **LLLL**. На рисунок линиями черного цвета нанесены контуры образца. Так как эхосигналы измеренные (см. рис. 2а) практически не отличаются от эхосигналов после вычитания шаблона реверберационного шума (см. рис. 4а), то и разницы между ЦФА-изображениями, восстановленным по этим изображениям, практически нет. А вот на изображении, восстановленном по декоррелированным эхосигналам (рис. 5б), уровень реверберационного шума и амплитуда ложных бликов дна образца уменьшились более чем на 20 дБ.

Отметим, что для подчеркивания эффективности применения процедуры декорреляции изображение восстанавливалось по акустической схеме **TdT** при использовании призмы, рассчитанной на работу на продольной волне.

4.2. Уменьшение влияния конструктивных отражателей

Изготовление образцов с моделями точечных отражателей представляет собой нетривиальную проблему, так как выполнение отверстий диаметром 0,5 мм на глубину 30 мм даже в плексигласовых блоках представляет собой не простую задачу. Указанный диаметр для рабочей частоты 5 МГц равен примерно длине продольной волны λ_p , что не позволяет считать изготовленное отверстие точечным отражателем. Если между двумя плексигласовыми брусками толщиной 25 мм разместить медную проволоку диаметром 0,09 мм и склеить их с помощью дихлорэтана (рис. 6), то размер отражателя получается равным примерно $\lambda/6$. Несмотря на то, что склеенная граница двух плексигласовых брусков оптически практически не заметна, тем не менее от нее отражаются ультразвуковые импульсы достаточно большой амплитуды, которые будут искажать восстановленное изображение проволоки. Границу склейки двух плексигласовых брусков можно рассматривать как конструктивный отражатель.

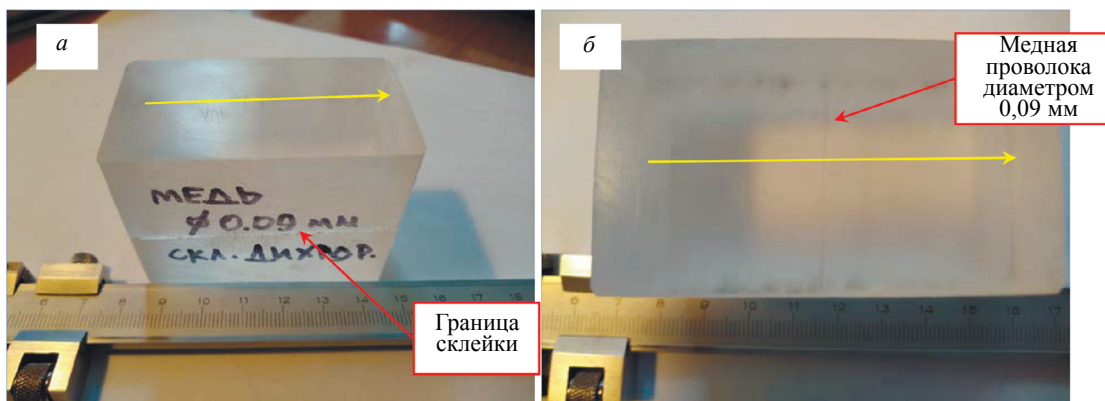


Рис. 6. Фотографии образца с медной проволокой диаметром 0,09 мм, расположенной между двух плексигласовых брусков толщиной 25 мм.

Эхосигналы регистрировались антенной решеткой со следующими параметрами: рабочая частота 5 МГц, 32 элемента, размер пьезоэлемента $0,9 \times 10$ мм, зазор между пьезоэлементами 0,1 мм. Эхосигналы измерялись в режиме тройного сканирования в 20 точках с шагом 1,96 мм вдоль линии сканирования, показанной на рис. 6 стрелками желтого цвета. В качестве образца эхосигналов от границы склейки использовался медианный В-шаблон всех эхосигналов, измеренных в режиме тройного сканирования.

4.2.1. Режим ЦФА

На рис. 7а представлено ЦФА-изображение проволоки, восстановленное на продольной волне (акустическая схема **LdL**) по эхосигналам, измеренным при размещении антенной решетки в центре образца. Видно, что блик проволоки замаскирован бликом склеенной границы. На рис. 7б показано ЦФА-изображение, восстановленное по эхосигналам после вычитания медианного В-шаблона. Амплитуда блика границы склейки уменьшилась примерно на 6 дБ, но при этом форма блика проволоки искажена. Это связано с тем, что даже при проведении измерений в

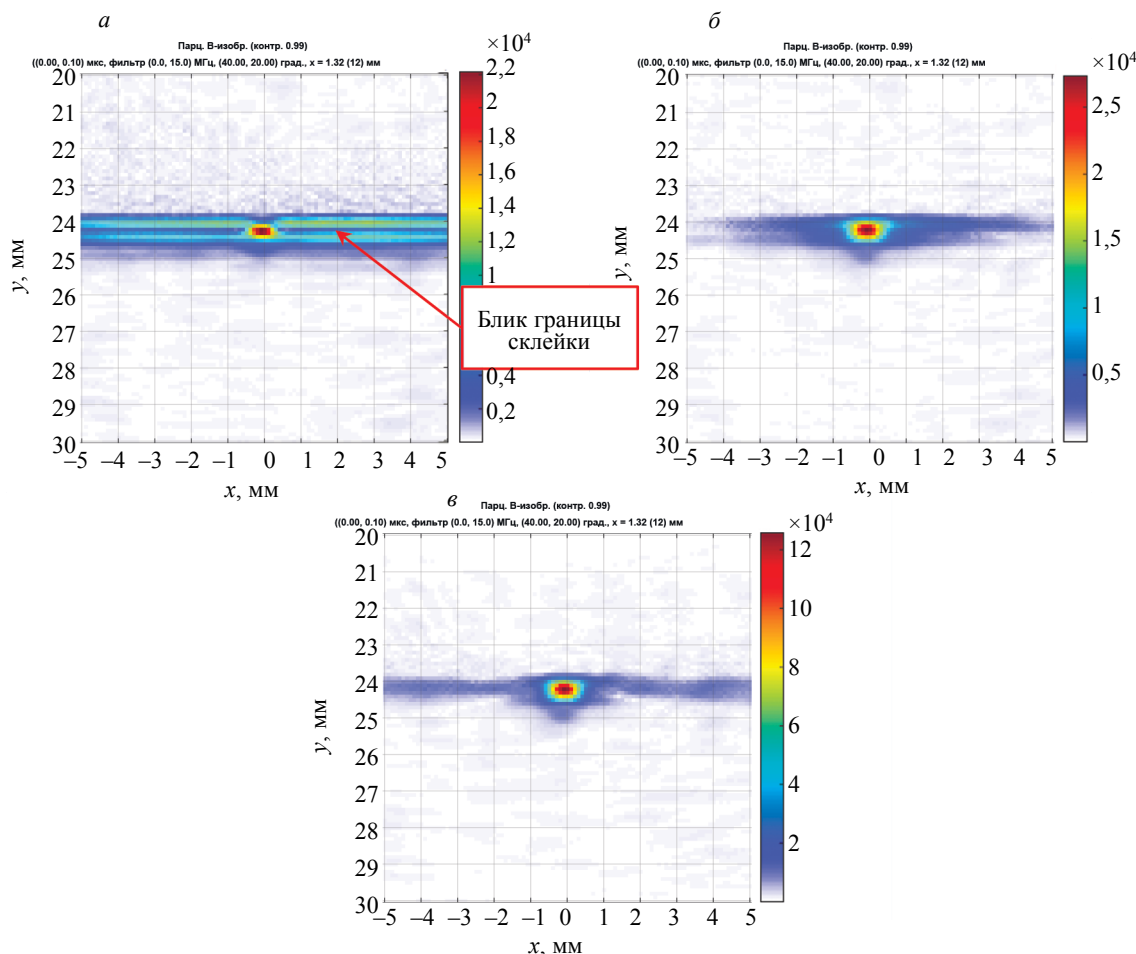


Рис. 7. ЦФА-изображения проволоки, восстановленные на продольной волне, по исходным эхосигналам (а), после вычитания В-шаблона (б) и по декоррелированным эхосигналам (в).

лаборатории, амплитуда и время задержки эхосигналов от границы склейки для разных положений антенной решетки меняются, и поэтому вычитание медианного В-шаблона не позволяет устранить эхосигналы от границы склейки. На ЦФА-изображении (рис. 7в), восстановленном по декоррелированным эхосигналам, амплитуда блика границы склейки уменьшилась примерно на 12 дБ по сравнению с рис. 7а, а блик проволоки стал похож на блик точечного отражателя.

4.2.2. Режим ЦФА-Х

На рис. 8а представлено ЦФА-Х-изображение проволоки, восстановленное на продольной волне по эхосигналам для всех 20 положений решетки, которое не существенно отличается от ЦФА-изображения (см. рис. 7а). На рис. 8б показано ЦФА-Х-изображение, восстановленное по эхосигналам после вычитания медианного В-шаблона. В отличие от ЦФА-изображения на рис. 7б из-за увеличения апертуры излучения-приема блик проволоки принял более компактный вид, но блик границы склейки несущественно уменьшил свою амплитуду. ЦФА-Х-изображение (рис. 8в), восстановленное по декоррелированным эхосигналам, можно признать самым качественным из рассмотренных, так как фронтальные размеры блика проволоки уменьшились в полтора раза по сравнению с изображением на рис. 7в, а амплитуда блика границы склейки уменьшилась по сравнению с исходным изображением на рис. 8а примерно на 20 дБ.

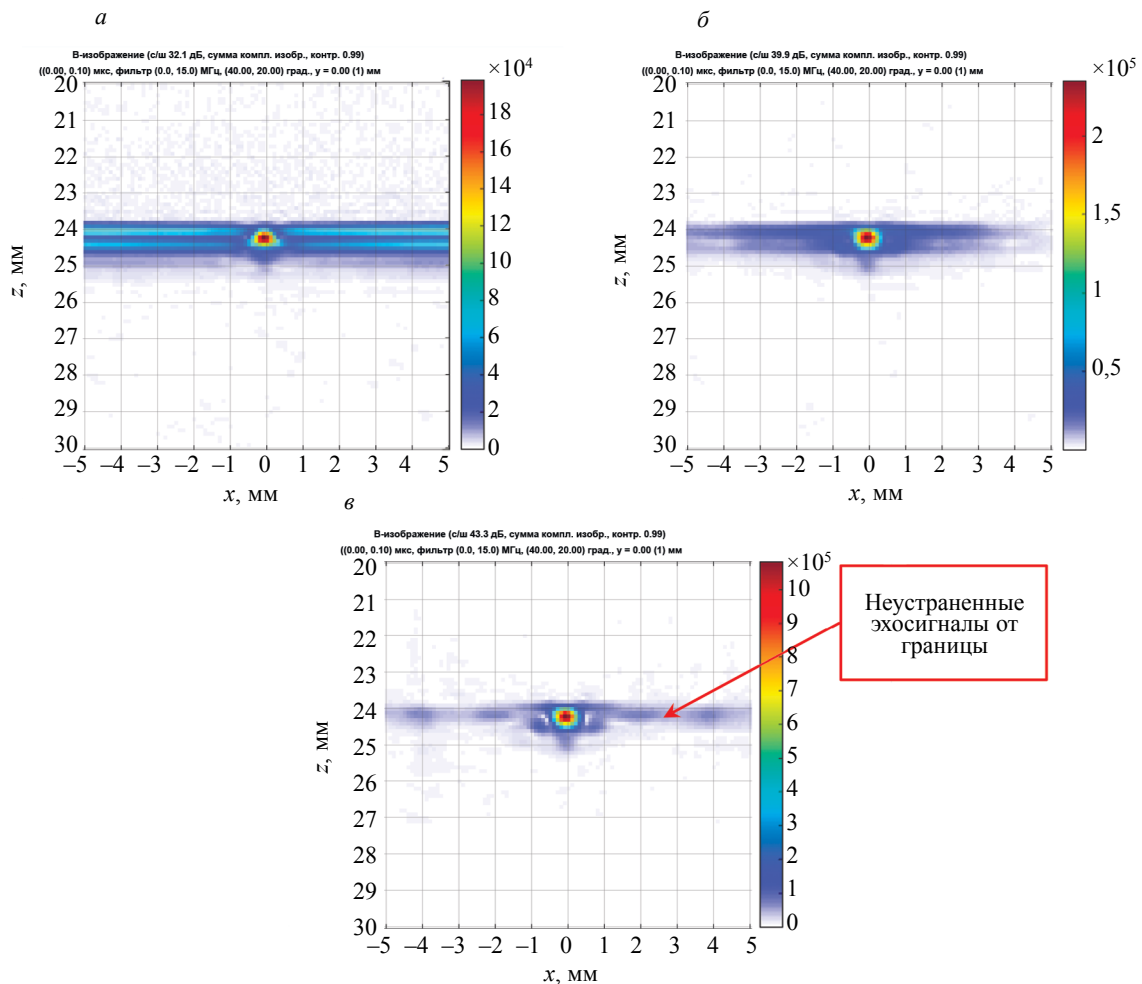


Рис. 8. ЦФА-Х-изображения, восстановленные на продольной волне, по исходным эхосигналам (а), после вычитания В-шаблона (б) и по декоррелированным эхосигналам (в).

5. ВЫВОДЫ

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

Метод декорреляции позволил уменьшить уровень слабо меняющегося реверберационного шума и амплитуду эхосигналов от конструктивных отражателей более чем на 20 дБ.

Это стало возможным благодаря тому, что корреляционные функции шаблона шума и шума в обрабатываемых эхосигналах отличаются друг от друга меньше чем на 10 %.

Вычитание шаблона помеховых импульсов не позволило уменьшить уровень шума в изображении, так как помеховые эхосигналы изменяют свою амплитуду и время задержки от измерения к измерению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г. Применение гомоморфной фильтрации для повышения качества изображения дефектов при экспертном контроле сварных швов трубопроводов АЭС // Дефектоскопия. 2003. № 4. С. 15—22.
2. Nahamoo D., Pan B.X., Kak A.S. Synthetic aperture diffraction tomography and its inter-polation free implementation // IEEE Trans. Sonics Ultrason. 1984. V. SU-31. P. 218—229.
3. Hunter A.J., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. The wavenumber algorithm for full-matrix imaging using an ultrasonic array // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. 2008. V. 55. № 11. P. 2450—2462. DOI:10.1109/tuffc.952
4. Базулин Е.Г. Контроль заварок Ду800 антенными решетками методом тройного сканирования // Дефектоскопия. 2010. № 7(46). С. 30—41.
5. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29—41.
6. Holmes C., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation // NDT&E International. 2005. V. 38. P. 701—711.
7. Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. О применимости технологии антенных решеток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 1. С. 64—70.
8. Кремер И.Я. Пространственно-временная обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1984. 224 с.
9. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 3. Обработка сигналов в радио- и гидро-локации и прием случайных гауссовых сигналов на фоне помех / Нью-Йорк, 1971. Пер. с англ. Под ред. проф. В.Т. Горяинова. М.: «Советское радио». Редакция литературы по вопросам космической радио-электроники, 1977. 664 с.
10. Радиолокационные системы. Учебник / В.П. Бердышев, Е.Н. Гарин, А.Н. Фомин и др. Под общ. ред. В.П. Бердышева. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011. 400 с.
11. Тяпкин В.Н., Фомин А.Н. Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск. Красноярск: СФУ, 2011. 536 с.
12. Базулин Е.Г., Коновалов Д.А. Применение процедуры выбеливания эхосигналов для уменьшения уровня структурного шума при проведении ультразвукового контроля // Дефектоскопия. 2019. № 11. С. 3—15.
13. Официальный сайт фирмы «ЭХО+». URL: <http://www.echoplus.ru> (дата обращения: 20.01.2020).