

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЦФА-ИЗОБРАЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ КОРРЕКЦИИ «ПАРАЗИТНЫХ» ЗАДЕРЖЕК МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

© 2023 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 18.07.2023; после доработки 25.07.2023
Принята к публикации 25.07.2023

Если между элементами антенной решетки существует разброс «паразитных» задержек, больше одной четвертой периода несущей частоты, то качество изображения отражателей, восстановленного методом цифровой фокусировки антенной (ЦФА), из-за неоптимальной фокусировки ухудшится. В статье предложен способ учета влияния «паразитных» задержек между элементами антенной решетки при восстановлении ЦФА-изображения. Его применение позволило повысить фронтальную разрешающую способность ЦФА-изображения отражателей примерно в два раза при использовании некачественной антенной решетки с диапазоном разброса «паразитных» задержек в один период. Приведены ЦФА-изображения, восстановленные с учетом когерентного фактора.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль (УЗК), Full Matrix Capture (FMC), Total Focusing Method (TFM), Coherence Factor (CF), цифровая фокусировка антенной (ЦФА).

IMPROVEMENT OF TFM-IMAGE QUALITY DUE TO CORRECTION OF “PARASITIC” DELAYS BETWEEN ANTENNA ARRAY ELEMENTS

© 2023 E.G. Bazulin^{1,*}

¹LLC «ECHO+ Research and Production Center»
Strogino Technopark, Tvardovsky str., 8, Moscow, 123458, Russia
E-mail: *bazulin@echoplus.ru

If there is a spread of “parasitic” delays between the elements of the antenna array, more than one fourth of the carrier frequency period, the quality of the reflector image reconstructed by the digital antenna focusing (DAF) method will deteriorate due to non-optimal focusing. The paper proposes a method to take into account the influence of “parasitic” delays between antenna array elements during DFA image reconstruction. Its application allowed to increase the frontal resolving ability of the CFA-image of reflectors approximately twice when using a low-quality antenna array with a range of “parasitic” delays in one period. CFA-images reconstructed taking into account the coherent factor are presented.

Keywords: ultrasonic inspection (US NDT), Full Matrix Capture (FMC), Total Focusing Method (TFM), Coherence Factor (CF), digital antenna focusing (DFA).

DOI: 10.31857/S0130308223090038, EDN: EBAGAW

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при проведении ультразвукового контроля с применением пьезоэлектрических антенных решеток широко используются две технологии восстановления изображения отражателей: фазированные антенные решетки (ФАР) [1] и цифровая фокусировка антенной решетки (ЦФА) [2]. В работе [3] обе технологии сравниваются и делается вывод о том, что ЦФА-технология более перспективна в плане применения разнообразных алгоритмов восстановления изображения отражателей. Метод ЦФА позволяет восстановить изображения отражателей со сплошной фокусировкой во всех точках области восстановления изображения. На первом этапе регистрируются эхосигналы для всех комбинаций излучатель—приемник элементов антенной решетки (режим Full Matrix Capture [4]). На втором этапе по измеренным эхосигналам методом комбинационного SAFT (C-SAFT) [5—8] восстанавливается изображение отражателей с учетом эффекта трансформации типа волны при многократном отражении импульсов от границ объекта контроля. В дальнейшем под акустической схемой будем подразумевать описание лучевой траектории распространения импульса от излучателя до отражателя и до приемника при отражении импульса от неровных границ объекта контроля. Акустическая схема будет определяться последовательностью букв L (продольная волна), T (вертикально поляризованная поперечная волна) и буквы d (отражение от

несплошности). Для повышения качества изображения, уменьшения уровня шума и повышения разрешающей способности, метод ЦФА можно использовать совместно с расчетом когерентного фактора (Coherence Factor (CF)) [9, 10]. В зарубежной литературе используется термин Phase Coherence Imaging (PCI) [11].

Изготовление антенных решеток — это сложный технологический процесс, который предполагает изготовление из композитной пьезокерамики элементов решетки, на каждый элемент которой нужно подать зондирующий импульс и/или снять эхосигнал. Склейка протектора с антенной решеткой, который защищает ее поверхность от повреждений и согласует ее с заданной акустической средой, ее размещение в корпусе — очень важные технологические операции. Их недостаточная проработка или их нарушение может привести к тому, что чувствительность элементов решетки, форма эхосигналов и «паразитные» задержки между элементами будут иметь недопустимый разброс. Между тем, при восстановлении изображения отражателей методом ЦФА или ФАР требуется стабильность таких параметров элементов решетки, как чувствительность s_i , форма эхосигналов $p_i(t)$ и «паразитные» времена задержек δt_i .

Качество антенной решетки целесообразно проверить сразу после приобретения. Один из способов проверки заключается в размещении антенной решетки на рексолитовой пластине толщиной, например, 15 мм, излучении каждым элементом зондирующего сигнала и регистрации им же донного импульса $p_i(t)$, который можно представить как $p_i(t) = s_i p_i^{\text{norm}}(t - \delta t_i)$, где $p_i^{\text{norm}}(t - \delta t_i)$ — вид нормированного к единице донного импульса. Анализ донных импульсов позволяет сделать вывод об их идентичности, определить чувствительность s_i и «паразитные» времена задержек δt_i . Согласно требованиям ISO 18563-2:2017 [12], полагается, что антенной решеткой можно пользоваться, если разброс чувствительности s_i разных элементов лежит в пределах ± 3 дБ. Документов, регламентирующих разброс «паразитных» задержек антенной решетки, автору статьи найти не удалось, поэтому будем считать, что максимальный разброс «паразитных» задержек δt_i должен быть меньше одной восьмой или, в более мягком варианте, одной четвертой периода рабочей частоты решетки. Так, если рабочая частота антенной решетки равна 10 МГц, то допустимый разброс «паразитных» времен задержек равен 12 или 25 нс. Это достаточно жесткое требование к качеству изготовления решетки. При обнаружении нарушений требований к свойствам антенной решетки возникает дилемма: либо вернуть антенную решетку изготовителю для исправления брака, либо получить обратно денежные средства и заказать ее у другой фирмы. К сожалению, оба варианта могут привести к задержке получения качественной антенной решетки, и предприятие, ее заказавшее, рискует нарушить договорные обязательства перед своим партнером. Но, если форма импульсов $p_i(t)$ по заданному критерию примерно одинакова, то недопустимый разброс чувствительности s_i и разброс «паразитных» задержек δt_i можно легко учесть на этапе регистрации или восстановления изображения отражателей методом ЦФА.

Отметим, что такой подход к компенсации разной чувствительности s_i и «паразитных» задержек δt_i элементов антенной решетки может скомпенсировать не идентичность каналов ультразвукового дефектоскопа. Но в этом случае надо помнить, что определенные s_i и δt_i будут оптимальными только для конкретной пары «антенная решетка — дефектоскоп».

2. СПОСОБ КОМПЕНСАЦИИ РАЗБРОСА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

На этапе входного контроля свойств антенной решетки регистрируются эхосигналы $p_i(t)$. На рис. 1а для примера показано 8 эхосигналов 128-антенной решетки с рабочей частотой 10 МГц. Видно, что из-за проблем изготовления протектора или склейки пьезоэлементов и протектора, меняется форма эхосигналов, разброс «паразитных» задержек δt_i недопустимо велик — практически период несущей частоты (рис. 1б) и чувствительность элементов s_i неравномерна.

Для компенсации «паразитных» задержек нужно рассчитать значение δt_{ij} для всех пар элементов антенной решетки (i — номер излучающего элемента; j — номер приемного элемента) по формуле (1):

$$\delta t_{ij} = \frac{\delta t_i + \delta t_j}{2}. \quad (1)$$

Сразу после регистрации эхосигналов нужно каждый из них сдвинуть во времени и далее считать, что эхосигналы $p_{ij}(t)$ измерены идеальной антенной решеткой. А можно на этапе расчета задержек времени прихода эхосигнала на приемный элемент j при излучении элементом i учесть значение δt_{ij} .

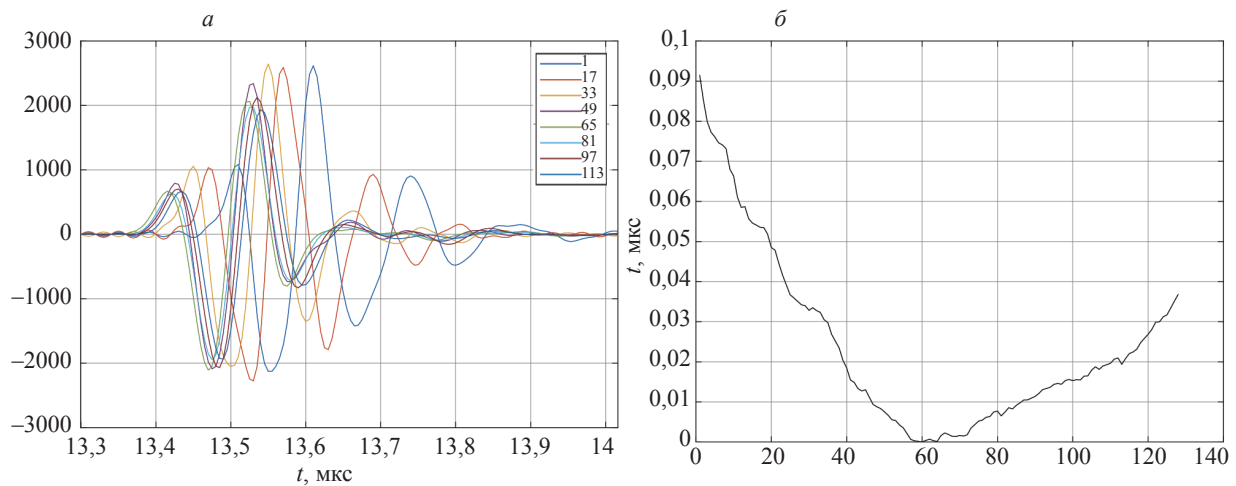


Рис. 1. Восемь эхосигналов $p_i(t)$ (а) и «паразитные» задержки δt_i в зависимости от номера элемента решетки (б).

Компенсировать разную чувствительность элементов можно, рассчитав s_{ij} по формуле (2), и умножить на нее измеренный эхосигнал $p_{ij}(t)$:

$$s_{ij} = \frac{1}{\sqrt{s_i s_j}}. \quad (2)$$

3. МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Эффективность предложенного способа компенсации разброса чувствительности s_i и «паразитных» задержек δt_i была проверена в модельном эксперименте. Эхосигналы регистрировались 128-канальным дефектоскопом «АВГУР АРТ», разработанным и изготавливаемым в «Научно-производственном центре «ЭХО+» [13].

3.1. Параметры антенной решетки

Эхосигналы регистрировались антенной решеткой (10 МГц, 128 элементов, ширина пьезоэлемента $0,25 \times 10$ мм, зазор между краями пьезоэлементов 0,05 мм). К сожалению, при проверке качества антенной решетки выяснилось, что диапазон изменения «паразитных» задержек около 90 нс, что соизмеримо с периодом сигнала на частоте 10 МГц (см. рис. 1б). Между тем импульсы $p_i(t)$ достаточно близки друг к другу (см. рис. 1а), что оставляет надежду на использование дорогостоящей антенной решетки для получения качественного изображения отражателей.

3.2. Образец

В дюралюминиевом образце толщиной 90 мм было сделано двенадцать боковых отверстий (БЦО) диаметром 0,5 мм (рис. 2). Группа из четырех БЦО, наиболее близких к поверхности образца, были расположены в углах квадрата со стороной примерно 2 мм, левая группа — в углах квадрата со стороной примерно 6 мм, а правая — со стороной около 8 мм. Образец обладает слабой анизотропией кубического типа, которая описывается тремя коэффициентами упругости (112,3; 56,33; 26,68) ГПа.

3.3. Восстановленные изображения

На рис. 2 приведено схематическое изображение образца и антенной решетки, установленной на рексолитовую 35-градусную призму. При восстановлении изображения отражателей учитывались анизотропные свойства образца.

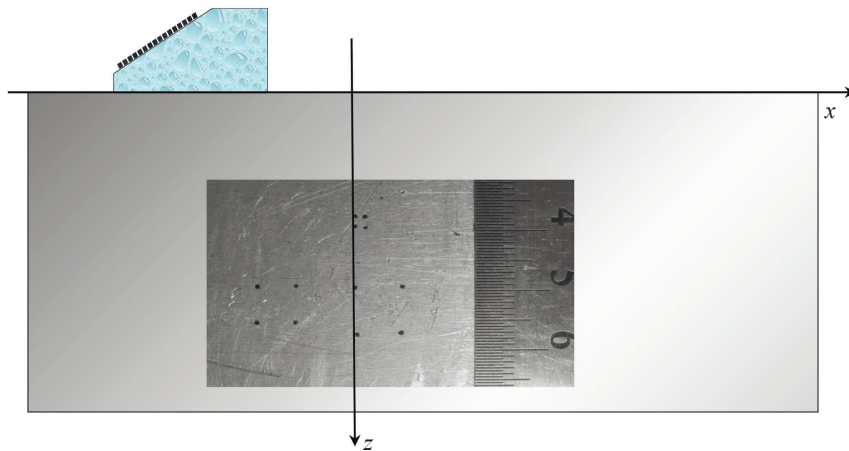


Рис. 2. Схематическое изображение образца «тест перерасеивания» из дюралюминия.

Для дальнейшего сравнения были восстановлены ЦФА-изображения, полученные с использованием антенной решетки (5 МГц, 32 элемента, ширина пьезоэлемента $0,75 \times 10$ мм, зазор между краями пьезоэлементов 0,25 мм), установленной на 35-градусную рексолитовую призму, как показано на рис. 2. Эта решетка имела разброс чувствительности элементов и «паразитных» задержек в пределах нормы и при приемке была признана годной. Размеры активной апертуры этой антенной решетки близки к размеру активной апертуры решетки на 10 МГц, описанной в разделе 3.1. На рис. 3а показано ЦФА-изображение, восстановленное по акустической схеме TdT, а на рис. 3б — с учетом когерентного фактора, что уменьшило уровень шума примерно на 8 дБ и увеличило лучевую и фронтальную разрешающие способности примерно в два раза.

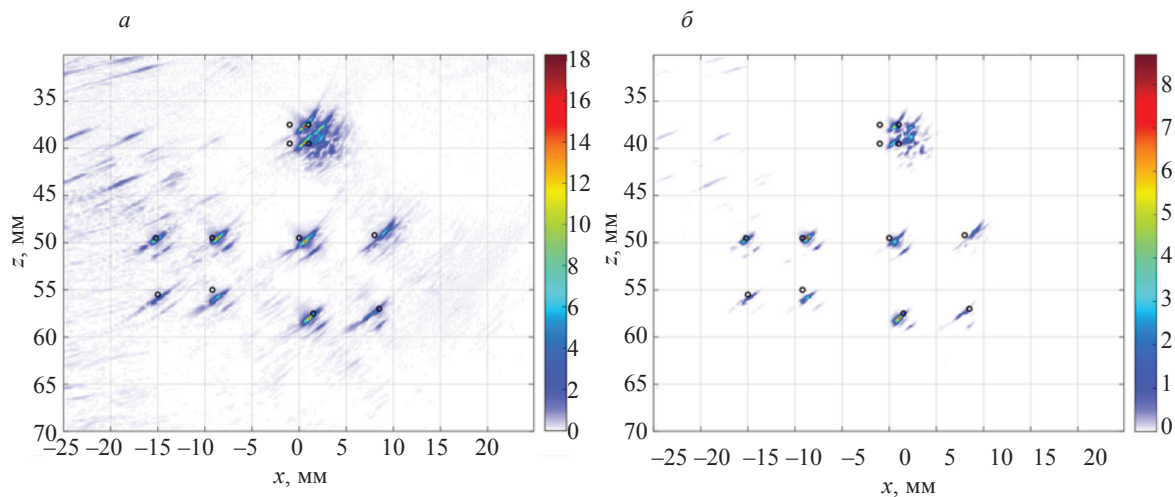


Рис. 3. Изображения, восстановленные по акустической схеме TdT антенной решеткой на 5 МГц: методом ЦФА (а); методом ЦФА с учетом когерентного фактора (б).

Далее показаны изображения отражателей с использованием некондиционной антенной решетки на 10 МГц, описанной в разделе 3.1. На рис. 4а показано ЦФА-изображение, восстановленное по акустической схеме TdT, без коррекции «паразитных» задержек, а на рис. 4б — с коррекцией. Сравнивая изображения на рис. 4а и на рис. 3а сложно найти преимущества использования 128-элементной решетки на 10 МГц перед решеткой из 32 элементов на 5 МГц. После коррекции амплитуда бликов возросла примерно на 4 дБ, их форма стала компактнее, а фронтальная разрешающая способность возросла более чем в 1,5 раза. Диагональные блики группы БЦО, наи-

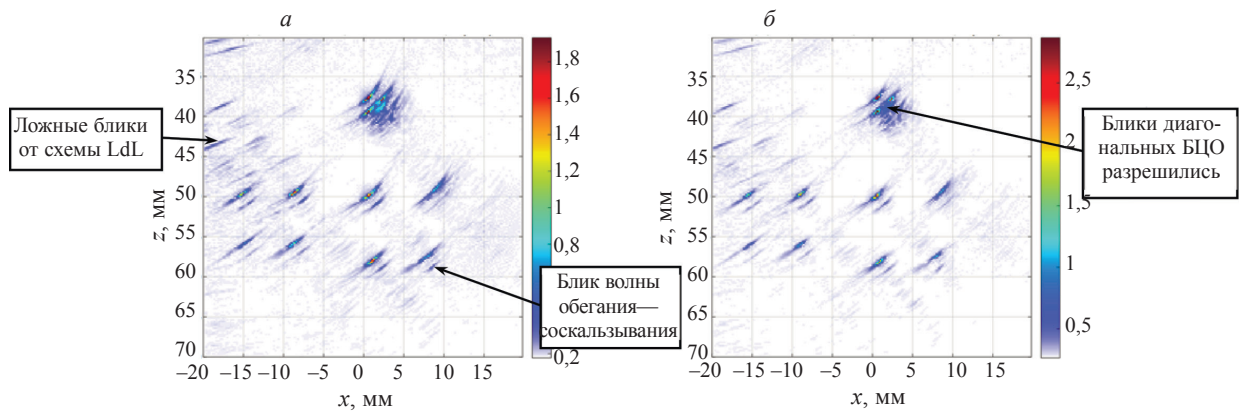


Рис. 4. ЦФА-изображение, восстановленное по акустической схеме TdT: без коррекции «паразитных» задержек (а); с коррекцией (б).

более близкой к поверхности, уверенно разрешились после коррекции. За каждым бликом границы БЦО на глубине больше 45 мм хорошо заметны ложные блики, сформированные волной обегания—соскальзывания. Качество изображения на рис. 4б стало выше, чем на рис. 3а.

На рис. 5а показано ЦФА-изображение, восстановленное по акустической схеме TdT, с учетом когерентного фактора без коррекции «паразитных» задержек, а на рис. 5б — с коррекцией. По сравнению с рис. 4а уровень шума изображения на рис. 5а уменьшился примерно на 12 дБ, а фронтальная разрешающая способность возросла более чем в 2 раза. Диагональные блики группы БЦО, наиболее близкой к поверхности, уверенно разрешились в отличие от рис. 4а. ЦФА-изображение, восстановленное с учетом когерентного фактора и с коррекцией «паразитных» задержек (см. рис. 5б), обладает самыми компактными бликами, так как фронтальная разрешающая способность возросла примерно в 3 раза, а лучевая — примерно в 1,5 раза по сравнению с исходным изображением на рис. 4а. Уровень ложных бликов изображения на рис. 5б минимален. Сравнивая изображения на рис. 5б и на рис. 3б, легко обнаружить преимущества использования 128-элементной решетки на 10 МГц перед решеткой из 32 элементов на 5 МГц: лучевая и фронтальная разрешающие способности возросли примерно в 1,5 раза.

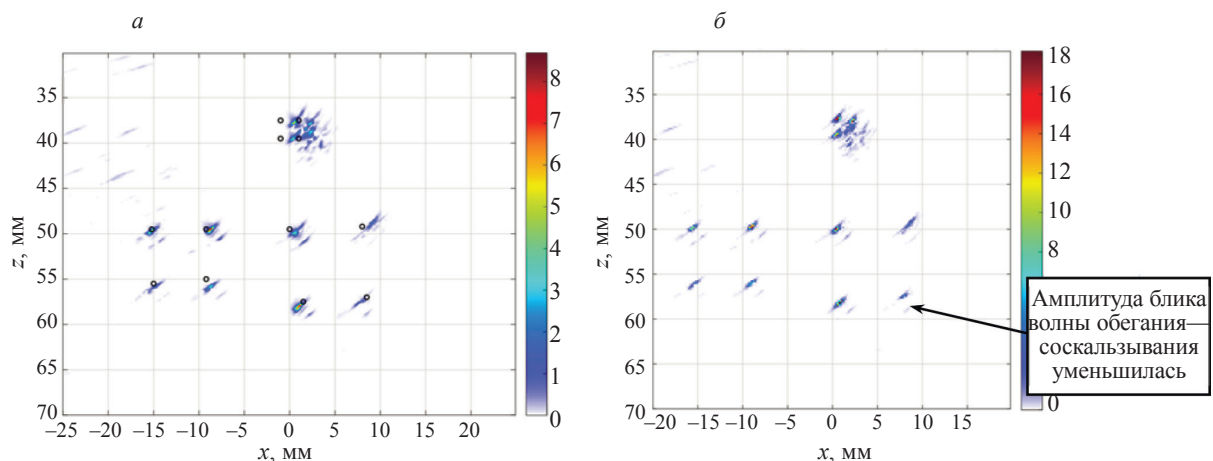


Рис. 5. ЦФА-изображение, восстановленное по акустической схеме TdT, с учетом когерентного фактора: без коррекции «паразитных» задержек (а); с коррекцией (б).

На рис. 6а показано ЦФА-изображение, восстановленное по акустической схеме LdL, без коррекции «паразитных» задержек, а на рис. 6б — с коррекцией. После коррекции амплитуда бликов возросла примерно на 3 дБ, форма бликов стала компактнее, а фронтальная разрешающая способность возросла более чем в 1,5 раза. Диагональные блики группы БЦО, наиболее близкой к поверхности, разрешились после коррекции. Следует отметить, что для восстановления изображения по

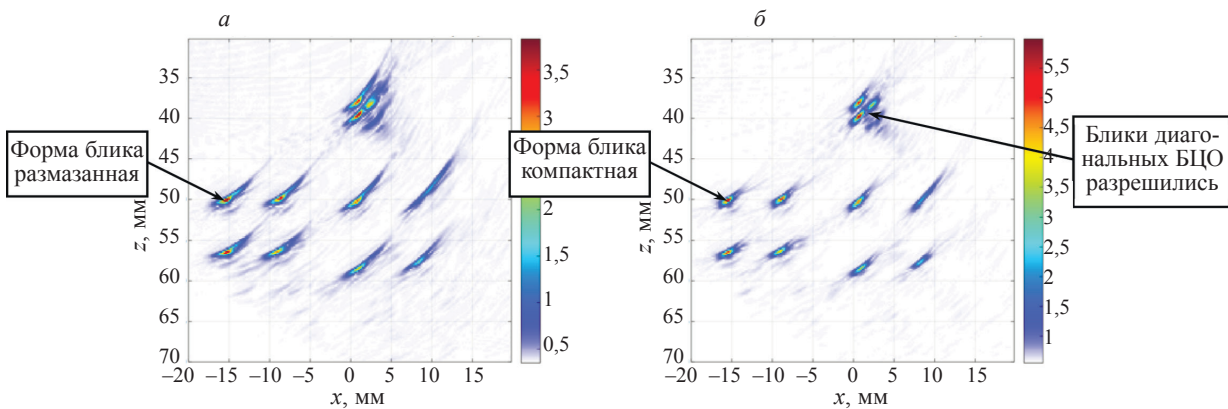


Рис. 6. ЦФА-изображение, восстановленное по акустической схеме LdL: без коррекции «паразитных» задержек (а); с коррекцией (б).

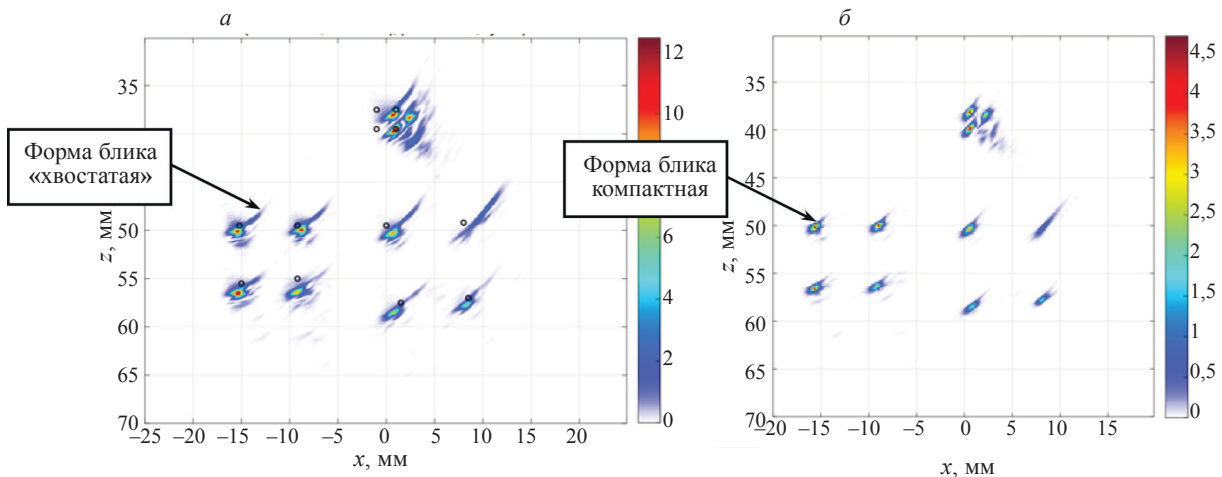


Рис. 7. ЦФА-изображение, восстановленное по акустической схеме LdL, с учетом когерентного фактора: без коррекции «паразитных» задержек (а); с коррекцией (б).

акустической схеме LdL использовались те же эхосигналы, по которым было восстановлено изображение по акустической схеме TdT. Несмотря на то, что призма имела угол наклона 35 град и предназначалась для работы на поперечной волне, изображения, восстановленные по акустической схеме LdL, имеют хорошую фокусировку и амплитуды бликов, соизмеримые с рис. 4б.

На рис. 7а показано ЦФА-изображение, восстановленное по акустической схеме LdL, с учетом когерентного фактора без коррекции «паразитных» задержек, а на рис. 7б — с коррекцией. По сравнению с рис. 6а уровень шума изображения на рис. 7а уменьшился примерно на 10 дБ, а фронтальная разрешающая способность возросла примерно в 2 раза. Однако форма бликов оставляет желать лучшего — у них по-прежнему заметные «хвосты». ЦФА-изображение, восстановленное с учетом когерентного фактора и с коррекцией «паразитных» задержек (см. рис. 7б), обладает самыми компактными бликами, что позволило повысить фронтальную разрешающую способность примерно в 3 раза, а лучевую — примерно в 1,5 раза по сравнению с исходным изображением на рис. 6а. Уровень ложных бликов изображения на рис. 7б минимален, а формы бликов практически для всех БЦО очень близки друг к другу.

На рис. 8 для более детальной оценки повышения качества изображения показан фрагмент рис. 4 с изображениям группы БЦО, наиболее близкой к поверхности: без коррекции «паразитных» задержек (а) и с коррекцией (б). Видно, что после коррекции амплитуда бликов возросла примерно на 3 дБ, они стали более компактными, что привело к примерно двукратному повышению фронтальной разрешающей способности, а отношение сигнал/шум возросло примерно на 4 дБ. На изображении видно множество ложных бликов, сформированных импульсами обе-

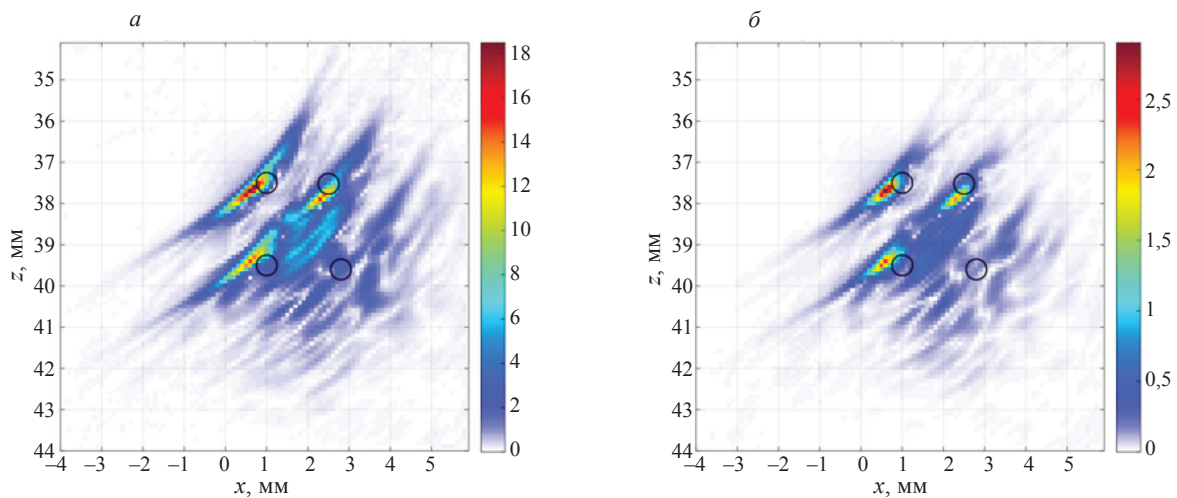


Рис. 8. Фрагмент ЦФА-изображения на рис. 4: без коррекции «паразитных» задержек (а); с коррекцией (б).

гания—соскальзывания и импульсами, перерассеянными на БЦО с учетом эффекта трансформации. Правое нижнее БЦО не удастся обнаружить из-за того, что оно затенено тремя БЦО слева и выше.

На рис. 9 показан фрагмент ЦФА-изображения на рис. 5, восстановленного с учетом когерентного фактора: без коррекции «паразитных» задержек (а) и с коррекцией (б). По сравнению с исходным изображением на рис. 8а, на рис. 9б отношение сигнал/шум возросло примерно на 11 дБ, а фронтальная разрешающая способность увеличилась примерно в три раза. Структура ложных бликов стала более разборчива из-за возросшей разрешающей способности.

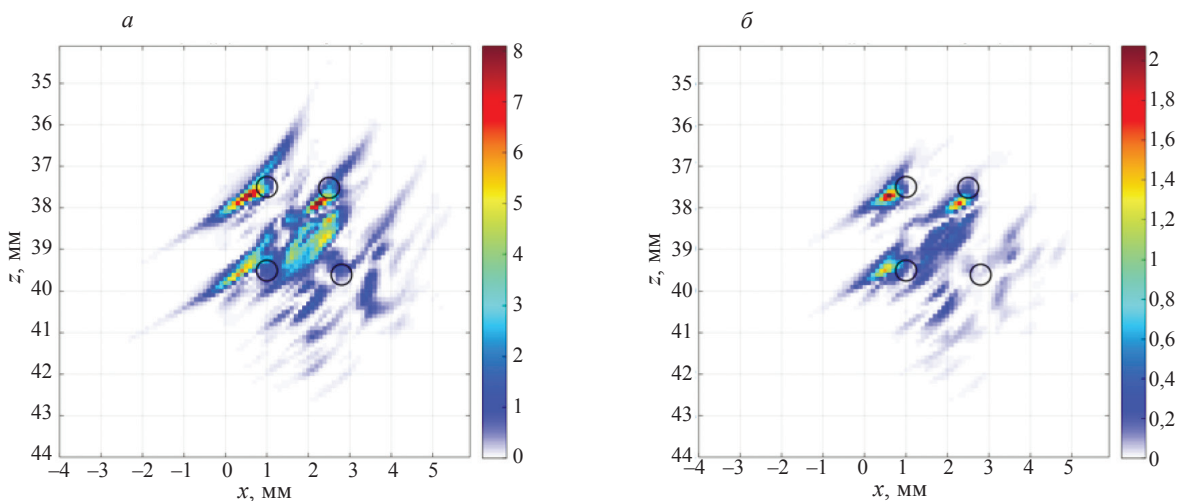


Рис. 9. Фрагмент ЦФА-изображения на рис. 5, восстановленного с учетом когерентного фактора: без коррекции «паразитных» задержек (а); с коррекцией (б).

4. ВЫВОДЫ

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

Предложен метод коррекции «паразитных» задержек, что позволяет получать ЦФА-изображение с оптимальной фокусировкой, используя антенную решетку с недопустимо большим разбросом «паразитных» задержек.

Применение когерентного фактора повысило качество изображения: уровень шума уменьшился более чем на 6 дБ, а фронтальная разрешающая способность возросла более чем в два раза.

Подобный подход можно применять для повышения качества изображения и при работе с ФАР-технологией, внося дополнительные корректирующие задержки, согласно формуле (1), на этапе излучения и суммирования принятых эхосигналов.

Автор выражает благодарность главному конструктору «Научно-производственного центра «ЭХО+» Базулину А.Е. за ценные замечания и рекомендации высказанные в процессе обсуждения статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications*. Publisher: Waltham, MA: Olympus NDT, 2007. URL: <https://www.olympus-ims.com/en/books/pa/pa-advances/> (дата обращения: 07.07.2023).
2. 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.
3. Базулин Е.Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51—75.
4. Chatillon S., Fidahoussen A., Iakovleva E., Calmon P. Time of flight inverse matching reconstruction of ultrasonic array data exploiting forwards models / NDT in Canada. 2009. National Conference. Aug. 25—27. 2009.
5. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхометод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29—41.
6. Дефектоскоп A1550 IntroVisor, URL: <http://www.introvisor.ru/> (дата обращения: 07.07.2023).
7. Bulavinov A., Dalichow M., Kröning M., Kurz J. H., Walte F., Reddy K. Quantitative Ultrasonic Testing of Pressurized Components Using Sampling Phased Array / Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation. Dec. 7 — 9. 2006. Hyderabad. P. 437—448.
8. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхометод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29—41.
9. Kang S., Lee J., Chang J.H. Effectiveness of synthetic aperture focusing and coherence factor weighting for intravascular ultrasound imaging // Ultrasonics. 2021. V. 113. P. 106364. DOI:10.1016/j.ultras.2021.106364
10. Базулин Е.Г. Использование коэффициента когерентности для повышения качества изображения отражателей при проведении ультразвукового контроля // Дефектоскопия. 2017. № 6. С. 5—17.
11. What is Phase Coherence Imaging and How Does it Work? URL: <https://inspectioneering.com/blog/2022-10-14/10281/5-advantages-of-phase-coherence-imaging-pci> (дата обращения: 07.07.2023).
12. SO 18563-2:2017 Non-destructive testing—Characterization and verification of ultrasonic phased array equipment—Part 2: Probes URL: <https://www.iso.org/standard/69427.html> (дата обращения: 07.07.2023).
13. Официальный сайт фирмы «ЭХО+». URL: <https://echoplus.ru/> (дата обращения: 07.07.2023).