

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАСПОЗНАВАНИЯ СО СЖАТИЕМ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ ЭХОСИГНАЛОВ

© 2022 г. Е.Г. Базулин<sup>1,\*</sup>

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

Поступила в редакцию 28.02.2022; после доработки 14.03.2022  
Принята к публикации 14.04.2022

Исследована возможность применения метода Compressive Sensing (CS) для повышения разрешающей способности эхосигналов. Для сравнения с методом CS был также рассмотрен применяемый в ультразвуковом контроле (УЗК) для достижения сверхразрешения метод максимальной энтропии (МЭ). В модельных экспериментах продемонстрирована возможность восстанавливать изображения отражателей со сверхразрешением, что позволяет повысить точность измерения отражателей и уменьшить уровень структурного шума. С целью уменьшения уровня шума для объединения парциальных изображений предложено использовать когерентный фактор (CF).

*Ключевые слова:* ультразвуковой неразрушающий контроль (УЗК), комбинированный SAFT (C-SAFT), Full Matrix Capture (FMC), Coherence Factor (CF), метод максимальной энтропии (МЭ), метод Compressive Sensing (CS).

DOI: 10.31857/S0130308222050037; EDN: BLPVYX

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Получение информации о внутренней структуре промышленных объектов является актуальной проблемой и относится к классу обратных задач рассеяния, которая состоит в определении количественных характеристик неизвестных несплошностей на основе наблюдения за рассеянным на них облучающим полем. Один из способов получения информации о рассеивателе заключается в восстановлении его высококачественного изображения, т.е. изображения с поперечной и фронтальной разрешающей способностью порядка четверти длины волны, высоким отношением сигнал/шум, на котором видна вся граница рассеивателя.

В настоящее время широко используется технология ультразвукового контроля (УЗК) с применением пьезоэлектрических антенных решеток (АР), излучающих и принимающих акустические волны в исследуемом объекте. Широкое применение в практике УЗК нашли две технологии восстановления изображения отражателей с использованием АР: фазированные антенные решетки (ФАР) [1] и цифровая фокусировка антенной решетки (ЦФА) [2]. В работе [3] обе технологии сравниваются, и делается вывод, что ЦФА-технология более перспективна в плане применения разнообразных алгоритмов восстановления изображения отражателей. Режим ЦФА — это технология получения акустических изображений с фокусировкой во всех точках области восстановления изображения (ОВИ). На первом этапе с помощью АР регистрируются эхосигналы при переборе всех комбинаций излучатель—приемник. Этот режим регистрации называется двойным сканированием (в зарубежных источниках — Full Matrix Capture (FMC) [4]). На втором этапе по измеренным эхосигналам методом комбинационного SAFT (C-SAFT) [5] восстанавливается изображение отражателей.

Повышение разрешающей способности изображения отражателей позволяет точнее определять размеры отражателя. Для этого разработаны относительно простые методы, например, метод когерентного фактора (CF) [6] или метод Кейпона (Caron), которые повышают лучевую разрешающую способность изображения. Существуют нелинейные методы обработки эхосигналов, позволяющие уменьшить длину импульсов в эхосигнале для достижения сверхразрешения, когда длина импульса становится меньше чем величина  $0,5/\Delta f$ , где  $\Delta f$  — полоса пропускания акусто-электрического тракта дефектоскопа. К таким методам относится алгоритм Гершберга—Папулиса [7], основанный на допущении, что на временной апертуре регистрируется ограниченное число импульсов. Метод построенная авторегрессивной модели (AR-модели) спектра эхосигнала [8] позволяет экстраполировать его за пределы полосы пропускания  $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$ . В статье [9] предложено объединить методы расщепления спектра и построения его AR-модели для уменьшения уровня структурного шума в изображении отражателей. Для достижения сверхразрешения эхосигналов можно использовать метод деконволюции Бернулли—Гаусса (DBG)

[10, 11]. Отметим еще один метод — деконволюция Люси—Ричардсона [12, 13], разработанный для обработки изображений, которая реализована и в так называемом «слепом» варианте, когда отклик системы точно не известен. Деконволюция Люси-Ричардсона изначально была рассчитана на работу с положительными функциями и по этой причине она нашла широкое применение при обработке изображений. Важно отметить, что за счет уменьшения длины импульсов можно уменьшить уровень спеклового шума при УЗК сложноструктурных материалов [14].

Особый класс составляют методы, которые так же относятся к классу нелинейных, позволяющие получать изображения по неполным данным. Это метод максимальной энтропии (МЭ) [15] и метод распознавания со сжатием (в зарубежной литературе Compressive Sensing (CS)) [16—18]. Оба алгоритма позволяют восстановить изображение отражателей со сверхразрешением и с малым уровнем «боковых лепестков» функции рассеивания точки, используя меньше 10 % эхосигналов от полного набора. Отметим, что метод CS при определенных условиях позволяет дополнительно уменьшить объем данных, необходимых для восстановления высококачественного изображения отражателей. В настоящий момент метод CS пытаются активно применять в различных областях: компьютерная томография [20], УЗК [19], магнитно-резонансная томография [20, 21], фотоакустическая томография [22], радиолокация [23] и многих других.

Данная статья посвящена попытке применить метод CS для достижения сверхразрешения эхосигналов, что позволит восстановить изображения отражателей с высокой лучевой разрешающей способностью и низким уровнем спеклового шума.

## 2. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ЭХОСИГНАЛОВ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ

В этом разделе вкратце рассмотрим два нелинейных метода достижения сверхразрешения эхосигналов: метод МЭ и метод CS.

### 2.1. Метод максимальной энтропии

В 1948 г. К. Шеннон [24] использовал понятие энтропии для оценки объема информации сообщения, состоящего из конечного набора символов алфавита. В текстовом сообщении заключен максимальный объем информации, если за любым знаком в сообщении может появиться с одинаковой вероятностью любой знак алфавита. С комбинаторной точки зрения такое сообщение позволяет ограниченным набором символов алфавита создать максимальное количество разных сочетаний. С точки зрения повышения разрешающей способности, применение в качестве регуляризирующего функционала энтропии позволяет перенести поиск решения на множество эхосигналов, в которых за любым отсчетом может следовать отсчет с любым значением, т.е. ограничение на крутизну фронта решения эхосигнала снимается. Так при обычной деконволюции фронт сигнала практически не меняется, т.е. за буквой «ь» никогда не появится буква «ь», но после регуляризации крутизна фронта может возрасти — за буквой «ь» может появиться любая буква, в том числе и «ь».

Связь между измеренным эхосигналом  $\mathbf{s}$  и неискаженным сигналом  $\mathbf{\varepsilon}$  можно записать в матричном виде системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\mathbf{s} = \mathbf{G}\mathbf{s}_{\infty} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

где матрица  $\mathbf{G}$  описывает импульсный отклик электро-акустического тракта дефектоскопа, вектор  $\mathbf{n}$  — шум измерений. Матрицу  $\mathbf{G}$  можно сформировать как циркулянтную, из экспериментально измеренного импульсного отклика  $\mathbf{g}$  дефектоскопа. Так как матрица  $\mathbf{G}$  плохо обусловлена, то один из способов оценки  $\mathbf{\varepsilon}$  из уравнения (1) сводится к задаче безусловной оптимизации, когда в качестве критерия качества восстановленного изображения выбирается квадрат невязки решения

$$\chi^2(\hat{\mathbf{\varepsilon}}) = \|\mathbf{G}\hat{\mathbf{\varepsilon}} - \mathbf{s}\|^2 = (\mathbf{G}\hat{\mathbf{\varepsilon}} - \mathbf{s})^T (\mathbf{G}\hat{\mathbf{\varepsilon}} - \mathbf{s}), \quad (2)$$

где символ  $T$  обозначает операцию транспонирования. Оценку  $\hat{\mathbf{\varepsilon}}$  можно записать в виде:

$$\hat{\mathbf{\varepsilon}} = \underset{\hat{\mathbf{\varepsilon}} \in R^N}{\operatorname{argmin}} (\chi^2(\hat{\mathbf{\varepsilon}})), \quad (3)$$

где  $N$  — размеры эхосигнала в отсчетах. Дальнейшее развитие метода (3), так называемая регуляризация по Тихонову [25], заключается в добавлении к невязке штрафного функционала, один из вариантов которого имеет вид максимальной энтропии, так называемой кросс-энтропии [26]:

$$H(\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}) = -\sum_{i=1}^N \hat{\varepsilon}_i \ln \left( \frac{\hat{\varepsilon}_i}{\mu} \right), \quad (4)$$

где  $\mu$  — оценка среднего значения интенсивности фона изображения. Таким образом, решение задачи сводится к минимизации невязки следующего выражения:

$$\hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \underset{\hat{\boldsymbol{\varepsilon}} \in R^N}{\operatorname{argmin}} (\chi^2(\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}) - \alpha H(\hat{\boldsymbol{\varepsilon}})), \quad (5)$$

где  $\alpha$  — параметр регуляризации. Важное свойство функционала в виде энтропии заключается в том, что, используя формулу (5), можно получить оценку экосигнала со сверхразрешением. Статья [27] посвящена получению изображения отражателей со сверхразрешением методом МЭ по экосигналам, измеренным ультразвуковой антенной решеткой.

## 2.2. Метод распознавания со сжатием (CS)

Идея метода CS заключается в переходе от определенной СЛАН размерностью  $N \times N$  (согласно (1)) к решению недоопределенной СЛАН размерностью  $K \times N$ , причем при  $K \ll N$ . Переход к недоопределенной СЛАН можно осуществить, используя матрицу  $\mathbf{A}$  размерами  $N \times K$  и сводя задачу (1) к уравнению:

$$\mathbf{s}_{CS} = \mathbf{A}\mathbf{s} = \mathbf{A}\mathbf{G}\hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \boldsymbol{\Phi}\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}, \quad \text{где } \boldsymbol{\Phi} = \mathbf{A}\mathbf{G}, \quad (6)$$

в которой результаты измерений представлены как вектор  $\mathbf{s}_{CS}$  длиной всего  $K$  «отсчетов». Такая постановка задачи позволяет уменьшить объем данных для работы в  $N/K$  раз. Для однозначного решения задачи (6) нужно, чтобы сигнал  $\mathbf{s}_{CS}$  обладал определенными свойствами, специальным образом определить матрицу  $\mathbf{A}$  при переходе к недоопределенной системе СЛАН и разработать методы решения задачи (6).

Необходимым условием работы CS-метода, т.е. однозначного решения недоопределенного уравнения (6), является разреженность восстанавливаемого сигнала  $\boldsymbol{\varepsilon}$ . Сигнал называется  $S$ -разреженным [16], если большинство его элементов равны нулю и

$$\|\boldsymbol{\varepsilon}\|_0 = S \ll N, \quad (7)$$

где  $\|\boldsymbol{\varepsilon}\|_0$  — норма  $l_0$ , представляющая собой количество ненулевых компонент в векторе  $\boldsymbol{\varepsilon}$  и  $N$  — длина вектора  $\boldsymbol{\varepsilon}$ . Отметим, что условие разреженности предполагает восстановление импульса экосигнала в виде  $\delta$ -функции, т.е. восстановление формы сигнала со сверхразрешением.

Для разреженного сигнала  $\boldsymbol{\varepsilon}$  можно подобрать специальную матрицу  $\mathbf{A}$  размерами  $K \times N$ , причем  $K$  связан с разреженностью  $S$  через формулу (11) или (12). Для применимости метода CS, согласно [16], необходимыми и достаточными являются следующие условия.

1) Сигнал  $\boldsymbol{\varepsilon}$  должен быть  $S$ -разреженным, т.е. в базисе  $\mathbf{G}$  иметь вид:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \sum_{i=1}^S \varepsilon_i \mathbf{G}_i, \quad (8)$$

где среди  $N$  отсчетов только  $S$  отсчетов  $\varepsilon_i \neq 0$ .

2) Должно выполняться «свойство ограниченной изометрии» (Restricted Isometry Property) [28]

$$\sqrt{1-\delta} \leq \frac{\|\mathbf{A}\mathbf{G}\boldsymbol{\varepsilon}\|_2}{\|\boldsymbol{\varepsilon}\|_2} \leq \sqrt{1+\delta}, \quad (9)$$

где  $\delta \in (0,1)$  и  $\boldsymbol{\varepsilon}$  — произвольный ненулевой вектор. Это свойство означает, что после воздействия оператора  $\mathbf{A}\mathbf{G}$  на вектор  $\boldsymbol{\varepsilon}$   $l_2$ -норма вектора  $\mathbf{s}_{CS}$  не может стать равной нулю или превысить норму вектора  $\boldsymbol{\varepsilon}$  в  $\sqrt{2}$  раз.

3) Матрицы  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{G}$  должны удовлетворять свойству некогерентности, т.е. вектора матриц  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{G}$  должны быть практически ортогональны между собой:

$$\mu(\mathbf{A}, \mathbf{G}) = \sqrt{N} \max_{i,j} \frac{|\langle \mathbf{a}_i, \mathbf{G}_j \rangle|}{\|\mathbf{a}_i\|_2}. \quad (10)$$

Из работы [18] следует, что с высокой долей вероятности точное восстановление  $S$ -разреженных векторов по  $K$  измерениям будет достигнуто при выполнении следующего условия:

$$K \geq c\mu(\mathbf{A}, \mathbf{G})^2 S \log N, \quad (11)$$

где  $c$  — некоторая положительная константа. Хорошие результаты получаются и для более простого соотношения

$$K = 4 \cdot S \cdot \log(N / S). \quad (12)$$

Матрица  $\mathbf{A}$ , составленная из случайных чисел, с большой вероятностью удовлетворяет второму и третьему из перечисленных выше требований. Существуют различные принципы построения рандомизированных матриц [29]. При расчете матрицы  $\mathbf{A}$  в данной статье использовалось распределение Бернулли [30].

Один из вариантов решения задачи (6), называемой LASSO-задачей [31], которая заключается в минимизации  $\|\mathbf{s}_{CS} - \mathbf{A}\mathbf{G}\hat{\mathbf{e}}\|_2$  при условии разреженности вектора  $\mathbf{e}$ , можно представить как

$$\|\mathbf{s}_{CS} - \mathbf{A}\mathbf{G}\hat{\mathbf{e}}\|_2 \rightarrow \min \text{ для таких, что } \|\hat{\mathbf{e}}\|_1 < \tau, \quad (13)$$

где  $\tau$  — параметр, учитывающий разреженность вектора  $\mathbf{e}$ . Оценка  $\hat{\mathbf{e}}$  по формуле (13) проводилась при использовании библиотеки SPGL1 [32]. Изящная геометрическая интерпретация работы метода CS приведена в работе [16]. Так как степень приближения оценки сигнала  $\hat{\mathbf{e}}$  к точному решению  $\mathbf{e}$  зависит от рандомизирующей матрицы  $\mathbf{A}$ , то задача решалась для нескольких вариантов  $\mathbf{A}$ , а оценка сигнала бралась как среднее по всем решениям.

### 3. ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Для уменьшения уровня структурного шума, кроме известного приема, связанного с уменьшением длительности импульсов, например, методом МЭ или CS, можно воспользоваться следующим способом [33]. Пусть АР находится в точке  $\mathbf{r}_w$ . Обозначим через  $I_m(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)$  ЦФА-изображение, восстановленное в заданных точках  $\mathbf{r}_i$  (ОВИ) по выстрелу номер  $m$ , т.е. по эхосигналам, измеренным всеми элементами АР при излучении зондирующего импульса элементом номер  $m$ . Тогда обычное ЦФА-изображение можно получить, когерентно сложив все изображения по выстрелам:

$$I_S(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w) = \sum_{m=1}^{N_e} I_m(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w), \quad (14)$$

где  $N_e$  — число элементов АР. Но объединить парциальные повывстрельные изображения  $I_m(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)$  можно иным способом. Можно рассчитать когерентный фактор (CF) для каждой точки  $\mathbf{r}_i$  по формуле:

$$I_{CF}(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w) = CF \left( I_m(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w) \right), \quad (15)$$

а в качестве изображения рассматривать функцию

$$I(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w) = I_S(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w) \cdot I_{CF}(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w). \quad (16)$$

Важное свойство когерентного фактора  $CF$  состоит в том, что его значение при отсутствии шума не зависит от амплитуды блика обычного изображения  $I_S(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)$ . Поэтому амплитуды бликов изображения, полученные по формуле (14) или (16), будут примерно одинаковы.

В режиме тройного сканирования, когда АР сканирует, итоговое изображение можно получить обычным когерентным сложением изображений  $I_S(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)$  или  $I(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_{w,p})$  по всем  $N_p$  положениям АР:

$$I(\mathbf{r}_i) = \sum_{p=1}^{N_p} I(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_{w,p}). \quad (17)$$

#### 4. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В данном разделе представлены результаты восстановления изображений несплошностей в образцах с применением описанных выше алгоритмов. Для регистрации эхосигналов использовался ЦФА-дефектоскоп «АВГУР АРТ», который разрабатывает и изготавливает «Научно-производственный центр неразрушающего контроля «ЭХО+» [34].

##### 4.1. Два БЦО диаметром 3 мм в стальном образце

В образце из стали марки Ст20 толщиной 25 мм на глубинах 5 и 15 мм были просверлены два боковых цилиндрических отверстия (БЦО) диаметром 3 мм. Для регистрации эхосигналов использовались две АР (5 МГц, 32 элемента, размер пьезоэлемента  $0,9 \times 10$  мм, зазор между пьезоэлементами 0,1 мм), установленные на одинаковые рексолитовые призмы с углом наклона 35 град. Одна АР находилась на расстоянии  $-20$  мм с азимутом 0 град (N-сторона), а вторая — на расстоянии 22,5 мм с азимутом 180 град (P-сторона). Эхосигналы измерялись по NN-, PP- и NP-каналам. NP-канал — это когда АР с N-стороны излучает зондирующие импульсы, а АР с P-стороны регистрирует эхосигналы.

Изображения по NN-каналу и PP-каналу восстанавливались по шести акустическим схемам на поперечной волне: TdT, TdTТ, TdTТТ, TdTТТТ, TdTТТТТ и TdTТТТТТ. Изображения по NP-каналу восстанавливались по трем акустическим схемам: TdT, TdTТТ и TdTТТТТТ. Схематический ход лучей для разных схем показана в табл. 1. Все 15 парциальных изображений по трем каналам для получения итогового изображения складывались по модулю.

На рис. 1а показано итоговое ЦФА-изображение по измеренным эхосигналам при объединении парциальных изображений по формулам (14) и (17). Отметим, что оригинальные изображения отражателей цветные, и в черно-белой палитре соответствие уровня изображения и шкалы серого могут быть искажены. На рис. 1 двумя окружностями черного цвета показаны контуры БЦО. На рис. 1а восстановлены блики, позволяющих увидеть практически всю границу двух БЦО, блики поверхности и дна образца. Однако на изображении довольно высокий уровень шума, а из-за невысокой лучевой разрешающей способности и появления ложных бликов, сформированных импульсом Релея обегания—соскальзывания, границы БЦО достаточно размыты. На рис. 1б показано итоговое изображение при использовании CF по формулам (16) и (17). Уровень шума уменьшился более чем на 6 дБ, и из-за возросшей лучевой разрешающей способности изображения удается различить блики обегания.

При преломлении поперечной волны за первым критическим углом и отражении от мягкой границы объекта контроля за третьим критическим углом фаза эхосигнала может существенно

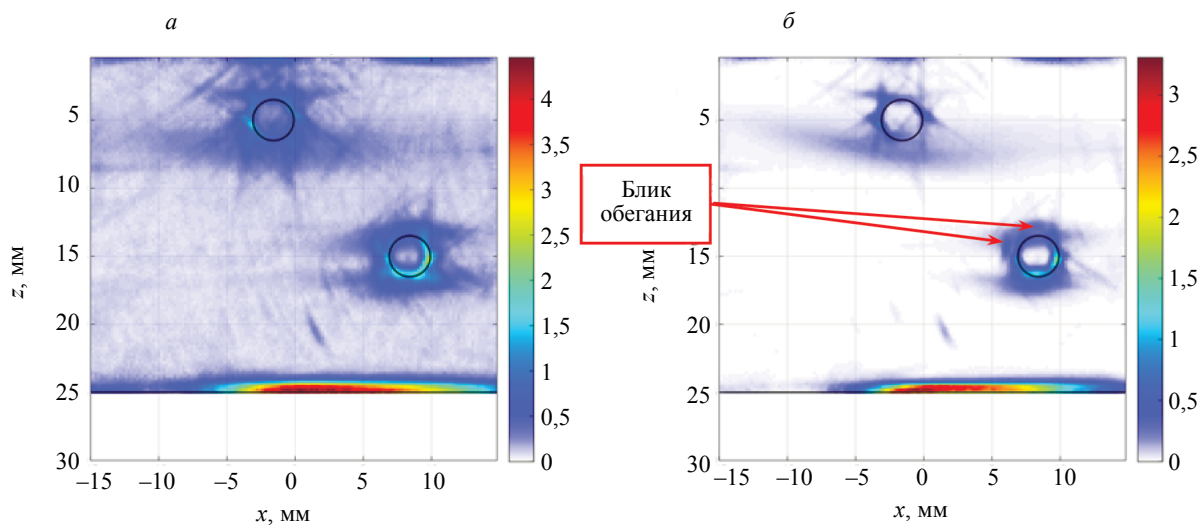
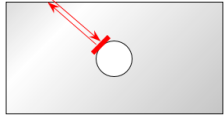
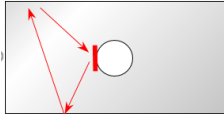
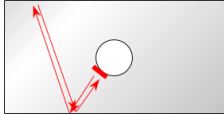
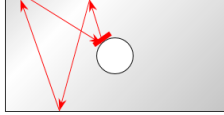
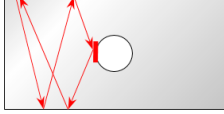
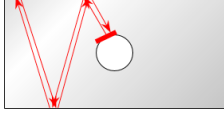
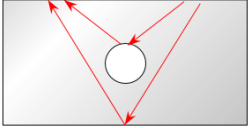
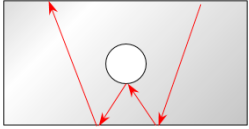
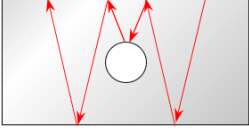


Рис. 1. Изображение двух БЦО, восстановленных по измеренным эхосигналам при объединении парциальных изображений:

а — по формулам (14) и (17); б — по формулам с учетом когерентного фактора (16) и (17).

Таблица 1

Список акустических схем

	Акустический канал	Название акустической схемы	Схема лучевой траектории
1.	NN-канал	TdT	
2.		TdTT	
3.		TTdT	
4.		TdTTT	
5.		TTdTTT	
6.		TTTdTTT	
7.	PP-канал	TdT	Те же схемы, что и NN-канал, но зеркально отраженные относительно вертикальной линии
8.		TdTT	
9.		TTdT	
10.		TdTTT	
11.		TTdTTT	
12.		TTTdTTT	
13.	NP-сторона	TdT	
14.		TTdT	
15.		TTTdTTT	

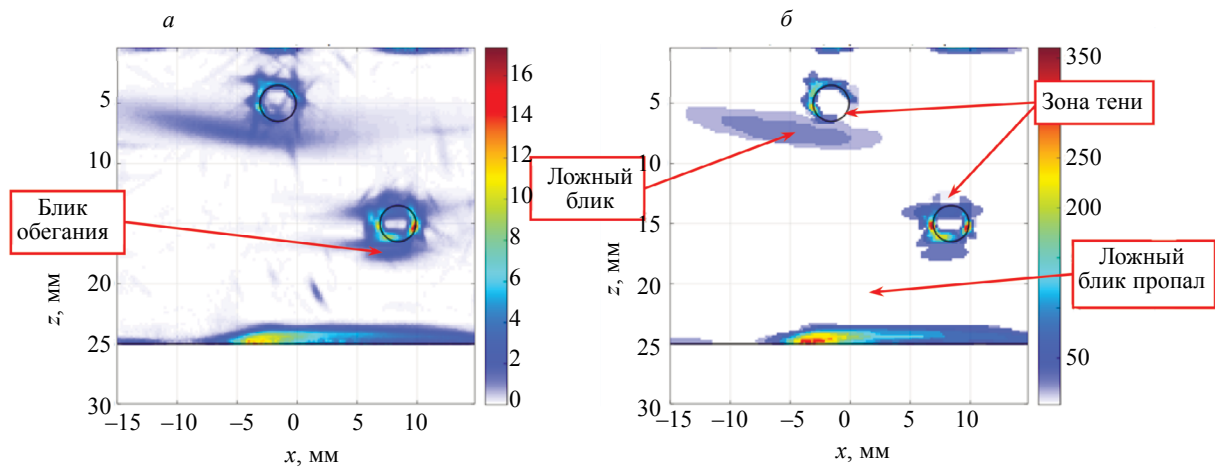


Рис. 2. Изображение двух БЦО, восстановленных по измеренным эхосигналам при объединении парциальных изображений:

*а* — по формулам с учетом когерентного фактора (16) и (17); *б* — после применения фильтра AADF.

изменится. Коррекция этой фазы должна повысить фокусировку изображения отражателей [35]. На рис. 2*а* показано итоговое изображение с компенсацией фазы эхосигналов и с учетом CF по формулам (16) и (17). По сравнению с изображением на рис. 1*б* амплитуда блика границы стала более равномерна.

Для автоматизированного распознавания типа отражателя и определения его размеров изображение нужно выделить области с отражателями и без них. В теории обработки изображений для этих целей разработано множество текстурных фильтров. Один из текстурных фильтров — это адаптивный анизотропный диффузный фильтр (AADF) [35]. Авторам этого алгоритма удалось провести аналогию между текстурной обработкой изображения и процессом диффузии. AADF проводит селекцию бликов по крутизне фронтов и по сути бинаризует изображение отражателей, позволяя сконцентрировать внимание на бликах, за которыми скрываются потенциальные дефекты [37]. На рис. 2*б* показан результат обработки фильтром AADF изображения на рис. 2*а*: уровень шума стал нулевым и остался только один ложный блик, который возник по акустической схеме TdT по PN-каналу из-за ошибки в 0,5 мм задания координат призмы. Еще один ложный блик на рис. 2*а* с координатами (2, 21) мм на AADF-изображении исчез, так как он недостаточно сфокусирован и поэтому быстро «растворился».

На рис. 3*а* показано изображение БЦО с компенсацией фазы эхосигналов и с использованием CF по формулам (16) и (17) после применения метода МЭ по формуле (5) ( $\alpha = 0,01$ ,  $\mu = 10^{-6}$ ).

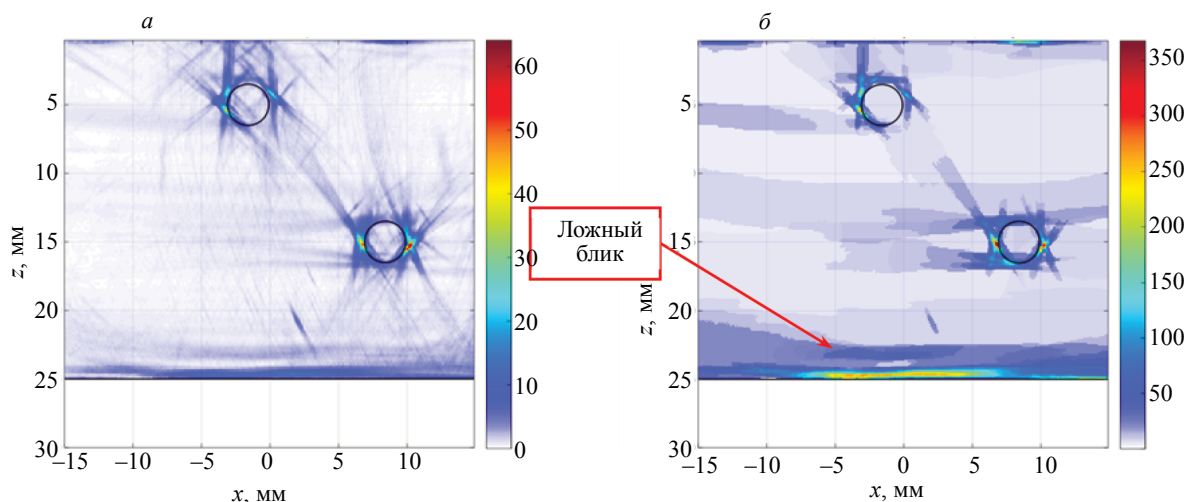


Рис. 3. Изображение двух БЦО, восстановленных по МЭ-эхосигналам при объединении парциальных изображений:

*а* — по формулам с учетом когерентного фактора (16) и (17); *б* — после применения фильтра AADF.

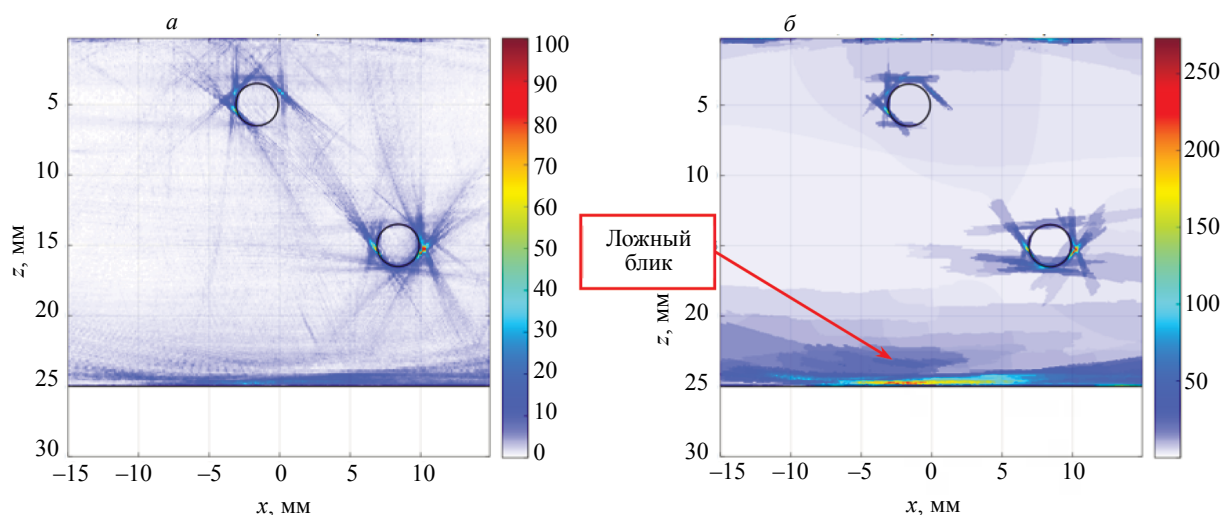


Рис. 4. Изображение двух БЦО, восстановленных по CS-эхо сигналам при объединении парциальных изображений: а — по формулам с учетом когерентного фактора (16) и (17); б — после применения фильтра AADF.

Лучевая разрешающая способность изображения возросла примерно в два раза по сравнению с рис. 2а. На рис. 3б показан результат применения фильтра AADF: блики границы БЦО стали более заметны, но в области дна появился слабо локализованный ложный блик, который был практически незаметен на исходном изображении. Природа этого ложного блика такая же, что и на рис. 2.

На рис. 4а показано изображение БЦО с компенсацией фазы эхосигналов и с использованием CF по формулам (16) и (17), после их обработки методом CS по формуле (13) ( $\tau = 5, N_A = 10$ ) с матрицей  $\Phi$  размерами  $K \times N$  ( $400 \times 1751$ ). Десять парциальных CS-изображений объединялись в итоговое как сумма. На рис. 3б показан результат применения фильтра AADF. Изображения на рис. 4 имеет более высокую разрешающую способности и меньше ложных бликов по сравнению с рис. 3.

#### 4.2. Неровность на внутренней поверхности трубы

На рис. 5 приведена схема эксперимента в иммерсионном варианте с цилиндрическим образцом диаметром 84 мм и толщиной стенки 2,8 мм, на внутренней поверхности которого была выполнена неровность высотой 0,3 мм и размерами 3 мм (см. рис. 5). Для регистрации эхосигналов использовалась АР (5 МГц, 64 элемента, размер пьезоэлемента  $0,5 \times 10$  мм, зазор между пьезоэлементами 0,1 мм), установленная на плексигласовую призму с фокусом 22 мм (см. рис. 5б). В плоскости  $xz$  изображение восстанавливается по ЦФА-технологии, а в плоскости  $yz$  фокусировка достигается за счет использования линзы.

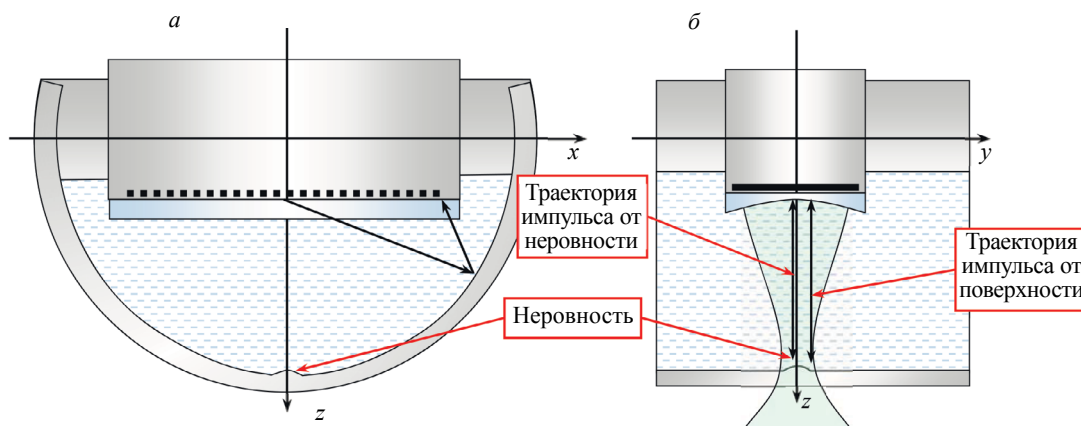


Рис. 5. Схема проведения измерения эхосигналов внутри трубы.



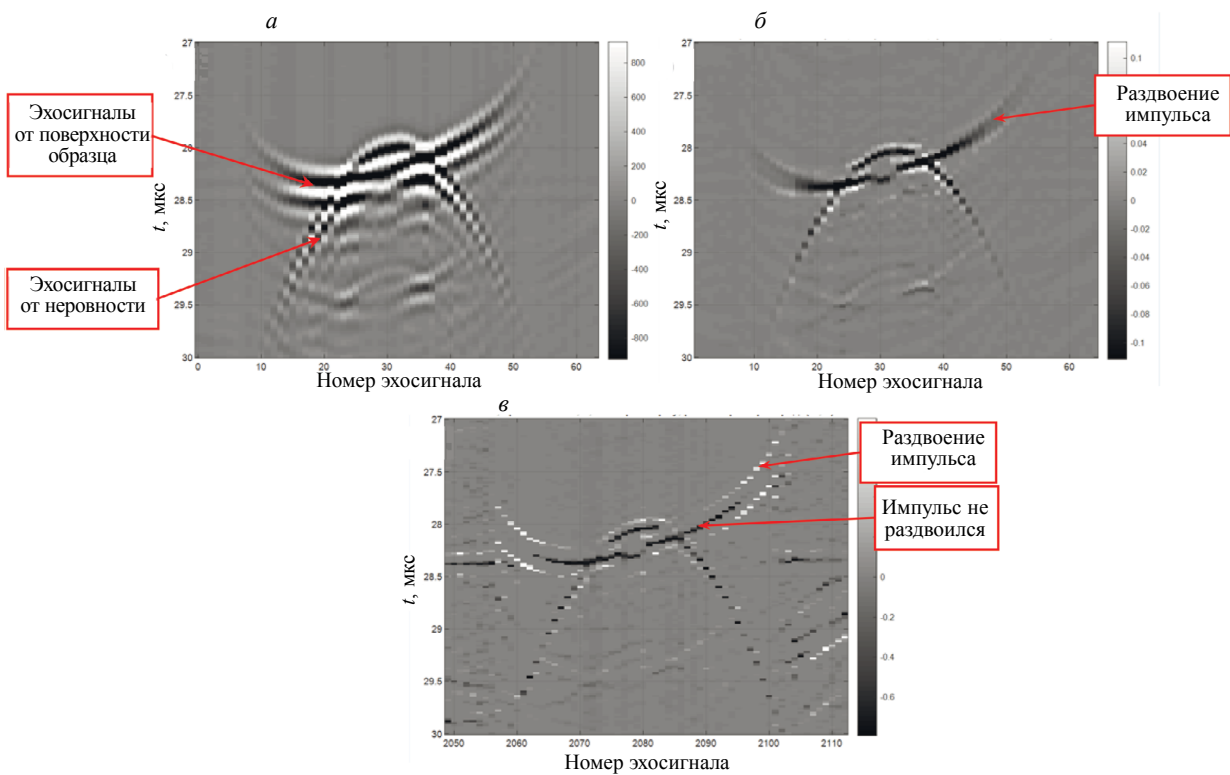


Рис. 6. Эхосигналы 32-го выстрела от поверхности цилиндрического образца:  
 а — исходные; б — после метода МЭ; в — после метода CS.

На рис. 6а показаны измеренные эхосигналы 32-го выстрела поверхности образца, на котором хорошо видны эхосигналы, отраженные от поверхности образца и от неровности высотой 0,3 мм. На рис. 6б показаны эхосигналы после их обработки методом МЭ. Эхосигналы от поверхности, измеренные крайними элементами АР, раздваиваются. Это объясняется тем, что при удалении от акустической оси 32-го элемента АР форма эхосигнала изменяется. На рис. 5а показана акустическая ось 32-го элемента, совпадающая с осью  $z$ , а стрелками черного цвета схематически показан путь лучей от 32-го элемента до 64-го элемента. Модификация метода МЭ, предложенная в статье [38], позволяет учесть этот эффект. Импульс от неровности поверхности после применения метода МЭ уменьшил свою длительность примерно в три раза. На рис. 6в показаны эхосигналы после их обработки методом CS. Эхосигналы от поверхности, измеренные крайними элементами решетки, раздваиваются по причине, рассмотренной для метода МЭ. Импульс от неровности поверхности уменьшил свою длительность более чем в пять раз и принял форму близкую к  $\delta$ -импульсу.

Изображение восстанавливалось с учетом неровной поверхности [38]. На первом этапе определялся профиль поверхности, а на втором этапе с его учетом восстанавливалось изображение отражателей в образце. На рис. 7 показаны ЦФА-изображения, восстановленные по измеренным эхосигналам, по МЭ-эхосигналам ( $\alpha = 10$ ,  $\mu = 10^{-6}$ ) и по CS-эхосигналам. На рисунке линиями черного цвета показаны контуры образца с неровностью поверхности в координатах  $xz$  (по сравнению с рис. 5а). У изображении на рис. 7 (по сравнению с рис. 5а) ось  $z$  поменяла направление. Лучевая разрешающая способность МЭ-изображения возросла примерно в три раза (см. рис. 7б) и неровность поверхности стала видна более отчетливо. Так как центральная частота импульсов возросла, а шаг АР не изменился, то на изображении появился шум грубого шага АР. На рис. 7в показано изображение, восстановленное по CS-эхосигналам ( $\tau = 2$ ,  $N_A = 10$ ) по формуле (13) с матрицей Ф размерами  $K \times N$  ( $100 \times 151$ ). Десять парциальных CS-изображений объединялись в итоговое изображение как среднее. Лучевая разрешающая способность CS-изображения по сравнению с МЭ-изображением дополнительно возросла примерно в два раза и блик неровности на поверхности стал заметен. Его появление связано с размерами фокуса вдоль оси  $y$  равным примерно 3 мм, что привело к регистрации эхосигнала не только от неровности, но и от поверхности образца (две двухсторонние стрелки черного цвета на рис. 5б). Изогнутая форма блика объясняется тем, что

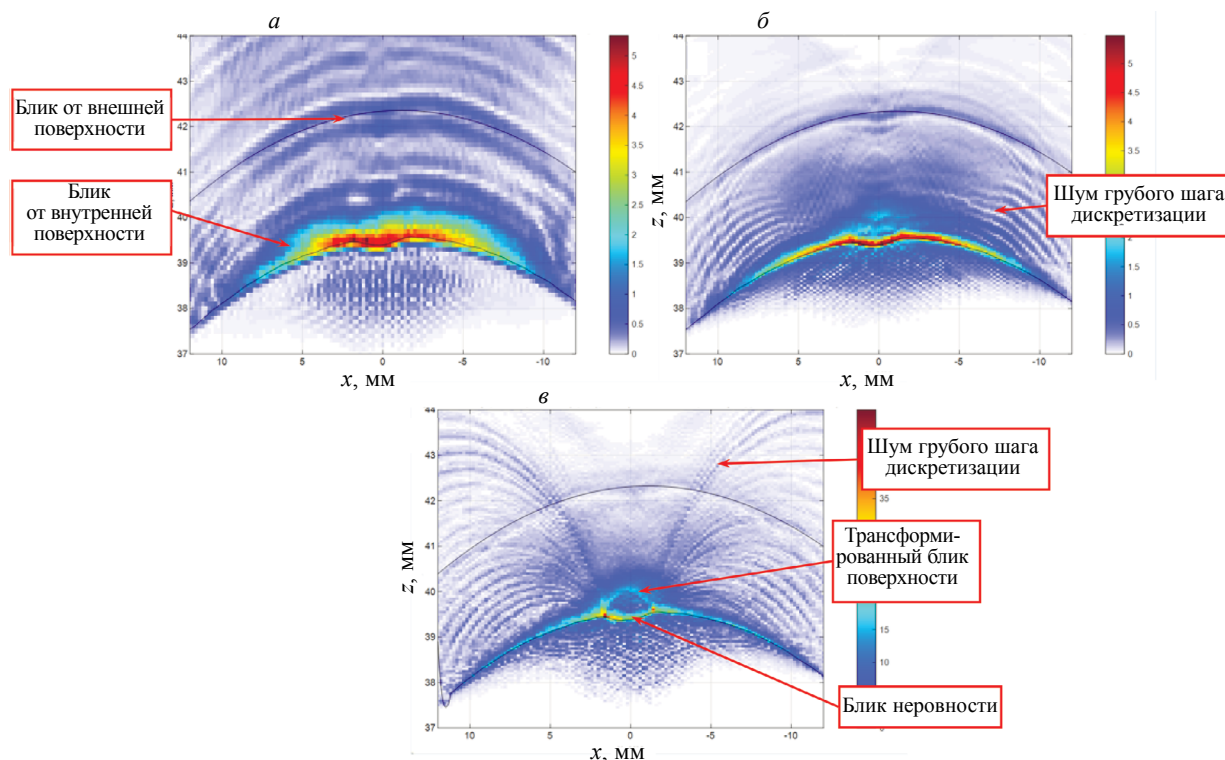


Рис. 7. ЦФА-изображение поверхности цилиндрического образца, восстановленное по исходным эхосигналам (а), по МЭ-эхосигналам (б) и по СЭ-эхосигналам (в).

регистрация эхосигналов происходит в воде, а восстановление изображения отражателей — в объекте, скорость в котором значительно больше, чем в воде. На МЭ-изображении блик поверхности не так ярко выражен. На СЭ-изображении появился шум грубого шага АР, также, как и на МЭ-изображении.

### 4.3. Два БЦО диаметром 6 мм в образце из бронзы

В образце из бронзы марки БрХ0,8 на глубинах 30 и 50 мм было просверлено два БЦО диаметром 6 мм. Для регистрации эхосигналов использовалась АР (2,25 МГц, 20 элементов, размер пьезоэлемента 1,1×10 мм, зазор между пьезоэлементами 0,1 мм), установленная на плексигласовую призму с углом наклона 20 град. Эхосигналы измерялись в режиме тройного сканирования, когда АР перемещалась 70 раз с шагом 1 мм по поверхности образца.

Анализ типа анизотропии позволил определить ее как трансверсально-изотропную [39] и оценить коэффициенты ее упругости. Все изображения в этом разделе получены с учетом анизотропии. В данном образце высокий уровень структурного шума, а для его уменьшения можно воспользоваться методом, рассмотренным в разделе 3. На рис. 8а показано ЦФА-изображение, восстановленное на продольной волне (акустическая схема LdL) по измеренным эхосигналам при объединении по формулам (14) и (17). На рис. 8 окружностями черного цвета нанесены контуры БЦО. На изображении можно обнаружить блик части границы БЦО на глубине 30 мм и спекловый шум с характерной структурой, амплитуда которого уменьшается по мере удаления точки  $r_i$  ОВИ от положения АР. Блик границы БЦО на глубине 50 мм менее заметен на рис. 8а. Объединение парциальных изображений по формулам и уменьшает уровень шума примерно на 8 дБ (рис. 8б). Восстановление изображения отражателей без учета анизотропии привело к смещению бликов примерно на -3 мм по оси  $x$  и к увеличению их поперечных размеров примерно в два раза.

На рис. 9 показаны изображение БЦО на глубине 50 мм, на рис. 9а показано изображение, восстановленное по измеренным эхосигналам с объединением парциальных изображений по формулам (14) и (17), а на рис. 9б — с использованием СФ по формулам (16) и (17). МЭ-изображение,

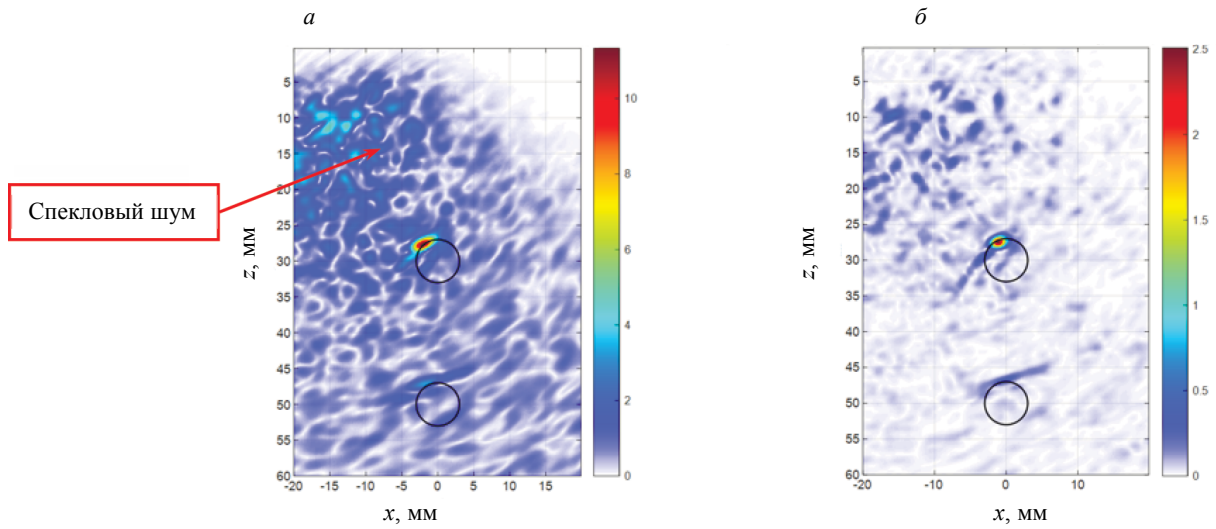


Рис. 8. ЦФА-изображение, восстановленное по измеренным экосигналам.

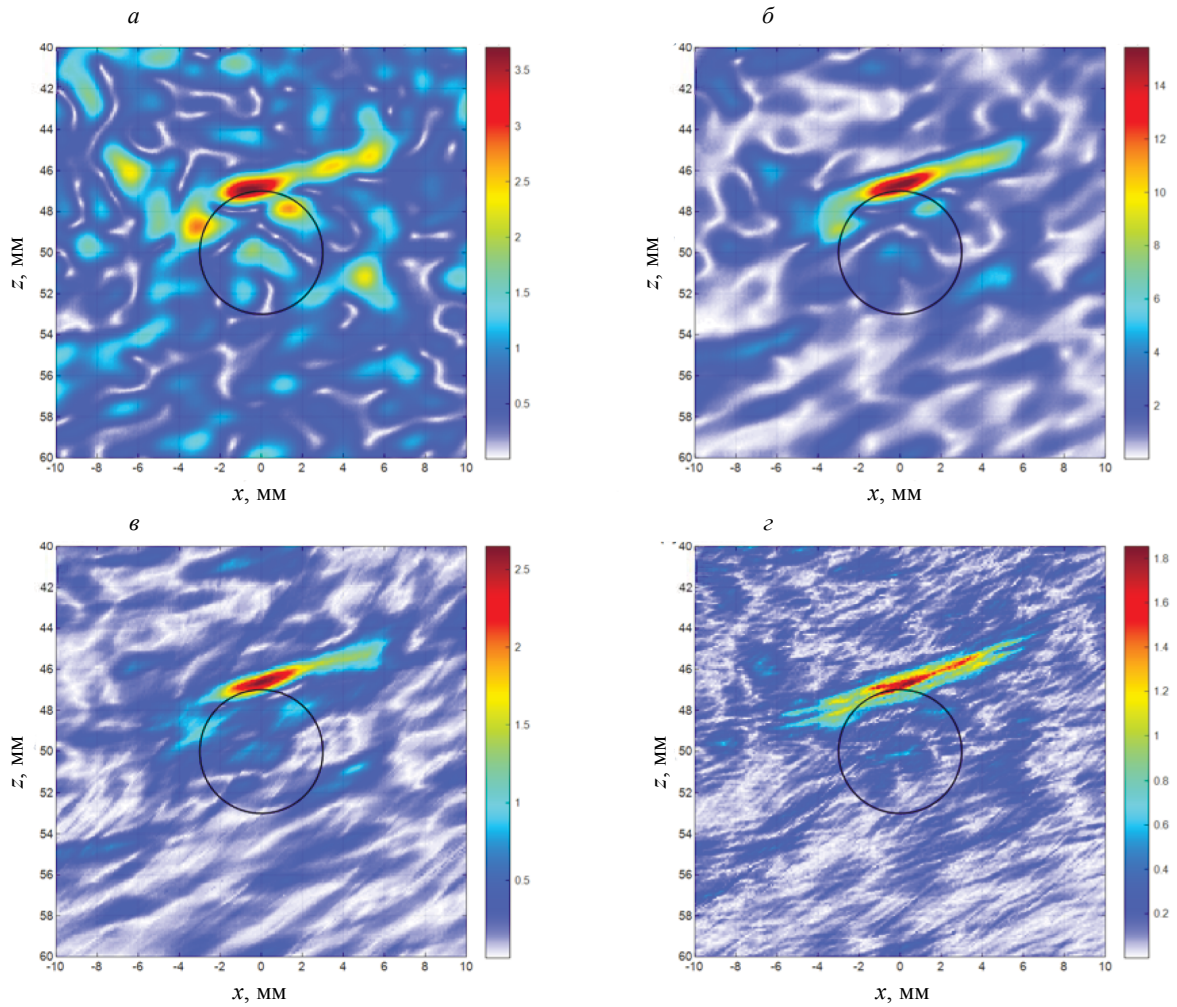


Рис. 9. Изображение БЦО на глубине 50 мм, восстановленное по исходным экосигналам при сложении по формулам (14) и (17) (а); с использованием CF по формулам (16) и (17) (б); по МЭ-экосигналам (в); по CS-экосигналам (г).

восстановленное по формуле (5) ( $\alpha = 0,01$ ,  $\mu = 10^{-6}$ ) с использованием CF показано на рис. 9в. Лучевая разрешающая способность изображения возросла примерно в два раза по сравнению с рис. 9б, уровень шума уменьшился примерно на 1,5 дБ. На рис. 9г показано изображение ( $\tau = 5$ ,  $N_A = 10$ ), восстановленное по CS-эхосигналам по формуле с матрицей  $\Phi$  размерами  $K \times N$  ( $400 \times 751$ ). Десять парциальных CS-изображений объединялись в итоговое как сумма. Лучевая разрешающая способность CS-изображения возросла примерно в два раза по сравнению с МЭ-изображением, а уровень шума уменьшился на 1,5 дБ. Сравнивая CS-изображение (см. рис. 9г) и обычное ЦФА-изображение (см. рис. 9а), можно утверждать, что удалось повысить лучевую разрешающую способность примерно в три раза, а уровень структурного шума уменьшить примерно на 13 дБ.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложено использовать метод CS для обработки эхосигналов, измеренных антенной решеткой, с целью достижения сверхразрешения. Такой подход дает возможность повысить разрешающую способность изображения, что позволяет точнее определять размеры отражателей и уменьшить уровень структурного шума. Результаты обработки сравниваются с результатами, полученными методом МЭ. На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

- 1) Применение метода CS позволяет повысить разрешающую способность эхосигналов более чем в 3 раза, так как импульсы становятся похожими на  $\delta$ -импульс. Естественно возрастает и лучевая разрешающая способность изображения отражателей.
- 2) Объединение парциальных изображений с учетом CF по формулам (16) и (17) позволяет уменьшить уровень шума, в том числе и структурного шума, изображения отражателей.
- 3) Сравнивая CS-изображение (см. рис. 9в) и обычное ЦФА-изображение (см. рис. 9г), можно утверждать, что удалось повысить лучевую разрешающую способность примерно в три раза, а уровень структурного шума уменьшить примерно на 13 дБ.
- 4) Текстуальный фильтр AADF эффективнее работает с изображениями, восстановленными методом ЦФА с коррекцией фазы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Publisher: Waltham, MA: Olympus NDT, 2007. Режим доступа: URL: <http://www.olympus-ims.com/en/books/> (дата обращения: 09.12.2018).
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. Holmes C., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for nondestructive evaluation // NDT Int. 2005. V. 38. P. 701—711.
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. Camacho J., Parrilla M., Fritsch C. Phase Coherence Imaging // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. May 2009. V. 56. No. 5. P. 958—974.
7. Базулин Е.Г. Двумерная адаптивная экстраполяция спектра многочастотных акустических голограмм // Акуст. журн. 1991. Т. 37. № 1. С. 8—16.
8. Марпл-мл С.Л. Цифровой спектральный анализ / Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 584 с.
9. Базулин Е.Г. Повышение отношения сигнал/шум при совместном использовании методов экстраполяции и расщепления спектра // Дефектоскопия. 2006. № 1. С. 68—78.
10. Lavielle M. Bayesian deconvolution of Bernoulli-Gaussian processes // Signal Processing, Elsevier. July 1993. V. 33. No. 1. P. 67—79. DOI: <https://doi.org/10.1051/smdo:2008014>
11. Benammar A., Drai R., Kechida A., Guessoum A. Deconvolution of ultrasonic echoes using Bernoulli-Gaussian processes for composite materials inspection // Int. J. Simul. Multidisci. Des. Optim. 2008. V. 2. P. 107—111.
12. Richardson W.H. Bayesian-based iterative method of imagerestoration // J. Opt. Soc. Am. 1972. V. 62. P. 55—59.
13. Dalitz C., Pohle-Fronlich R., Michalk T. Point Spread Functions and Deconvolution of Ultrasonic Images // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. March 2015. V. 62. No. 3. P. 531—544. DOI: 10.1109/TUFFC.2014.006717

14. Ермолов И.Н. К вопросу о выборе оптимальных параметров эхо-метода ультразвуковой дефектоскопии // Дефектоскопия. 1965. № 6. С. 51—61.
15. 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. No. 8. P. 621. DOI: <https://doi.org/10.3390/e20080621>
16. Граничин О.Н. Рандомизация измерений и  $l_1$ -оптимизация // Стохастическая оптимизация в информатике. 2009. № 5. С. 3—23.
17. Donoho D.L. Compressed sensing // IEEE Trans. Inform. Theory. 2006. P. 1289—1306.
18. Foucart S., Rauhut H. A mathematical introduction to compressive sensing. Basel, Birkhauser, 2013. 585 p.
19. Guarneri G.A., Pipa D.R., Junior F.N., de Arruda L.V.R., Zibetti M.V.W. A sparse reconstruction algorithm for ultrasonic images in nondestructive testing // Sensors. 2015. V. 15. P. 9324—9343.
20. Минаков Е.И., Серегин П.С. Сравнительный анализ методов параллельной реконструкции изображений магнитно-резонансной томографии // Цифровая обработка сигналов. 2012. № 3. С. 23—28.
21. Valente S.A., Zibetti M.V.W., Pipa D.R., Maia J.M., Schneider F.K. An Assessment of Iter-ative Reconstruction Methods for Sparse Ultrasound Imaging // Sensors. 2017. V. 17. P. 533. DOI: 10.3390/s17030533
22. Provost J., Lesage F. The application of compressed sensing for photo-acoustic tomography // IEEE Trans. Med. Imag. 2009. V. 28. № 4. P. 585—594.
23. Knee P. Sparse representations for radar with MATLAB R examples // Synthesis Lectures on Algorithms and Software in Engineering. 2012. V. 4. № 1. P. 1—85.
24. Shannon C.R. A mathematical theory of communication // Bell Systems Technical Journal. 1948. V. 27. P. 379—423.
25. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач / Изд. 3-е, исправл. М.: Наука, 1986. 288 с.
26. Kullback S. Information Theory and Statistics. New York, 1968. 416 p.
27. Базулин Е.Г. О возможности использования в ультразвуковом неразрушающем контроле метода максимальной энтропии для получения изображения рассеивателей по набору эхосигналов // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 2. С. 235—254.
28. Candes E.J. The restricted isometry property and its implications for compressed sensing // Comptes Rendus de l'Acad. des Sci. Serie I. 2008. V. 346. P. 589592.
29. Candes E., Wakin M. People hearing without listening: An Introduction to Compressive Sampling // IEEE Signal Processing Magazine. 2008. V. 25. № 2. P. 21—30.
30. Baraniuk R.G., Davenport M., DeVore R., Wakin M.B. A simple proof of the restricted isometry principle for random matrices (aka the Johnson-Lindenstrauss lemma meets compressed sensing) // Constructive Approximation. 2007.
31. Bradley E., Hastie Trevor. Johnstone Yain Least angle regression. Stanford University // The Annals of Statistics. 2004. V. 32. № 2. P. 407—499.
32. SPGL1: A solver for large-scale sparse reconstruction URL: <https://www.cs.ubc.ca/~mpf/spgl1/index.html> (дата обращения: 04.12.2018).
33. Базулин Е.Г., Евсеев И.В. Уменьшение уровня шума изображения отражателей, восстановленного по эхосигналам, измеренным ультразвуковой антенной решеткой / Россия, Москва, «XXVII международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», МЭИ, 11—12 марта 2021 г. С. 303.
34. Официальный сайт фирмы «ЭХО+» URL: <http://www.echoplus.ru> (дата обращения: 22.01.2022).
35. Базулин Е.Г. Использование метода инверсного C-SAFT для выравнивания пространственной чувствительности изображения отражателей // Дефектоскопия. 2015. № 1. С. 58—71.
36. 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.
37. Базулин Е.Г. Применение адаптивного анизотропного диффузного фильтра для повышения качества изображения отражателей при проведении ультразвукового неразрушающего контроля // Дефектоскопия. 2021. № 5. С. 3—12.
38. Базулин Е.Г., Вовк А.С. Применение метода максимальной энтропии в ультразвуковой дефектоскопии с учетом переменной формы эхосигнала // Научные труды МЭИ. 2018. № 5. С. 111—119.
39. Базулин А.Е., Базулин Е.Г. Применение антенных решеток и кремнийорганического полимера в качестве иммерсионной среды для проведения ультразвукового контроля объектов с неровной поверхностью // Дефектоскопия. 2014. № 7. С. 3—11.
40. Федоров Ф.И. Теория упругих волн в кристаллах. М.: Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1965. 388 с.