

УДК 620.179.162

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-128-135

Восстановление изображения отражателей методом распознавания со сжатием по эхосигналам, измеренным антенной решеткой

Е.Г. Базулин, Д.М. Соколов

Для получения изображения отражателей по эхосигналам, измеренным антенной решеткой, применяют метод комбинированного SAFT (C-SAFT). Для этого следует зарегистрировать эхосигналы \mathbf{p} для всех пар излучатель–приемник элементов антенной решетки (режим двойного сканирования), т. е. для антенной решетки из 32 элементов нужно провести измерения 1024 эхосигналов. Для восстановления изображения отражателей без потери качества по меньшему количеству данных \mathbf{p}_{CS} , чем исходный набор эхосигналов \mathbf{p} , предложено использовать метод сжатых измерений или распознавания со сжатием (Compressive Sensing Method (CS)). Помимо уменьшения объема данных, метод CS повышает качество изображения за счет увеличения его разрешающей способности. Существует несколько реализаций данного алгоритма, применение которых зависит от параметров сигнала, таких как шум и разреженность восстанавливаемого изображения.

Изображения отражателей для сравнения восстанавливали по части эхосигналов нелинейным методом максимальной энтропии (МЭ). Приведены изображения отражателей, восстановленные по неполному набору эхосигналов, полученных в численном и модельном экспериментах методами C-SAFT, МЭ и CS. В численном эксперименте метод CS позволил разрешить восьмиэлементной решеткой с шагом 2 мм 12 точечных отражателей с коэффициентами отражения 0,1; 0,5 и 1,0 на расстоянии около 12 мм от антенной решетки, находящихся в углах трех квадратов со стороной 1 мм (1,18 мм длины волны). Изображения точечных отражателей заняли один пиксел размерами 0,1×0,1 мм с сохранением заданных значений коэффициента отражения ϵ . В сравнении с C-SAFT-изображением, разрешающая способность возросла более чем в 5 раз, причем объем данных \mathbf{p}_{CS} удалось уменьшить в 88 раз по сравнению с исходным \mathbf{p} . В модельном эксперименте метод CS восстановил изображение отражателей при объеме данных в 13 раз меньше исходных \mathbf{p} , CS-изображение оказалось более высокого качества чем C-SAFT-изображения и сопоставимо с МЭ-изображением. Продольная и фронтальная разрешающие способности CS- и МЭ-изображений возросли более чем в 3 раза в сравнении с C-SAFT-изображением.

Ключевые слова: методы CS, C-SAFT, максимальная энтропия, цифровая фокусировка антенной, антенная решетка, ультразвуковая дефектоскопия.

Для цитирования: Базулин Е.Г., Соколов Д.М. Восстановление изображения отражателей методом распознавания со сжатием по эхосигналам, измеренным антенной решеткой // Вестник МЭИ. 2018. № 6. С. 128—135. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-128-135.

Reflector Image Restoration Using the Compressive Sensing Method from the Echo Signals Measured by an Antenna Array

E.G. Bazulin, D.M. Sokolov

To obtain a reflector image from the echo signals measured by an antenna array, the combined synthetic aperture focusing technique (C-SAFT) method is used. To do so, it is necessary to record the echo signals \mathbf{p} for all emitter-receiver pairs of antenna array elements (the dual scanning mode). That is, for an antenna array containing 32 elements, 1024 echo signals should be measured.

For restoring the image of reflectors without loss of quality for the number of data \mathbf{p}_{CS} fewer than the original set of echo signals \mathbf{p} , it is proposed to use the method of compressed measurements or recognition with compression, commonly known as the compressive sensing (CS) method. In addition to reducing the amount of data, the CS method improves the image quality due to increasing its resolution. There are several implementations of this algorithm, the application of which depends on the signal parameters, such as noise and sparsity of the image being restored.

For comparison purposes, the reflector images were restored from a part of echo signals using the nonlinear method of maximal entropy (ME). The reflector images restored from the incomplete set of echo signals obtained in numerical and model experiments according to the C-SAFT, ME, and CS methods are presented. In the numerical experiment, the use of the CS method made it possible to resolve, by means of an eight-element array

with a 2-mm pitch, 12 point reflectors with reflection coefficients equal to 0.1, 0.5, and 1.0 at a distance of about 12 mm from the antenna array that were located at the corners of three squares with a side of 1 mm (1.18 of the wavelength). The images of the point reflectors took one pixel with the size 0.1×0.1 mm with retaining the specified values of the reflection coefficient ϵ . Compared with the image obtained using the C-SAFT method, the resolution has been improved by more a factor of 5. Moreover, the amount of data \mathbf{p}_{CS} was reduced by 88 times compared with its original value \mathbf{p} . In the model experiment, the use of the CS method made it possible to restore the image of reflectors with the amount of data 13 times smaller than its original value \mathbf{p} . The CS image was found to be of better quality than the C-SAFT image and commensurable with the ME image. The longitudinal and frontal resolutions of the CS- and ME images have increased by more than a factor of 3 compared with the C-SAFT image.

Key words: compressive sensing (CS), C-SAFT method, maximum entropy method, digital antenna focusing, antenna array, ultrasonic flaw detection.

For citation: Bazulin E.G., Sokolov D.M. Reflector Image Restoration Using the Compressive Sensing Method from the Echo Signals Measured by an Antenna Array. MPEI Vestnik. 2018;6:128—135. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-128-135.

Введение

В последнее время широкое распространение получила ультразвуковая дефектоскопия, основанная на применении двух технологий регистрации эхосигналов: фазированных антенных решетках (ФАР) [1] и цифровой фокусировке антенной (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 со сплошной фокусировкой во всех точках области восстановления изображения (ОВИ). На первом этапе с помощью антенной решетки (АР) регистрируют эхосигналы при переборе всех комбинаций излучатель–приемник. Этот режим называется двойным сканированием (Full Matrix Capture (FMC)), а на втором этапе полученные эхосигналы обрабатывают методом комбинационного SAFT (C-SAFT) [4] (Total Focusing Method (TFM)).

Недостатком метода ЦФА является большой объем эхосигналов, измеренных АР, который растет квадратично количеству ее элементов. Это уменьшает скорости регистрации и передачи эхосигналов, что критично при контроле оборудования атомных электростанций, где время нахождения оператора в условиях повышенной радиации должно быть минимизировано. Один из вариантов уменьшения объема эхосигналов — использование прореженной коммутационной матрицы \mathbf{C} размерностью $N_e \times N_e$, где N_e — число элементов АР. Так, в ЦФА-дефектоскопе А1550 [5] коммутационная матрица \mathbf{C} имеет треугольный вид. Однако значительно уменьшить объем измеряемых эхосигналов (на 60% и больше) без заметной потери качества изображения не удастся. Уменьшить объем эхосигналов и увеличить скорость их регистрации можно с помощью технологии CDMA (Code Division Multiple Access — множественный доступ с кодовым разделением) [6]. В этом случае все элементы антенной решетки одновременно излучают импульсы из набора псевдоортогональных сигналов, а это предьявляет повышенные требования к излучающей электронике дефектоскопа.

Существуют нелинейные методы восстановления изображения отражателей по неполным данным: максимальной энтропии (МЭ) [7] и сжатых измерений или

распознавания со сжатием, (Compressive Sensing (CS)) [8, 9].

Метод максимальной энтропии

Решение обратной задачи рассеивания [10] состоит в том, чтобы по известным источникам поля $q(\mathbf{r}_i, t)$, расположенным в области S_r и по измеренному в области S_r рассеянному полю $p(\mathbf{r}_r, t)$ найти функцию $\epsilon(\mathbf{r})$, описывающую отражающие свойства неоднородности в области S . Решение прямой задачи запишем в формальном виде:

$$\mathbf{p}(\mathbf{r}_r, t) = \mathbf{P}(\epsilon(\mathbf{r}), \mathbf{q}(\mathbf{r}_i, t)). \quad (1)$$

Если прямая задача линейна или ее удастся линеаризовать, как в случае Борновского приближения, то (1) можно записать в матричном виде:

$$\mathbf{p} = \mathbf{G}\epsilon + \mathbf{n}, \quad (2)$$

где \mathbf{G} — матрица, описывающая распространение ультразвуковых волн от их источников в области S_r до точечного отражателя и области приема S_r ; \mathbf{n} — вектор шума измерений.

Поскольку матрица \mathbf{G} , как правило, плохо обусловлена, то кроме ее простого обращения существуют иные варианты решения. Один из них заключается в определении оценки $\hat{\epsilon}$, как решению задачи безусловной оптимизации, когда в роли критерия качества восстановленного изображения выступает квадрат невязки решения:

$$\chi^2(\hat{\epsilon}) = \|\mathbf{G}\hat{\epsilon} - \mathbf{p}\|^2 = (\mathbf{G}\hat{\epsilon} - \mathbf{p})^T (\mathbf{G}\hat{\epsilon} - \mathbf{p}), \quad (3)$$

где \mathbf{t} — операция транспонирования.

Оценку $\hat{\epsilon}$ представим в виде

$$\hat{\epsilon} = \underset{\hat{\epsilon} \in R^{N_i, x, N_i, z}}{\operatorname{argmin}} (\chi^2(\hat{\epsilon})). \quad (4)$$

В матричном виде $\hat{\epsilon}$ выглядит аналогично формуле корреляции

$$\hat{\epsilon}_c = \mathbf{G}^T \mathbf{p}. \quad (5)$$

Дальнейшее развитие подхода (4) состоит в регуляризации по А.Н. Тихонову [11] процедуры обращения с добавлением штрафного функционала в виде максимальной энтропии. Для этого к критерию невязки решения добавляется функционал в виде кросс-энтропии [12]:

$$\mathbf{H}(\varepsilon_i) = -\sum_{i=1}^N \varepsilon_i \ln \left(\frac{\varepsilon_i}{e\mu} \right), \quad (6)$$

где N — количество точек \mathbf{r}_i , в которых рассчитывается изображение; μ — оценка среднего значения интенсивности фона изображения.

Таким образом, решение задачи сводится к минимизации невязки следующего выражения:

$$\|\mathbf{G}\hat{\varepsilon} - \mathbf{p}\|^2 - \alpha \mathbf{H}(\hat{\varepsilon}) \rightarrow \min, \quad (7)$$

где α — параметр регуляризации.

Метод распознавания со сжатием (CS)

В настоящее время метод CS пытаются активно применять для получения высококачественно изображения по неполным результатам измерений в ультразвуковой дефектоскопии [13], магнитно-резонансной [14] и фотоакустической томографии [15].

Пусть $\varepsilon = \{\varepsilon_i\}$ — дискретный сигнал длиной N , форму которого нужно восстановить по результатам измерений вектора \mathbf{p} такой же длины. Вектор \mathbf{p} и неизвестный сигнал ε связаны классическим образом

$$\mathbf{p} = \mathbf{G}\varepsilon. \quad (8)$$

где \mathbf{G} — матрица размерами $N \times N$.

Матрица \mathbf{G} может описывать различные преобразования, зависящие от решаемой задачи. Это могут быть матрицы преобразования Фурье или связывающие измеренные эхосигналы \mathbf{p} и коэффициент отражения исследуемого объекта контроля.

Предположим, что в любом месте ОВИ может находиться только один точечный отражатель, то есть в исходном векторе ε от нуля отличен только один элемент ($S = 1$). Если антенной решеткой измерено 100 эхосигналов длиной 1000 отсчетов, то длина вектора \mathbf{p} будет равна $N = 100\,000$. Возникает парадоксальная ситуация. Для того, чтобы получить значение одной единственной точки в ОВИ нужно обработать, передать и запомнить в 100 000 раз больше чисел. Метод CS при определенных условиях позволяет устранить это противоречие.

Условия применения метода CS

Сигнал называется разреженным [8], если большинство его элементов равны нулю, и он выглядит как

$$\|\varepsilon\|_0 = S \ll N, \quad (9)$$

где $\|\varepsilon\|_0$ — норма l_0 , представляющая собой число ненулевых компонент в векторе ε .

Оказывается, что для разреженных сигналов ε можно подобрать матрицу \mathbf{A} размерами $K \times N$, причем $K \ll N$, и свести начальную задачу (8) или (2) к задаче

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{p} = \mathbf{A}\mathbf{G}\varepsilon = \mathbf{\Phi}\varepsilon, \quad \mathbf{\Phi} = \mathbf{A}\mathbf{G}, \quad (10)$$

в которой результаты измерений представлены как вектор \mathbf{y} длиной всего K отсчетов.

Для решения (10) разработаны известные методы, основанные на минимизации целевой функции при заданных условиях (см. (16), (17), (19)).

Для применимости метода CS, согласно [8], необходимыми и достаточными условия считаются, когда:

- сигнал ε является S -разреженным, если существует такой базис \mathbf{G} , что $\mathbf{p} = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \mathbf{g}_i$, где только S отсчетов $\varepsilon_i \neq 0$;
- выполняется свойство ограниченной изометрии (Restricted Isometry Property (RIP)):

$$\text{Rip}(\delta, K) = \sqrt{1 - \delta} \leq \frac{\|\mathbf{A}\mathbf{G}\mathbf{z}\|_2}{\|\mathbf{z}\|_2} \leq \sqrt{1 + \delta}, \quad (11)$$

где $\delta \in (0, 1)$; \mathbf{z} — произвольный ненулевой вектор;

- свойство некогерентности \mathbf{A} и \mathbf{G}

$$\mu(\mathbf{A}, \mathbf{G}) = \sqrt{N} \max_{i,j} \frac{|\langle a_i, g_j \rangle|}{\|a_i\|_2}. \quad (12)$$

Из [16] следует, что с высокой долей вероятности точное восстановление S -разреженных векторов по измерениям будет достигнуто, согласно формуле

$$K \geq c\mu(\mathbf{A}, \mathbf{G})^2 S \log N, \quad (13)$$

где c — некоторая положительная константа.

Удовлетворительные результаты получаются и для более простого соотношения

$$K = 4S \log(N/S). \quad (14)$$

Матрица \mathbf{A} из случайных чисел с большой вероятностью удовлетворяет трем перечисленным требованиям. Восстанавливая изображение одного точечного отражателя ($S = 1$) можно утверждать, что метод CS позволит восстановить изображение только по 20 числам, а не по 100 000. Таким образом, в рассмотренном случае можно уменьшить объем передаваемых и хранимых данных в 5 000 раз!

Геометрическая интерпретация работы метода CS

Для геометрической интерпретации работы метода CS рассмотрим вариант для $N = 2$. Разреженный сигнал ε может принимать значения только вдоль осей $\{\varepsilon_1, 0\}$ или $\{0, \varepsilon_2\}$, то есть $S = 1$. На левой части рис. 1 кругом красного цвета показан сигнал, форму которого нужно восстановить по вектору \mathbf{y} размером $K = 1$, полученным по (10), в результате измерений и «обогащения» (на правой части рис. 1 сигнал — звезда красного цвета). Поскольку $N > K$, то матрица $\mathbf{\Phi}$ имеет нуль-плоскость $\mathbf{N}(\mathbf{\Phi})$, которая зависит от вида матрицы $\mathbf{\Phi}$ и сплошной линией синего цвета схематически показана на левой части рис. 1. Если справедливо утверждение $\mathbf{y} = \mathbf{\Phi}\varepsilon$, то для любого $\varepsilon' \in \mathbf{N}(\mathbf{\Phi})$ (круг синего цвета на рис. 1) выполняется $\mathbf{y} = \mathbf{\Phi}(\varepsilon + \varepsilon')$.

Восстановить ε по \mathbf{y} можно, найдя кратчайшее расстояние от центра координат $\{\varepsilon_1, \varepsilon_2\}$ до смещенной нуль-плоскости (пунктирная линия синего цвета

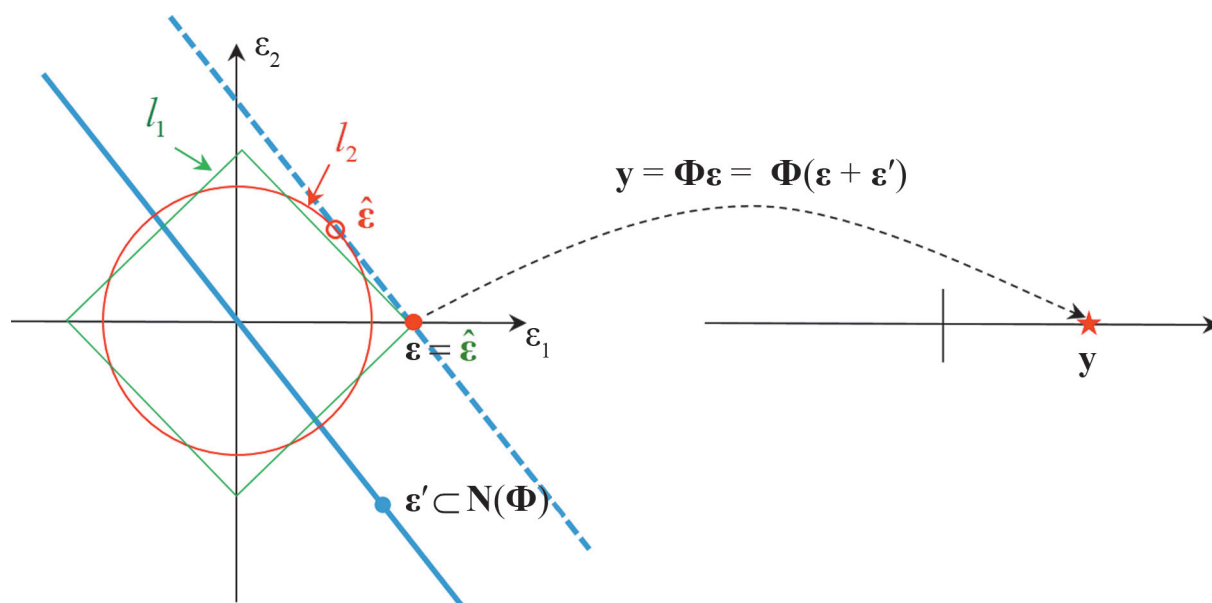


Рис. 1. Геометрическая интерпретация работы метода CS

на рис. 1). Если воспользоваться нормой l_2 , то решением задачи будет точка соприкосновения «раздувающейся» окружности (красного цвета) со смещенной нуль-плоскостью. Полученное решение $\hat{\epsilon}$ не является разреженным сигналом и не совпадает с точным решением ϵ . Если матрицу \mathbf{A} сконструировать таким образом, что нуль-плоскость будет перпендикулярна оси ϵ_1 , то в этом случае будет найдено точное решение $\hat{\epsilon} = \epsilon$. Однако поиск решения на оси ϵ_2 даст неверный ответ. Если воспользоваться нормой l_1 , то решением задачи будет нахождение точки соприкосновения «раздувающегося» квадрата (зеленого цвета) со смещенной нуль-плоскостью. Как следует из рис. 1, найденное решение будет совпадать с искомым ϵ .

Для объяснения работы метода CS можно воспользоваться следующей аналогией. Исходный сигнал — это руда, в которой гарантированно есть 1% чистого железа. В тонне руды \mathbf{p} всего десять килограммов железа, т. е., исходный сигнал относится к классу прореженных. Умножение \mathbf{p} на матрицу \mathbf{A} можно уподобить работе горно-обогатительного комбината, на выходе которого уже не тонна руды \mathbf{p} , а двадцать килограмм концентрата \mathbf{y} , содержащего исходные 10 килограммов железа ϵ . Налицо эффект сжатия в 50 раз, но тонну руды все равно надо доставить на комбинат. Матрицу \mathbf{A} в данном случае можно назвать информационно-обогатительной.

Применение метода CS для получения изображения отражателей

Сжатые эхосигналы \mathbf{p}_{CS} при рассеивании на отражателях ϵ описывается следующим образом:

$$\mathbf{p}_{CS} = \mathbf{A}(\mathbf{G}\epsilon + \mathbf{n}). \quad (15)$$

Стоит отметить, что матрица \mathbf{A} фиксирована и не зависит от сигнала ϵ . Величину K , позволяющую вос-

становить сигнал ϵ по полученным данным \mathbf{p}_{CS} с высокой долей вероятности, можно определить по (14).

В концепции CS решение (15) при условии разреженности сигнала сводится к задаче оптимизации:

$$\|\epsilon\|_1 \rightarrow \min \text{ для таких, что } \mathbf{p}_{CS} = \mathbf{A}\mathbf{G}\epsilon. \quad (16)$$

Данный метод базируется на условии, что получающийся после применения l_1 оптимизации вектор $\hat{\epsilon}$ имеет не более S ненулевых компонент. Решение задачи (16) возможно различными способами, однако наиболее распространенным является метод наименьших квадратов, позволяющий проводить поиск максимального разреженного вектора ϵ , удовлетворяющий заданному условию.

В постановке задачи при условии наличия шума, решение (15) сводится к решению задачи оптимизации:

$$\|\epsilon\|_1 \rightarrow \min \text{ для таких, что } \|\mathbf{p}_{CS} - \mathbf{A}\mathbf{G}\epsilon\|_2 < \delta, \quad (17)$$

где δ — регуляризирующий параметр, величина которого влияет на точность работы алгоритма, определяемый формулой [17]:

$$\delta = \sigma\sqrt{K}\sqrt{1 + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{K}}}, \quad (18)$$

где σ — величина дисперсии шума.

Существует альтернативная постановка задачи (15), называемая LASSO-задачей [16], аналогичная методу наименьших квадратов и заключающаяся в минимизации $\|\mathbf{p}_{CS} - \mathbf{A}\mathbf{G}\epsilon\|_2$ при условии разреженности вектора ϵ :

$$\|\mathbf{p}_{CS} - \mathbf{A}\mathbf{G}\epsilon\|_2 \rightarrow \min \text{ для таких, что } \|\epsilon\|_1 < \tau, \quad (19)$$

где τ — параметр, учитывающий разреженность вектора ϵ .

Численные эксперименты

Представлены результаты восстановления изображения отражателей описанными выше алгоритмами на примере точечных отражателей. Эхосигналы рассчитывали по простейшей акустической модели, когда излучение и прием происходят в точке, а рассеивание на точечных отражателях. Для восстановления изображения отражателей по алгоритмам (16), (17), (19) использовали библиотеку l_1 Magic Toolbox [18].

Восстанавливали изображения 3 групп из 4 точечных отражателей, расположенных на глубине 18, 14 и 10 мм. В каждой группе отражатели находились в углах квадрата со стороной 1 мм и имели одинаковые коэффициенты отражения (1,0; 0,5 и 0,1). Идеальное растровое изображение точечных отражателей дано на рис. 2, *а*. Для расчета эхосигналов применяли 8-элементную антенную решетку с рабочей частотой 5 МГц и расстоянием между точечными элементами 2,0 мм. Расстояние 2,0 мм для частоты 5 МГц достаточно грубое и приводит к появлению шума на C-SAFT-изображении.

C-SAFT-изображение, на котором можно выявить только две группы отражателей с коэффициентами от-

ражения 1 и 0,5, показано на рис. 2, *б*, но из-за низкой разрешающей способности ни один из отражателей обнаружить не удалось. Изображение, восстановленное методом МЭ ($\alpha = 0,01$; $\mu = 10^{-5}$) с использованием 32 эхосигналов из 64, продемонстрировано на рис. 2, *в*. Размер матрицы \mathbf{G} равен $N \times N$, где $N = 11\,520$. Метод МЭ в сравнении с методом C-SAFT позволил разрешить все отражатели, однако величина коэффициента отражения ϵ уменьшилась в среднем на 10...15% по сравнению с заданной. Продольная и фронтальная разрешающие способности повысились более чем в 5 раз. CS-изображение при $K \times N$, где $K = 130$ представлено на рис. 2, *г*. В данном случае объем данных \mathbf{p}_{CS} удалось уменьшить в 88 раз по сравнению с \mathbf{p} . Все отражатели разрешены при сохранении уровня коэффициента отражения ϵ , а разрешающая способность повысилась более чем в 5 раз по сравнению с C-SAFT.

Модельный эксперимент

Эскиз дюралюминиевого образца в виде 12 отверстий бокового сверления диаметром 0,5 мм изобра-

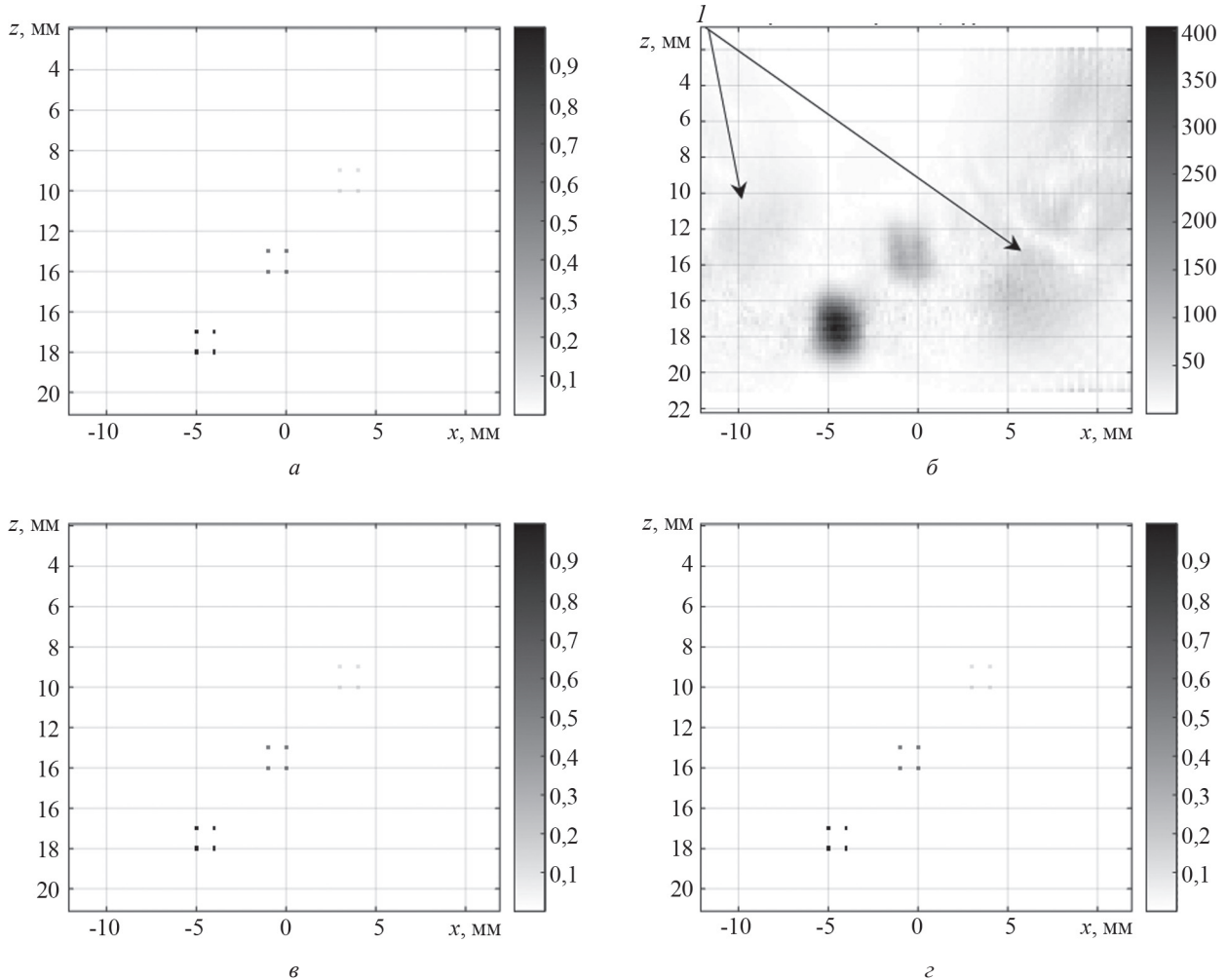


Рис. 2. Растровое изображение дефектов, полученных от отражателей без шума:

а — восстанавливаемое изображение; *б* — *г* — методы C-SAFT, МЭ и CS; *l* — шум из-за грубого шага решетки

жен на рис. 3. Были восстановлены изображения отверстий, расположенных на глубине 36 и 38 мм в углах квадрата со стороной около 2 мм. Для регистрации эхосигналов использовали 32-элементную антенную решетку с рабочей частотой 5 МГц и шагом 1.0 мм, установленную на плексигласовую призму с углом наклона 20° (схематично показана на рис. 3).

C-SAFT-изображение отражателей, восстановленных на продольной волне по 1024 эхосигналам представлено на рис. 4. Недостаточно высокая разрешающая способность изображения не позволила

определить не только тип отражателей, но и их количество. Линиями черного цвета нанесены контуры отверстий.

Результат восстановления изображения отражателей по 400 эхосигналам из 1024 методом МЭ ($\alpha = 10$, $\mu = 10^{-5}$) дан на рис. 5, а. Размер матрицы \mathbf{G} равен $N \times N$, где $N = 20\,000$. Продольная и фронтальная разрешающие способности изображения возросли более чем в 3 раза по сравнению с C-SAFT-изображением (см. рис. 4). На МЭ-изображении уверенно видны блики трех отверстий, а амплитуда блика четвертого

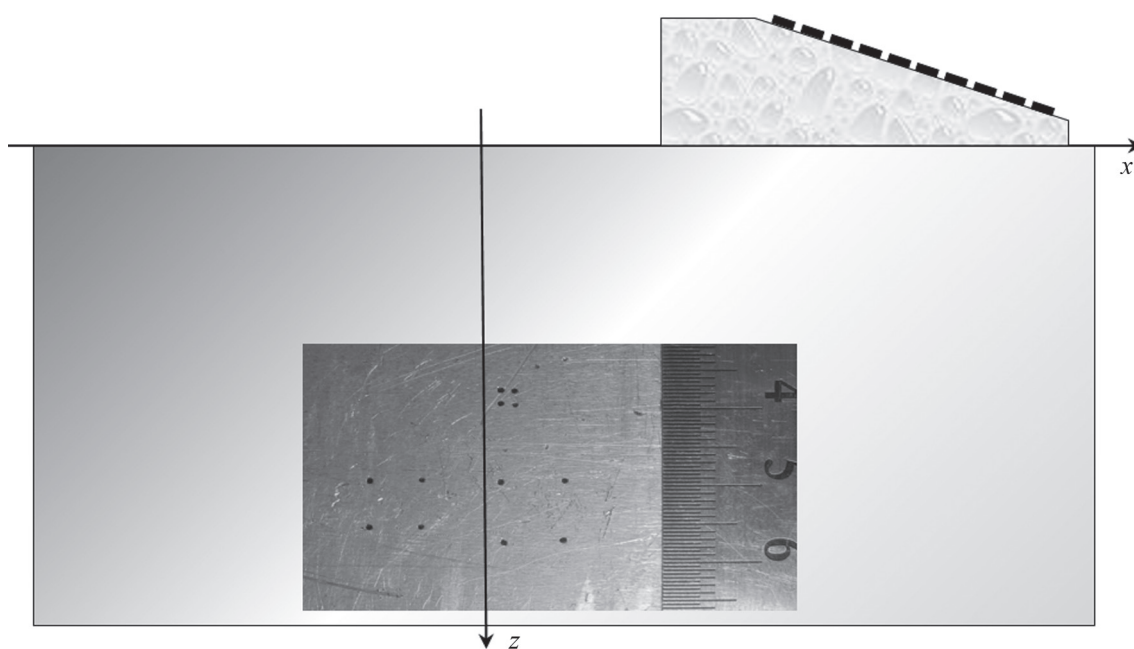


Рис. 3. Тестовая модель из трех групп из четырех отверстий диаметром 0,5 мм

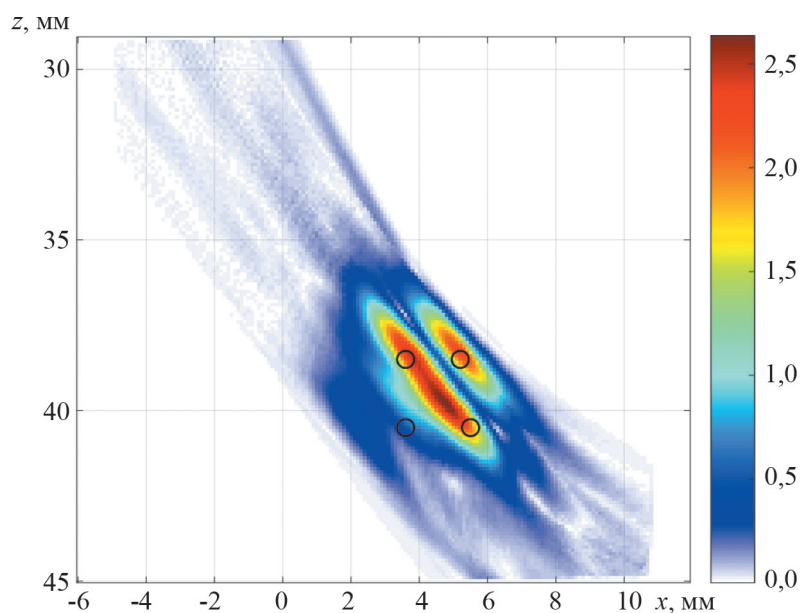


Рис. 4. C-SAFT-изображение самой близкой к поверхности группы отверстий бокового сверления теста перерассеивания

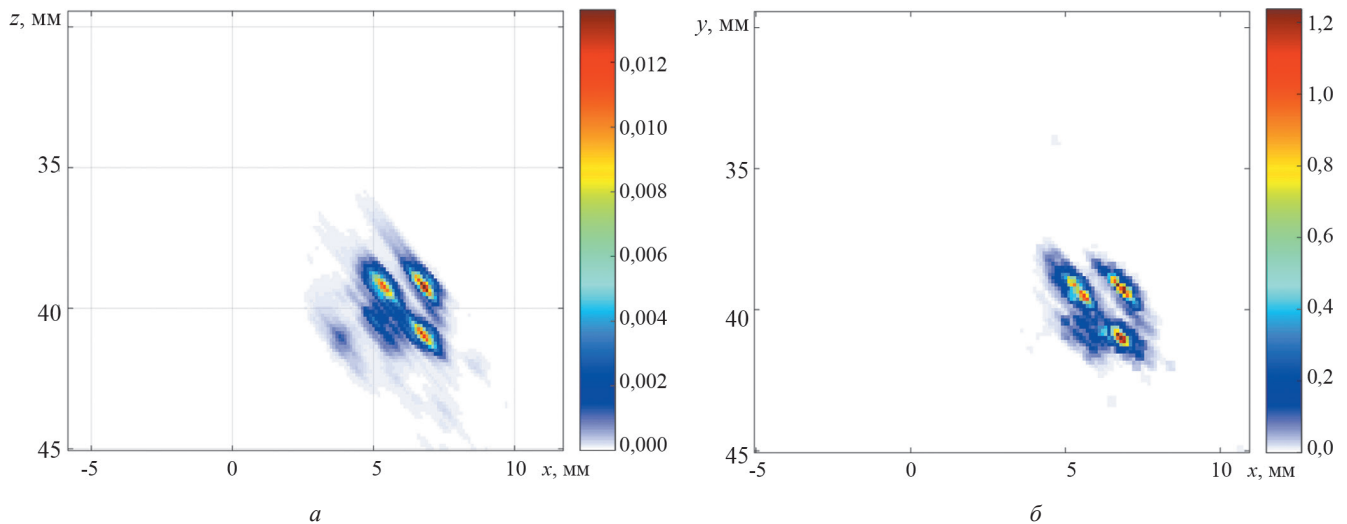


Рис. 5. Изображение самой близкой к поверхности группы отверстий бокового сверления теста перерассеивания:
a, б — методы МЭ и CS

отверстия из-за эффекта затенения оказалась недостаточно большой для его обнаружения. CS-изображение, восстановленное по (17) для случайной матрицы **A**, обладает низким качеством, поэтому было восстановлено 15 парциальных изображений для коэффициентов $\delta = 0,1, 0,2, 0,3 \dots 1,5$. Для каждого δ использовали свой вариант матрицы **A**. Результат объединения парциальных изображений как медиана приведен на рис. 5, б. CS-изображение и МЭ-изображение довольно близки друг к другу по разрешающей способности и уровню шума.

Литература

1. **Advances** in Phased Array Ultrasonic Technology Applications [Электрон. ресурс] <http://www.olympus-ims.com/en/books/> (дата обращения 23.02.2018).
2. **Воронков В.А. и др.** 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. **Парфенов В.И., Голованов Д.Ю.** Обнаружение дискретных разреженных сигналов с частотой дискретизации, не превышающей частоту Найквиста // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 6. [Электрон. ресурс] <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/1/text.pdf> (дата обращения 23.02.2018).
5. **Высокочастотный** ультразвуковой томограф «A1550 IntroVisor» [Электрон. ресурс] http://acsys.ru/production/?type_id=16&subtype_id=7&product_id=106 (дата обращения 23.02.2018).

Заключение

Предложено использовать метод CS для восстановления изображения отражателей без потери качества по меньшему количеству отсчетов, чем у исходного набора эхосигналов, измеренных антенной решеткой. В модельном эксперименте метод CS позволил восстановить изображение отражателей при объеме данных в 13 раз меньше исходных. CS-изображение оказалось лучше C-SAFT-изображения и сопоставимо с МЭ-изображением. Продольная и фронтальная разрешающие способности CS- и МЭ-изображений возросли более чем в 3 раза в сравнении с C-SAFT-изображением.

References

1. **Advances** in Phased Array Ultrasonic Technology Applications [Elektron. Resurs] <http://www.olympus-ims.com/en/books/> (Data Obrashcheniya 23.02.2018).
2. **Voronkov V.A. i dr.** O Primenimosti Tekhnologii Antennyh Reshetok v Reshenii Zadach Ul'trazvukovogo Kontrolya Opasnyh Proizvodstvennyh Ob'ektov. V Mire Nerazrushayushchego Kontrolya. 2011;1:64—70. (in Russian).
3. **Bazulin E.G.** Sravnenie Sistem dlya Ul'trazvukovogo Nerazrushayushchego Kontrolya, Ispol'zuyushchih Antennye Reshetki ili Fazirovannye Antennye Reshetki. Defektoskopiya. 2013;7:51—75. (in Russian).
4. **Parfenov V.I., Golovanov D.Yu.** Obnaruzhenie Diskretnyh Razrezhennyh Signalov s Chastotoy Diskretizatsii, ne Prevysheyushchey Chastoty Naykvista. Zhurnal Radioelektroniki. 2017;6. [Elektron. Resurs] <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/1/text.pdf> (Data Obrashcheniya 23.02.2018). (in Russian).
5. **Vysokochastotnyy** Ul'trazvukovoy tomograf «A1550 IntroVisor» [Elektron. Resurs] http://acsys.ru/production/?type_id=16&subtype_id=7&product_id=106 (Data Obrashcheniya 23.02.2018). (in Russian).

6. **Базулин Е.Г.** Повышение скорости регистрации ультразвуковых эхосигналов для режима двойного сканирования // Дефектоскопия. 2015. № 2. С. 27—44.
7. **Базулин А.Е., Базулин Е.Г.** Деконволюция сложных эхосигналов методом максимальной энтропии в ультразвуковом неразрушающем контроле // Акустический журнал. 2009. № 6. С. 772—783.
8. **Граничин О.Н.** Рандомизация измерений и l_1 -оптимизация // Стохастическая оптимизация в информатике. 2009. № 5. С. 3—23.
9. **Donoho D.L.** Compressed Sensing // IEEE Trans. Inform. Theory. 2006. Pp. 1289—1306.
10. **Базулин Е.Г.** Разработка системы эксплуатационного ультразвукового неразрушающего контроля повышенной информативности с применением антенных решеток: Автореф. дисс. ... доктора техн. наук: М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
11. **Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.** Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986.
12. **Kullback S.** Information Theory and Statistics. N.-Y.: Dover Publ, 1968.
13. **Guarneri G.A. e. a.** A Sparse Reconstruction Algorithm for Ultrasonic Images in Nondestructive Testing // Sensor. 2015. V. 15. Pp. 9324—9343.
14. **Минаков Е.И., Серегин П.С.** Сравнительный анализ методов параллельной реконструкции изображений магнитно-резонансной томографии // Цифровая обработка сигналов. 2012. № 3. С. 23—28.
15. **Provost J., Lesage F.** The Application of Compressed Sensing for Photo-acoustic Tomography // IEEE Trans. Med. Imag. 2009. V. 28. No. 4. Pp. 585—594.
16. **Foucart S., Rauhut H.** A Mathematical Introduction to Compressive Sensing. Basel: Birkhauser, 2013.
17. **Candes E., Romberg J., Tao T.** Stable Signal Recovery from Incomplete and Inaccurate Measurements // Proc. Submitted to Communications on Pure and Appl. Math. Pasadena, 2005. Pp. 1—15.
18. **l_1 -magic.** Recovery of Sparse Signals via Convex Programming [Электрон. ресурс] <https://statweb.stanford.edu/~candes/l1magic/> (дата обращения 23.02.2018).
6. **Bazulin E.G.** Povyshenie Skorosti Registratsii Ul'trazvukovyh Ekhsignalov dlya Rezhima Dvoynogo Skanirovaniya. Defektoskopiya. 2015;2:27—44. (in Russian).
7. **Bazulin A.E., Bazulin E.G.** Dekonvolyutsiya Slozhnyh Ekhsignalov Metodom Maksimal'noy Entropii v Ul'trazvukovom Nerazrushayushchem Kontrole. Akusticheskiy Zhurnal. 2009;6:772—783. (in Russian).
8. **Granichin O.N.** Randomizatsiya Izmereniy i l_1 -optimizatsiya. Stokhasticheskaya Optimizatsiya v Informatike. 2009;5:3—23. (in Russian).
9. **Donoho D.L.** Compressed Sensing. IEEE Trans. Inform. Theory. 2006:1289—1306.
10. **Bazulin E.G.** Razrabotka Sistemy Ekspluatatsionnogo Ul'trazvukovogo Nerazrushayushchego Kontrolya Povyshennoy Informativnosti S Primeneniem Antennyh Reshetok: Avtoref. Diss. ... Doktora Tekhn. Nauk: M.: MG TU im. N.E. Bauman, 2014. (in Russian).
11. **Tihonov A.N., Arsenin V.Ya.** Metody Resheniya Nekorrektnyh Zadach. M.: Nauka, 1986. (in Russian).
12. **Kullbac S.** Information Theory and Statistics. N.-Y.: Dover Publ, 1968.
13. **Guarneri G.A. e. a.** A Sparse Reconstruction Algorithm for Ultrasonic Images in Nondestructive Testing. Sensor. 2015;15:9324—9343.
14. **Minakov E.I., Seregin P.S.** Sravnitel'nyy Analiz Metodov Parallelnoy Rekonstruktsii Izobrazheniy Magnitno-rezonansnoy Tomografii. Tsifrovaya Obrabotka Signalov. 2012;3:23—28. (in Russian).
15. **Provost J., Lesage F.** The Application of Compressed Sensing for Photo-acoustic Tomography. IEEE Trans. Med. Imag. 2009;28;4:585—594.
16. **Foucart S., Rauhut H.** A Mathematical Introduction to Compressive Sensing. Basel: Birkhauser, 2013.
17. **Candes E., Romberg J., Tao T.** Stable Signal Recovery from Incomplete and Inaccurate Measurements. Proc. Submitted to Communications on Pure and Appl. Math. Pasadena, 2005:1—15.
18. **l_1 -magic.** Recovery of Sparse Signals via Convex Programming [Elektron. Resurs] <https://statweb.stanford.edu/~candes/l1magic/> (Data Obrashcheniya 23.02.2018).

Сведения об авторах:

Базулин Евгений Геннадиевич — доктор технических наук, профессор кафедры электротехники и интроскопии НИУ «МЭИ», ведущий научный сотрудник Научно-производственного центра неразрушающего контроля «ЭХО+», e-mail: bazulin@echoplus.ru

Соколов Дмитрий Михайлович — студент кафедры электротехники и интроскопии НИУ «МЭИ», e-mail: dimosokol@yandex.ru

Information about authors:

Bazulin Evgeniy G. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electrical Engineering and Introscopy Dept., NRU MPEI, Leading Researcher of Research and Production Center of Non-destructive Testing «ECHO+», e-mail: bazulin@echoplus.ru

Sokolov Dmitriy M. — Student of Electrical Engineering and Introscopy Dept., NRU MPEI, e-mail: dimosokol@yandex.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 10.12.2017

The article received to the editor: 10.12.2017