

## ОБРАБОТКА TOFD-ЭХОСИГНАЛОВ С ЦЕЛЬЮ ДОСТИЖЕНИЯ СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ

© 2021 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 20.01.2021; после доработки 19.02.2021  
Принята к публикации 15.03.2021

Предложено использовать метод максимальной энтропии (МЭ) и метод построения AR-модели спектра TOFD-эхосигналов совместно с методом расщепления спектров для повышения разрешающей способности и, следовательно, его информативности. Модельные эксперименты показали эффективность предложенного подхода. В результате, разрешающая способность TOFD-эхосигналов повысилась не менее, чем в два раза, а уровень шума уменьшился на 6 дБ. Более высокая разрешающая способность TOFD-эхосигналов позволяет анализировать фазы эхосигналов и делать заключения о типе отражателя.

*Ключевые слова:* метод TOFD, метод максимальной энтропии, построение AR-модели спектра эхосигналов, расщепление спектра.

**DOI:** 10.31857/S013030822105002X

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Благодаря высокой чувствительности и безопасности для персонала ультразвуковая дефектоскопия — один из самых распространенных методов неразрушающего контроля. В практике ультразвукового неразрушающего контроля (УЗК) для контроля сварных соединений широко применяется дифракционно-временной метод (Time Of Flight Diffraction) [1]. Он заключается в регистрации ультразвуковой продольной волны, рассеянной на верхнем и нижнем краях несплошности, двумя преобразователями, расположенными по разные стороны от сварного соединения. Измеренные эхосигналы позволяют довольно эффективно обнаруживать и идентифицировать трещины, так как импульсы, дифрагированные на их краях, находятся в противофазе [2]. Высота трещины определяется разницей между временами пробега дифрагированных сигналов от ее краев. Малый объем регистрируемых эхосигналов позволяет проводить контроль с очень высокой скоростью, поэтому метод TOFD представляется эффективным для УЗК кольцевых и продольных сварных соединений, особенно большой толщины.

Ширина спектра  $\Delta f$  эхосигнала определяется, главным образом, резонансными свойствами пьезопреобразователя (ПЭП). Длина простого сигнала  $\tau$ , которую можно определять по уровню 0,7, обратно пропорциональна ширине его спектра. Математическая обработка, приводящая к дополнительному уменьшению длительности сигнала, позволяет получать эхосигналы со сверхразрешением. Отношение длины исходного импульса  $\tau$  к длине импульса после обработки и будет характеризовать степень достигнутого сверхразрешения.

Эхосигналы от отражателей находятся между импульсом головной волны и импульсом продольной волны, отраженным от дна. Этот временной интервал составляет несколько микросекунд. Поэтому даже при использовании ПЭП с рабочей частотой 5 МГц недостаточно высокая разрешающая способность может привести к тому, что при проведении контроля не всегда удастся разрешить импульсы. Это, в свою очередь, не позволяет определить тип и размеры отражателя, например, убедиться: не превышает ли высота дефекта высоту одного прохода при автоматической сварке. Для повышения точности определения размеров отражателя можно использовать ПЭП с частотой 10 МГц, но при этом возрастает затухание акустических волн в материале объекта контроля, что приводит к увеличению уровня шума. Для повышения разрешающей способности эхосигналов при работе на 5 МГц можно использовать различные нелинейные методы обработки эхосигналов, в частности, метод максимальной энтропии (МЭ) [3] или методы построения AR-моделей [4]. При таком подходе разрешающую способность TOFD-эхосигналов можно повысить без увеличения уровня шума. В статье [5] было предложено использовать деконволюцию Ричардсона—Лаки для получения сверхразрешения TOFD-эхосигналов. Однако необходимо провести дополнительные исследования, так как деконволюция Ричардсона—Лаки работает с положительными функциями, а эхосигналы описываются знакопеременной функцией.

## 2. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЭХОСИГНАЛОВ

Предположим, что передаточная функция системы, регистрирующей эхосигналы, то есть ее реакция на импульсное воздействие в виде  $\delta$ -функции, описывается импульсным откликом  $s_e(t)$ , спектр которого имеет ширину  $\Delta f$ . При наличии точечных отражателей идеальный измеренный эхосигнал  $p(t)$  можно представить в виде суммы  $\delta(t - t_{i,del})$ , где  $t_{i,del}$  — время задержки прихода импульса от отражателя с номером  $i$ , расположенного в точке  $(x_i, z_i)$ . В матричной форме прямую задачу можно записать стандартным образом:

$$\mathbf{p} = \mathbf{G}\mathbf{f} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{p} = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$  — измеренный эхосигнал из  $N$  отсчетов;  $\mathbf{f}$  — искомая функция, состоящая из суммы  $\delta$ -функций со своими весами;  $\mathbf{G}$  — матрица, строки которой составлены из импульсного отклика системы  $s_e(t)$  с циклическим сдвигом;  $\mathbf{n}$  — аддитивный шум. Задача заключается в том, чтобы в присутствии шума  $\mathbf{n}$  по измеренному полю  $\mathbf{p}$  и известной матрице  $\mathbf{G}$  восстановить  $\mathbf{f}$ . Для описания УЗК модель (1) является приближенной, так как импульсный отклик  $s_e(t)$  будет являться функцией координат  $(x, z)$  и матрица  $\mathbf{G}$  будет иметь более сложный вид. Решение такой задачи представлено в статье [6].

### 2.1. Метод МЭ

Запись прямой задачи в виде (1) позволяет перейти к поиску оценки  $\hat{\mathbf{f}}$  по измеренным эхосигналам  $\mathbf{p}$  методом наименьших квадратов, путем минимизации невязки:

$$\chi^2(\hat{\mathbf{f}}) = \|\mathbf{G}\hat{\mathbf{f}} - \mathbf{p}\|^2 \rightarrow \min. \quad (2)$$

Дальнейшее развитие данного подхода состоит в регуляризации процедуры обращения по А.Н. Тихонову [7] за счет добавления штрафного функционала, в качестве которого может выступать максимальная энтропия в виде так называемой кросс-энтропии [8]:

$$H(f_i) = -\sum_{i=1}^N f_i \ln \left( \frac{f_i}{e\mu} \right), \quad (3)$$

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

$$\hat{\mathbf{f}} = \arg \min_{\hat{\mathbf{f}} \in R^N} \left( \|\mathbf{G}\hat{\mathbf{f}} - \mathbf{p}\|^2 - \alpha H(\hat{\mathbf{f}}) \right), \quad (4)$$

где  $\alpha$  — параметр регуляризации (коэффициент Лагранжа), контролирующий вклад стабилизатора  $H(\hat{\mathbf{f}})$  в минимизацию нормы невязки  $\chi^2(\hat{\mathbf{f}})$ . Так как метод МЭ не линеен, а штрафной функционал  $H(\mathbf{f})$  достигает максимума для импульсов с максимальной скоростью изменения, то в результате применения процедуры (4) можно получить импульс со сверхразрешением, то есть тогда, когда его длина  $\tau$  становится меньше чем  $1/\Delta f$ . Так как импульсы в общем случае могут менять фазу, следует воспользоваться модификацией метода МЭ для работы с комплексными сигналами [9].

### 2.2. Построение AR-модели спектра эхосигнала и расщепление спектра

Обозначим через  $\mathbf{P} = \mathfrak{Z}(\mathbf{p})$  комплексный спектр эхосигнала  $\mathbf{p}$  в пределах рабочей полосы частот  $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$ . Значения верхней  $f_{\max}$  и нижней частоты  $f_{\min}$  можно определить по уровню 0,1 спектра импульсного отклика  $s_e(t)$ . Для получения оценки эхосигнала  $\mathbf{p}$ , состоящего из набора пиков (как это имеет место в УЗК), целесообразно построить AR-модель спектра эхосигнала. Экстраполяция спектра  $\mathbf{P}$  с интервала  $[f_{\min}, f_{\max}]$  на интервал  $[f_{\min}^e, f_{\max}^e]$  позволит уменьшить длительность импульсов в эхосигнале  $\mathbf{p}$ . В данной статье полагалось, что  $f_{\min}^e = 0,1$  МГц, а  $f_{\max}^e = 3f_{\max}$ . Строго говоря, степень сверхразрешения определяется шумом [10]. Для экстраполяции вперед на интервал  $[f_{\max}, f_{\max}^e]$  можно воспользоваться полюсной AR-моделью, которая описывается линейным дифференциальным уравнением порядка  $d$  [11]:

$$P_n^{AR} = -\sum_{m=1}^d a_m^d P_{n-m}, \quad (5)$$

где  $a_m^d$  — комплексные коэффициенты линейного предсказания вперед. Экстраполяцию спектра  $\mathbf{P}$  назад, то есть на интервал  $[f_{\min}^e, f_{\min}^e]$ , можно сделать по формуле:

$$P_n^{AR} = -\sum_{m=1}^d (a_m^d)^* P_{n+m}, \quad (6)$$

где знаком  $*$  отмечена комплексно сопряженная величина. В пределах исходного частотного диапазона  $[f_{\min}^e, f_{\max}^e]$  значение спектра сохраняется  $P_n^{AR} = P_n$ . После экстраполяции спектра эхосигнала его оценку можно получить с помощью обратного преобразования Фурье:

$$\mathbf{p}_{AR} = \mathfrak{F}^{-1}(\mathbf{P}_{AR}). \quad (7)$$

Для расчета коэффициентов  $a_m^d$  AR-модели можно использовать алгоритм Берга [11]. В силу того, что метод построения AR-модели наиболее эффективно работает с сигналами типа  $\sin(x)/x$ , эхосигналы перед обработкой необходимо пропустить через инверсный или винеровский фильтр с импульсным откликом  $s_e(t)$ .

Для повышения эффективности работы процедуры экстраполяции ее можно объединить с методом расщепления спектра, разработанного для уменьшения уровня структурного шума [12]. Для этого исходный спектр эхосигналов на интервале  $[f_{\min}^e, f_{\max}^e]$  разбивается на  $M$  перекрывающихся диапазонов  $\Delta f_m < \Delta f$ , и с каждого поддиапазона его спектр  $\mathbf{P}_m$  экстраполируется на интервал  $[f_{\min}^e, f_{\max}^e]$ :

$$\mathbf{p}_{AR} = \sum_{m=1}^M \mathfrak{F}^{-1}(\mathbf{P}_{AR,m}). \quad (8)$$

Такой подход, за счет усреднения  $M$  вариантов экстраполяции спектров, позволяет уменьшить общую ошибку предсказания.

### 3. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

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

#### 3.1. Образец с двумя БЦО и моделью трещины

В образце толщиной 24,5 мм из перлитной стали 20 было просверлено два боковых цилиндрических отверстия (БЦО) диаметром 2 мм с центрами на глубинах 12 и 16 мм. В том же образце электроэрозионным способом был сделан пропил шириной 0,2 мм с краями на глубинах 12 и 16 мм.

Для измерения использовали две пары ПЭП с номинальной частотой 5 и 10 МГц, установленные на рексолитовые призмы с углом наклона 17,5 град, стрелой 8 мм и путем в призме 6,7 мм. Расстояние между передними гранями призм было равно 45 мм.

В качестве импульсного отклика  $s_e(t)$  при обработке эхосигналов использовался гауссоподобный импульс, который нужен для формирования матрицы  $\mathbf{G}$  или для проведения фильтрации Винера. На рис. 1 показан импульсный отклик, характерный для ПЭП с номинальной частотой 10 МГц, и его спектр. Максимум спектра у такого ПЭП обычно около 8 МГц, а для ПЭП с номинальной частотой 5 МГц — максимум находится около 4,2 МГц.

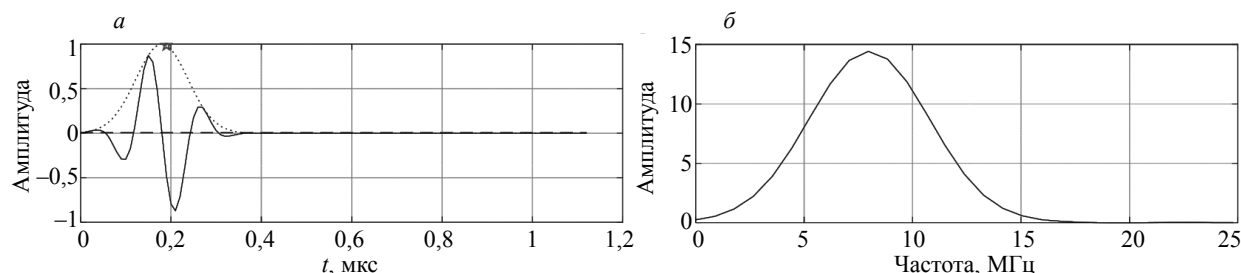


Рис. 1. Вид импульсного отклика (а) и его спектра (б) для ПЭП с номинальной частотой 10 МГц.

### 3.1.1. Два БЦО диаметром 2 мм

Для понимания результатов модельного эксперимента рассмотрим подробнее особенности рассеяния плоской продольной волны на БЦО с акустически мягкой границей. Аналитическое решение задачи рассеивания плоской гармонической ультразвуковой волны на цилиндре с акустически мягкой границей приведено в статье [14], а решение для произвольного граничного условия — в работе [15]. Просуммировав решения гармонической задачи для заданного частотного диапазона, можно перейти к анализу рассеяния в импульсном режиме. На рис. 2 показаны контуры БЦО, стрелкой отмечено направление падения ультразвукового зондирующего импульса, а пунктирной стрелкой — направление приема поля. Такая геометрия излучения—приема типична для TOFD-режима.

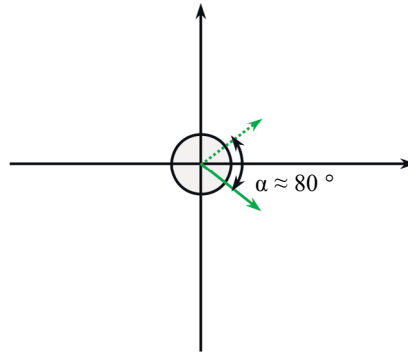


Рис. 2. БЦО и направления излучения и приема при работе в режиме TOFD.

На рис. 3а в растровом виде представлен результат расчета рассеянного сигнала продольной волны для  $\alpha \in (0, 180)$  град при падении импульса продольной волны с центральной частотой 10 МГц на БЦО диаметром 2 мм. Хорошо виден импульс, зеркально отраженный от поверхности цилиндра, и импульс обегания—соскальзывания (далее для краткости импульс обегания). Фазы зеркально отраженного сигнала и импульса обегания различаются на 180 град. Задержка и амплитуда импульса обегания сильно зависят от направления приема — при обратном отражении ( $\alpha = 180$  град) амплитуда импульса обегания равна примерно  $-30$  дБ от амплитуды зеркального импульса. Полупрозрачным прямоугольником с границей черного цвета отмечена область, характерная для режима TOFD, в которой амплитуда импульса обегания соизмерима с зеркальным импульсом. На рис. 3б показан эхосигнал для  $\alpha = 80$  град.

Если радиус БЦО меньше длины волны, то импульс обегания имеет пренебрежимо малую амплитуду для всех углов приема.

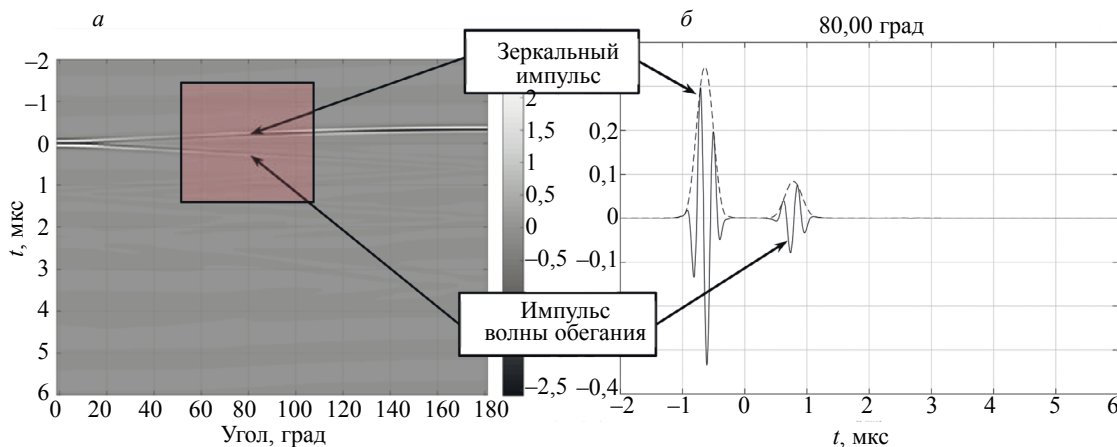


Рис. 3. Растровое изображение эхосигналов, рассеянных на БЦО диаметром 2 мм в диапазоне углов  $\alpha \in (0, 180)$  град (а), вид эхосигнала, рассеянного под углом  $\alpha = 80$  град (б).

### 3.1.1.1. Номинальная частота ПЭП 5 МГц

На рис. 4а показан измеренный эхосигнал (линия красного цвета) и сигнал, полученный после обработки методом МЭ (линия черного цвета) по формуле (4). Так как разрешающая способность возросла более чем в два раза, зеркальный импульс и импульс обегания разрешились для обеих отверстий. Зеркальные импульсы от БЦО совпадают по фазе друг с другом и, в соответствии с теорией (см. рис. 3), находятся в противофазе с головной волной и импульсами обегания. На рис. 4б показан измеренный эхосигнал (линия красного цвета) и сигнал, полученный после построения AR-модели спектра эхосигнала (линия черного цвета) по формуле (8). Разрешающая способность возросла примерно в два раза, и, в целом, результат подобен результату обработки, представленному на рис. 4а. В работе [4] при построении AR-модели спектра эхосигнала был получен подобный результат.

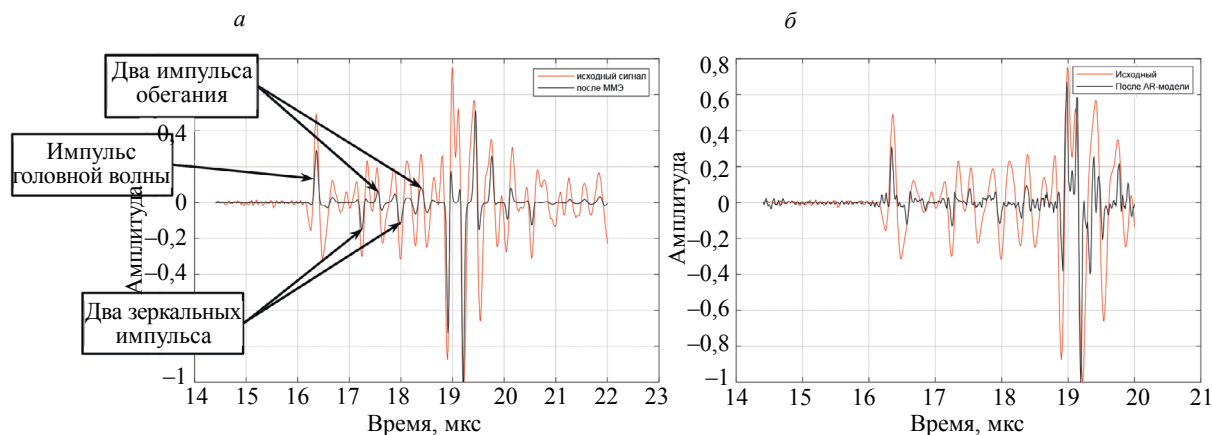


Рис. 4. Эхосигналы от двух БЦО при использовании ПЭП на 5 МГц: метод МЭ (а); построение AR-модели спектра (б).

### 3.1.1.2. Номинальная частота ПЭП 10 МГц

На рис. 5а показан измеренный эхосигнал (линия красного цвета) и сигнал, полученный после обработки методом МЭ (линия черного цвета) по формуле (4). Из-за увеличения в два раза рабочей частоты ПЭП уже на измеренном эхосигнале хорошо видны зеркальные импульсы и импульсы обегания при отражении от двух БЦО. Зеркальные импульсы от БЦО совпадают по фазе друг с другом и, как положено, находятся в противофазе с головной волной и импульсами обегания. После применения метода МЭ длина импульсов уменьшилась примерно от 200 до 70 нс, а уровень шума — более чем на 16 дБ. На рис. 5б показан измеренный эхосигнал (линия красного цвета) и сигнал, полученный после построения AR-модели спектра эхосигнала (линия черного цвета) по формуле (8). Разрешающая способность возросла более чем в три раза, но нарушилось соотношение фаз импульсов: импульсы, рассеянные на БЦО, поменяли фазу на 180 град, а фаза импульса головной волны перестала быть равной 0 град. По-видимому, это связано с тем, что импульсы обрабатываемого эхосигнала отличаются от используемого импульсно-го отклика, показанного на рис. 1.

## 3.1.2. Электроэрозионная модель трещины высотой 4 мм

### 3.1.2.1. Номинальная частота ПЭП 5 МГц

На рис. 6а показан измеренный эхосигнал (линия красного цвета) и сигнал, полученный после обработки методом МЭ (линия черного цвета) по формуле (4). Видно, что импульсы от верхнего и нижнего края модели трещины в противофазе как на исходном эхосигнале, так и после применения метода МЭ, а импульс головной волны и эхосигнал от вершины трещины в противофазе. То есть, на рис. 6а представлен классический результат, разве что «подкачал» эхосигнал, отраженный

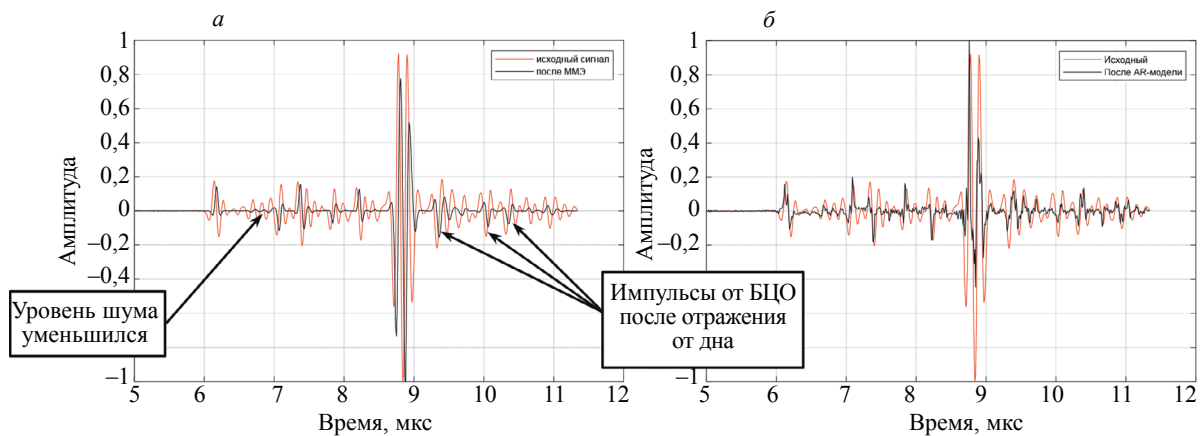


Рис. 5. Эхосигналы от двух БЦО при использовании ПЭП на 10 МГц: метод МЭ (а); построение AR-модели спектра (б).

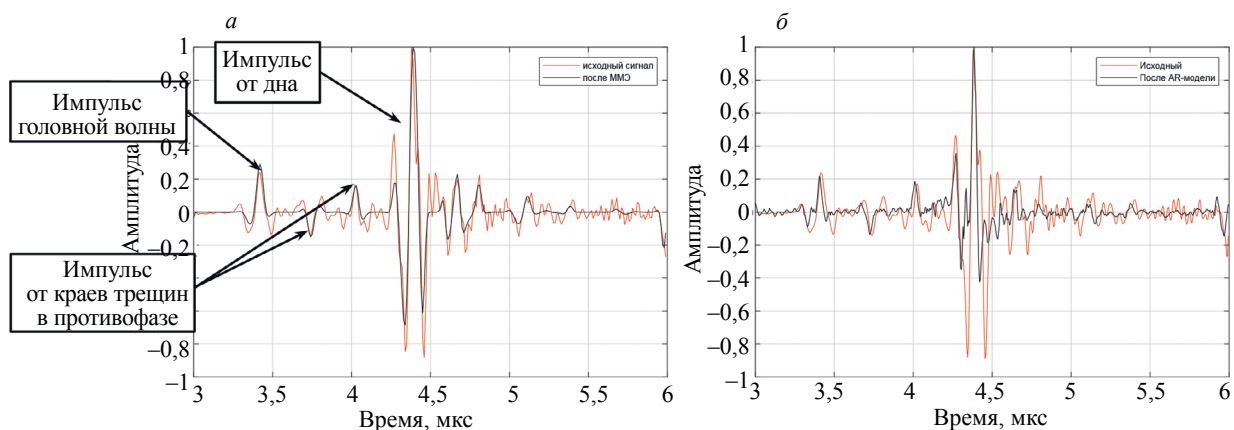


Рис. 6. Эхосигналы от модели трещины при использовании ПЭП на 5 МГц: метод МЭ (а); построение AR-модели спектра (б).

от дна, из-за того, что его форма сильно отличается от импульсного отклика, показанного на рис. 1. На рис. 6б показан измеренный эхосигнал (линия красного цвета) и сигнал, полученный после построения AR-модели спектра эхосигнала (линия черного цвета) по формуле (8). Разрешающая способность возросла примерно в два раза и в целом изображение подобно результату обработки, показанному на рис. 6а.

### 3.1.2.2. Номинальная частота ПЭП 10 МГц

На рис. 7а показан измеренный эхосигнал (линия красного цвета) и сигнал, полученный после обработки методом МЭ (линия черного цвета) по формуле (4). Из-за увеличения в два раза частоты ПЭП на измеренном эхосигнале импульсы, отраженные от краев трещины, уверенно разрешаются. После применения метода МЭ длина импульсов уменьшилась примерно от 200 до 70 нс, а уровень шума — более чем на 16 дБ. Однако импульсы, отраженные от краев трещин, поменяли фазу на 180 град по сравнению с изображением на рис. 6. По-видимому, это связано с тем, что импульсы реального эхосигнала отличаются от импульсного отклика  $s_e(t)$ , который показан на рис. 1. На рис. 7б показан измеренный эхосигнал (линия красного цвета) и сигнал, полученный после построения AR-модели спектра эхосигнала (линия черного цвета) по формуле (8). В целом, изображения на левой и правой панели рис. 7 достаточно близки друг другу.

## 3.2. Образец трубопровода с тремя БЦО, придонным и приповерхностным пазами

Образец был изготовлен из фрагмента трубы из стали ASTM A694 F70 толщиной 28,5 мм и радиусом внутренней поверхности равным 327 мм. В образце были просверлены три БЦО диа-

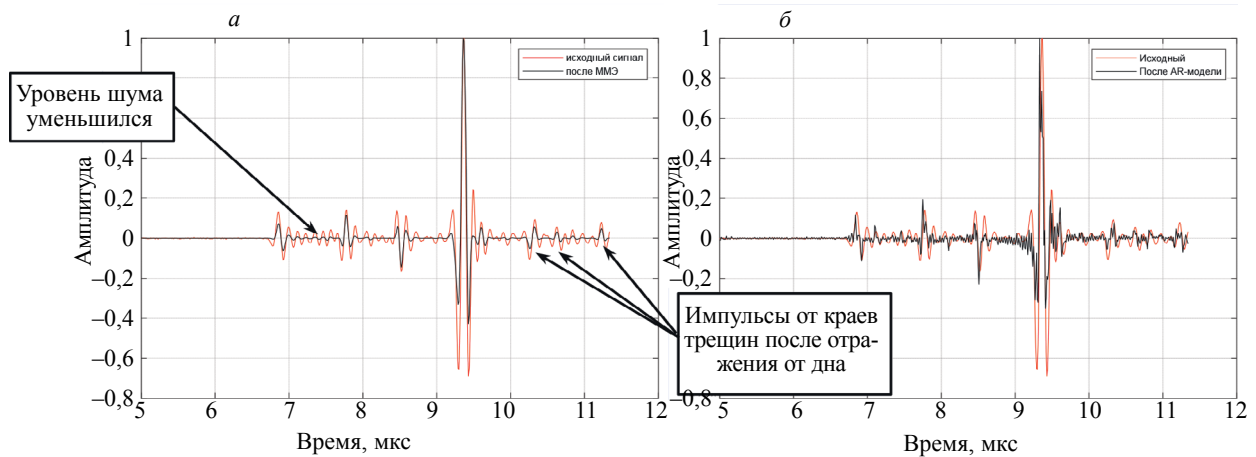


Рис. 7. Эхосигналы от модели трещины при использовании ПЭП на 10 МГц: метод МЭ (а); построение AR-модели спектра (б).

метром 3 мм с центрами на глубинах 6,7, 13,7 и 20,7 мм, отмеченные на рис. 8 выносками 1, 2 и 3. В той же плоскости образца были изготовлены придонный и приповерхностный вертикальные пазы высотой 1 мм и шириной 0,2 мм, отмеченные выносками 4 и 5. В отличие от предыдущих модельных экспериментов, пара ПЭП перемещалась вдоль линии окружности по внешней поверхности образца. Для измерения использовался ПЭП с номинальной частотой 5 МГц, установленный на рексолитовую призму с углом наклоном 17,5 град, стрелой 8 мм и путем в призме 6,7 мм. Расстояние между передними гранями призм было равно 125 мм.

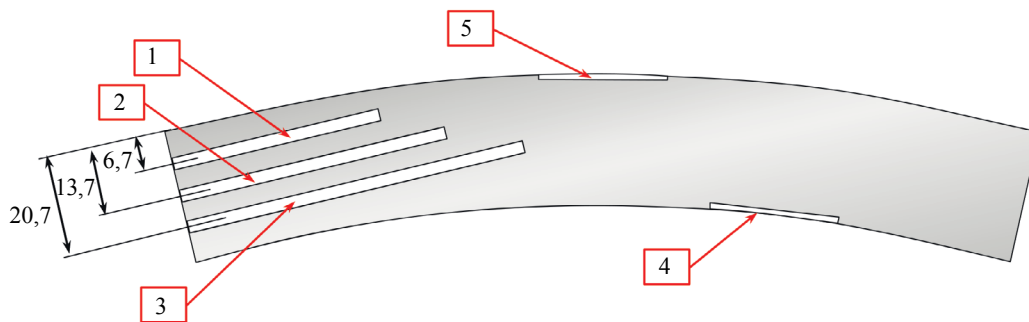


Рис. 8. Вертикальное сечение образца трубы с внутренним радиусом 327 мм.

На рис. 9 в растровом виде показаны измеренные TOFD-эхосигналы. Хорошо видно множество слабо разрешающихся между собой импульсов от трех БЦО, неплохо заметны эхосигналы от вершины придонного паза (отражатель 4), а эхосигналы от приповерхностного паза (отражатель 6) обнаружить не удастся. Следует отметить, что импульс головной волны довольно затянут и сильно отличается от того, что показан на рис. 1. Из-за своего удлинения он может маскировать эхосигналы маленькой амплитуды от отражателей, расположенных в верхней части образца. Анализ эхосигналов усложняет и то обстоятельство, что импульсы головной волны и донного сигнала при сканировании изменяют свое положение во времени. Это связано с тем, что из-за изменения усилия прижима призм приемника и излучателя расстояние между ними изменяется. Причин для этого может быть несколько: эллипсоидальность свариваемых труб, смещение осей труб относительно друг друга, неровность поверхностей труб.

В качестве импульсного отклика, необходимого для работы методов сверхразрешения, использовался импульс головной волны, который был выделен из измеренных эхосигналов. После применения метода МЭ по формуле (4) импульс головной волны «ужался» в импульс из

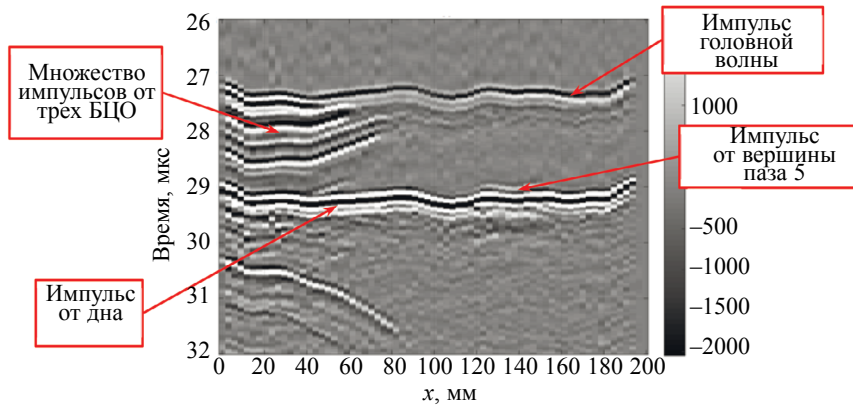


Рис. 9. TOFD-эхосигналы в образце.

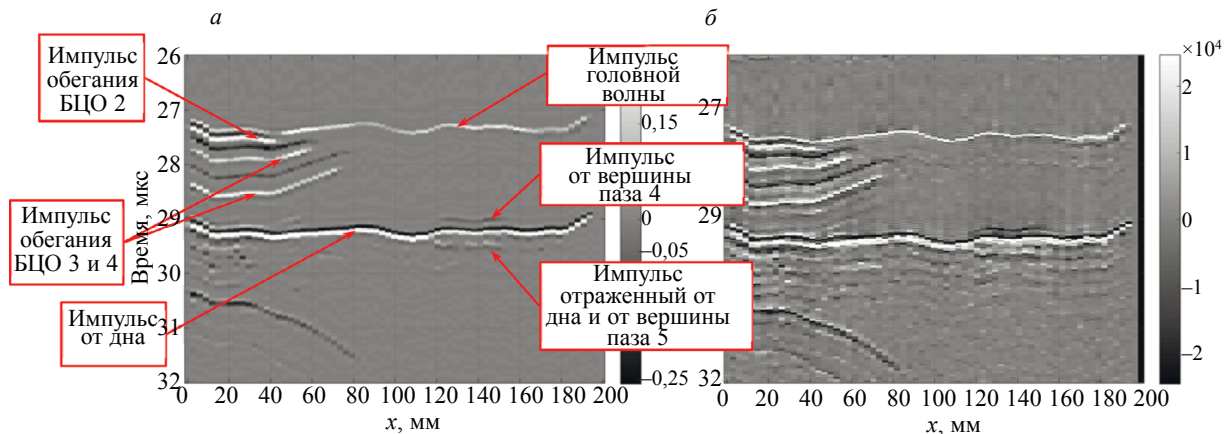


Рис. 10. Эхосигналы в образце после применения методов получения сверхразрешения: метод МЭ (а); построение AR-модели спектра (б).

одного положительного полупериода (рис. 10а), чего нельзя сказать о донном импульсе — у него и длительность уменьшилась не так как у головного, и фаза стала равна примерно 90 град. Этот эффект связан с тем, что форма эхосигнала меняется с глубиной [6]. Импульсы, отраженные от придонного паза, стали хорошо видны как на прямом луче, так и при отражении от дна. Зеркальные импульсы и импульсы обегания двух нижних БЦО с номерами 2 и 3 разрешились и стало видно, что они в противофазе. А от верхнего БЦО номер 1, скорее всего, виден только импульс обегания, фаза которого совпадает с фазой импульса головной волны. Приповерхностный пропил (отражатель 5) не виден даже после применения процедуры сверхразрешения. На рис. 10а показаны эхосигналы после построения AR-модели их спектров по формуле (8). Их уровень шума больше, чем для случая применения метода МЭ.

#### 4. ВЫВОДЫ

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

1. Методы МЭ или построение AR-модели спектра эхосигнала повышают разрешающую способность TOFD-эхосигналов более чем в два раза, что позволяет более уверенно разделять импульсы и анализировать их фазу.

2. Метод TOFD, основываясь только на анализе фазы эхосигналов, не в состоянии отличить трещину от БЦО диаметром 2 мм, так как импульс обегания и зеркальный импульс находятся в противофазе, также как у импульсов, отраженных от краев трещины. Возможно, что дополнительный анализ амплитуд импульсов позволит уточнить тип отражателя (дифракционный амплитудно-временной метод [16]).



3. Для применения метода МЭ нужно задать значения двух параметров: коэффициента Лагранжа  $\alpha$  и уровня фона  $\mu$ . Уровень фона можно выбирать около  $10^{-4}$ — $10^{-6}$  и он не критично влияет на качество изображения, а результат обработки сильно зависит от значения коэффициента Лагранжа  $\alpha$ . Нужно обязательно испытывать несколько коэффициентов  $\alpha$  и в соответствии с заданным критерием выбирать решение.

4. При построении AR-модели спектра нужно задать значения семи параметров: верхняя и нижняя частота интервала исходного спектра  $[f_{\min}, f_{\max}]$ , верхняя и нижняя частота интервала экстраполяции  $[f_{\min}^e, f_{\max}^e]$ , порядок модели  $d$ , число поддиапазонов  $M$  и размеры диапазона  $\Delta f_m$  при расщеплении спектра. По этой причине метод МЭ предпочтительнее.

5. Для обоих методов очень важно задать правильную форму импульсного отклика  $s_e(t)$ . Есть несколько вариантов его выбора: можно представить его аналитически (см. рис. 1), можно использовать сигнал, полученный при калибровке антенной решетки, можно выделить его из обрабатываемого эхосигнала, например, использовать импульс головной волны (см. раздел 3.2). Выбор способа определения импульсного отклика должен решаться на этапе разработки конкретной методики.

6. При отклонении от акустической оси форма эхосигнала меняется и эффективность работы рассмотренных методов получения сверхразрешения уменьшается. Для метода МЭ способ ее решения предложен в статье [6], а вот для метода построения AR-модели простые варианты не просматриваются — разве что делить апертуру на поддиапазоны.

Автор выражает благодарность сотруднику системного отдела «НПЦ «ЭХО+» М.С. Садыкову за проведение экспериментов и главному конструктору «НПЦ «ЭХО+» А.Е. Базулину за замечания и предложения, высказанные в процессе подготовки статьи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ISO 16828: Non-destructive testing. Ultrasonic testing. Time-of-flight diffraction technique as a method for detection and sizing of discontinuities, 2012.
2. Darmon M., Ferrand A., Dorval V., Chatillon S. Recent Modelling Advances for Ultrasonic TOFD Inspections // Rev. Prog. Quant. Nondestruct. Eval. 2015. V. 559.
3. Базулин Е.Г. О возможности использования в ультразвуковом неразрушающем контроле метода максимальной энтропии для получения изображения рассеивателей по набору эхосигналов // Акустический журнал. 2013. Т. 59. № 2. С. 235—254.
4. Honarvar F., Tabatabai S.A.M., Dusatko T., Sinclair A.N. A new signal processing technique for enhancement of ultrasonic testing signals / 16th World Conference on Nondestructive Testing, Montreal, Canada (August 2004).
5. Park Choon Su. A High Resolution Approach by Using Deconvolution for Phased Array Ultrasound Imaging // Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing. 2018. V. 38. № 3. P. 190—196. DOI: 10.7779/JKSNT.2018.38.3.190
6. Базулин Е.Г., Вовк А.С. Применение метода максимальной энтропии в ультразвуковой дефектоскопии с учётом переменной формы эхосигнала // Научные труды МЭИ. 2018. № 5. С. 111—119.
7. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач / Изд. 3-е, исправл. М.: Наука, 1986. 288 с.
8. Kullback S. Information Theory and Statistics. New York, 1968. 416 p.
9. Базулин А.Е., Базулин Е.Г. Деконволюция сложных эхосигналов методом максимальной энтропии в ультразвуковом неразрушающем контроле // Акустический журнал. 2009. Т. 55. № 6. С. 772—783.
10. Косарев Е.Л. О пределе сверхразрешения при восстановлении сигналов // Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35. № 1. С. 68—87.
11. Марпл(мл.) С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 265 с.
12. Базулин Е.Г., Вовилкин А.Х., Тихонов Д.С. Повышение достоверности ультразвукового контроля. Ч. 2. Повышение отношения сигнал/шум // Контроль. Диагностика. 2015. № 9. С. 10—27.
13. Официальный сайт фирмы «ЭХО+» URL: <http://www.echoplus.ru> (дата обращения: 20.12.2020).
14. Голубев А.С. Отражение плоских волн от цилиндрического дефекта // Акустический журнал. 1961. Т. VII. № 2. С. 174—180.
15. Pao Y.H., Mow C.C. Diffraction of elastic waves and dynamic stress concentrations. New York: Crane Russak, 1973. 685 p.
16. Алёшин Н.П., Григорьев М.В., Козлов Д.М., Крысько Н.В., Кусый А.Г. Диагностический комплекс для оценки технического состояния изделий ответственного назначения // Сварка и диагностика. 2018. № 6. С. 49—51.