

УДК 620.179.162

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-5-111-119

Применение метода максимальной энтропии в ультразвуковой дефектоскопии с учетом переменной формы эхосигнала

Е.Г. Базулин, А.С. Вовк

Для восстановления изображения отражателей со сверхразрешением с целью повышения точности определения размеров несплошностей в объекте контроля предложено использовать метод максимальной энтропии (МЭ) для обработки эхосигналов, измеренных в режиме TOFD. Эффект сверхразрешения упростит процедуру определения фазы эхосигналов от верхнего и нижнего края трещины, что очень важно для их распознавания. Обычно при использовании метода МЭ рассчитывается циркулянтная матрица, связывающая коэффициент отражения в объекте контроля и эхосигнал, измеренный в режиме TOFD. Однако, форма эхосигнала зависит от глубины залегания отражателя, что приводит к появлению фантомных бликов на восстановленном изображении.

Разработана программа расчета модифицированной матрицы, учитывающая изменение формы эхосигнала, отраженного от точечного отражателя на произвольной глубине. Для проверки работоспособности программы расчета эхосигналов проведено их сравнение с эхосигналами, рассчитанными с помощью программы CIVA. Разница между эхосигналами — менее чем 5%.

На примере изображений, полученных в численном эксперименте, изучено влияние фактора изменения формы эхосигналов на результаты метода МЭ. Переменная форма сигнала накладывает ограничение на применение метода МЭ с циркулянтной матрицей — «боковые лепестки» составляют величину порядка 40% от амплитуды блика отражателя на восстановленном изображении. Восстановление изображения отражателей модифицированным методом МЭ позволило существенно уменьшить уровень «боковых лепестков» и повысить разрешающую способность более чем в 3 раза. Модельные эксперименты также подтвердили эффективность работы метода МЭ с модифицированной матрицей. Импульс головной волны и импульс, однократно отраженный от дна объекта контроля, сузились более чем в 5 раз при малом уровне «боковых лепестков». Это позволило легко обнаружить то, что импульсы находятся в противофазе.

Ключевые слова: ультразвуковая дефектоскопия, сверхразрешение, обратная задача рассеивания, метод максимальной энтропии.

Для цитирования: Базулин Е.Г., Вовк А.С. Применение метода максимальной энтропии в ультразвуковой дефектоскопии с учетом переменной формы эхосигнала // Вестник МЭИ. 2018. № 5. С. 111—119. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-5-111-119.

Application of the Maximum Entropy Method in Ultrasonic Flaw Detection with Allowance for Echo Signal Shape Variability

E.G. Bazulin, A.S. Vovk

In order to reconstruct the image of reflectors with super resolution for more accurately determining the size of discontinuities in the examined item, it is suggested to use the maximum entropy (ME) method for processing echo signals measured in the TOFD mode. The effect of super resolution will make it possible to simplify the procedure for determining the phase of echoes from the crack upper and lower edges, a circumstance that is of much importance for their recognition. Conventionally, application of the ME method involves the need to calculate the circulant matrix correlating the reflection coefficient in the examined item and the echo signal measured in the TOFD mode. However, the echo signal shape depends on the reflector occurrence depth, a circumstance due to which phantom flare spots appear in the reconstructed image.

A program for calculating the modified matrix has been developed, which takes into account the altered shape of the echo reflected from a point reflector lying at an arbitrary depth. For checking the efficiency of the echo signal calculation program, the obtained echo signals were compared with the echo signals calculated using the CIVA program. The obtained echoes have been found to differ from each other by less than 5%.

The images obtained in a numerical experiment were used to study the effect the echo signal variation factor has on the results obtained from applying the ME method. It has been found that the echo signal waveform variability imposes certain limitation on using the ME method with a circulant matrix: the "side lobes" make around 40% of the reflector flare amplitude on the reconstructed image. The use of the modified ME

method for reconstructing the reflector image made it possible to significantly reduce the level of "side lobes" and increase the resolving power by more than a factor of 3. Model experiments have also confirmed the effectiveness of the ME method with the modified matrix. The head wave impulse and the impulse reflected once from the examined item bottom have become narrower by more than a factor of 5 with a small level of "side lobes". Owing to this circumstance, the impulses were easily found to be in antiphase.

Key words: eultrasonic flaw detection, super resolution, inverse scattering problem, maximum entropy method.

For citation: Bazulin E.G., Vovk A.S. Application of the Maximum Entropy Method in Ultrasonic Flaw Detection with Allowance for Echo Signal Shape Variability. MPEI Vestnik. 2018;5:111—119. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-5-111-119.

Введение

Ультразвуковая дефектоскопия — один из самых распространенных методов неразрушающего контроля. На практике 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, геометрические размеры которой определяют временем пробега импульса. Измеренные эхосигналы информативны и позволяют довольно эффективно обнаруживать трещины, так как импульсы, дифрагированные на их краях, находятся в противофазе [2]. В совокупности с малым объемом регистрируемых эхосигналов (что позволяет проводить контроль с очень высокой скоростью) метод TOFD представляется эффективным для контроля кольцевых и продольных сварных соединений. Однако недостаточная разрешающая способность и невысокий уровень шума при проведении контроля не всегда позволяет однозначно определить тип и размеры отражателя. Для повышения точности определения положения и размеров можно повышать частоту преобразователей, но при этом возрастает затухание акустических волн в материале объекта контроля. Для улучшения разрешающей способности изображения отражателей при работе на пониженных частотах используют различные нелинейные методы обработки эхосигналов, в частности, метод максимальной энтропии (МЭ) [3].

Корреляционное восстановление изображения

Решение обратной задачи рассеивания заключается в том, чтобы по известным источникам поля $q(\mathbf{r}_p, t)$, расположенным в области S_p и измеренному в области S_r рассеянному полю $p(\mathbf{r}_r, t)$ найти функцию $\varepsilon(\mathbf{r})$, описывающую отражающие свойства неоднородности в области S . Один из методов оценки функции $\varepsilon(\mathbf{r})$ заключается в корреляционной обработке измеренного поля $p(\mathbf{r}_r, t)$, где вектор \mathbf{r}_r характеризует положение излучателя, а \mathbf{r}_p — приемника. Запишем решение прямой задачи, то есть расчет рассеянного поля $p(\mathbf{r}_r, t) = p(\mathbf{r}_r, t; \mathbf{r}_p)$ по известным функциям $q(\mathbf{r}_p, t)$ и $\varepsilon(\mathbf{r})$, в следующем виде:

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

Поместив точечный отражатель в произвольную точку \mathbf{r}_p , полагая $\varepsilon(\mathbf{r}) = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_p)$, можно оценить вид функции $\varepsilon(\mathbf{r})$ по корреляционной формуле:

$$\hat{\varepsilon}_{corr}(\mathbf{r}_i) = \int \int \int \int_{S_t S_r S} p(\mathbf{r}_r, t) G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_p, t) d\mathbf{r}_r d\mathbf{r}_p d\mathbf{r}_t dt; \quad (2)$$

$$G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_p, t) = P(\mathbf{r}_r, \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_p), q(\mathbf{r}_p, t)).$$

Функция $G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_p, \mathbf{r}_p, t)$ зависит от формы излученного импульса $s(t)$ и должна учитывать эффекты отражения, преломления и трансформации типов волн, анизотропии акустических свойств материалов, затухания звука, наличия нескольких областей с разными акустическими свойствами.

Под акустической схемой, отмеченной как as , подразумевается описание лучевой траектории распространения импульса при отражении его от границ объекта контроля с учетом трансформации типа волны. Количество отражений при излучении звука обозначается как m_p , а при приеме — m_r . Если функцию $s(t)$ заменить на $\delta(t - t_{max})$, где t_{max} — время нарастания импульса, а излучатель и приемник считаются точечными, то выражение (2) упрощается и трансформируется в формулу, описывающую метод C-SAFT [4]:

$$\hat{\varepsilon}_{C-SAFT}(\mathbf{r}_i; as) = \int \int_{S_r S_p} p(\mathbf{r}_r, t - t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_p; as) + t_{max}) d\mathbf{r}_r d\mathbf{r}_p, \quad (3)$$

где $t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_p, \mathbf{r}_p, as)$ — время пробега импульса от излучателя до точки \mathbf{r}_i и к приемнику для заданной акустической схемы as .

Чем больше диапазон изменения \mathbf{r}_i и \mathbf{r}_p , тем выше разрешающая способность восстановленного изображения.

Формулу (2) перепишем в матричном виде

$$\mathbf{p} = \mathbf{G}\boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{n}. \quad (4)$$

Это позволит приближенно представить решение уравнения (4) в виде корреляционной формулы:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{corr} = \mathbf{G}^T \mathbf{p}. \quad (5)$$

Восстановление изображения по TOFD-эхосигналам

Схема измерения эхосигналов в режиме TOFD показана на рис. 1. Наклонный пьезопреобразователь (ПЭП) слева излучает зондирующий импульс, а справа принимает эхосигналы. ПЭПы разнесены на расстояние b и синхронно перемещаются вдоль шва (вдоль оси y , которая перпендикулярна плоскости рисунка). В плоскости xz ПЭПы неподвижны, и в качестве ис-

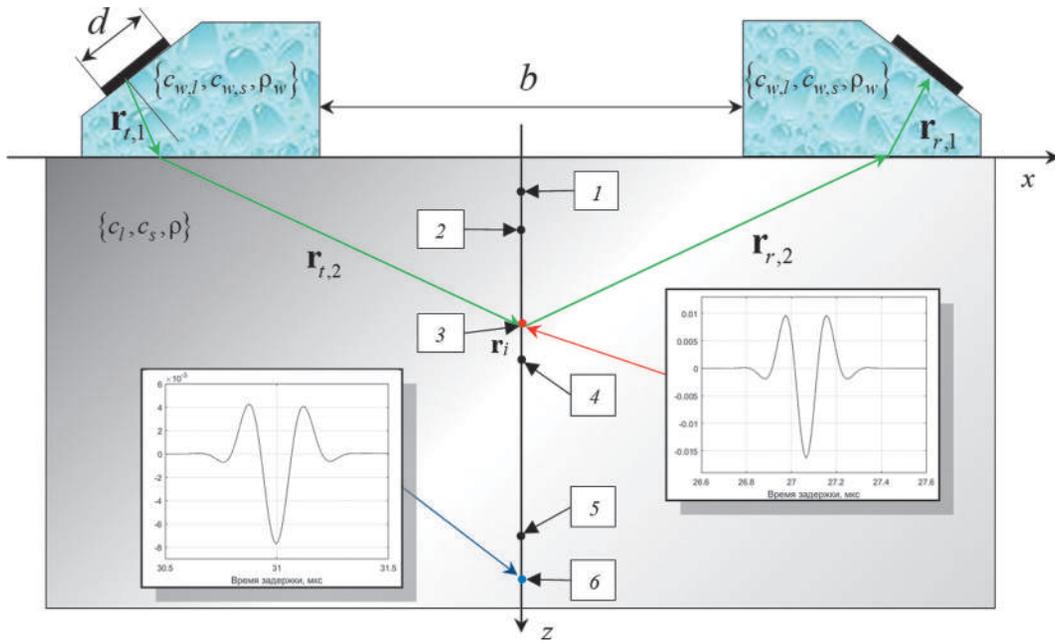


Рис. 1. Измерения эхосигналов в режиме TOFD

ходных данных имеется только один эхосигнал $p(t)$, поэтому выражение (3) вырождается в формулу:

$$\hat{\epsilon}_{C-SAFT}(z_i) = p(t_{del}(z_i)), \quad (6)$$

где $t_{del}(z_i)$ — время пробега импульса от центров пластин ПЭП до точки z_i .

Положим, что линия, на которой восстанавливается изображение отражателей, совпадает с осью z . Для того, чтобы получить изображение по (5), нужно рассчитать матрицу \mathbf{G} . Простейший способ состоит в том, чтобы сформировать ее из столбцов, в которых зондирующий сигнал $s(t)$ сдвинут в соответствии со временами задержек $t_{del}(z_i)$. Данная формула справедлива при точечных размерах излучающей и приемной пластин ПЭПов.

Известно, что форма сигнала при удалении от акустической оси пьезопластины конечных размеров d будет меняться (см. рис. 1), и восстановление изображения по (5) с матрицей \mathbf{G} может оказаться низкого качества [5]. Поэтому следует уметь рассчитывать форму эхосигнала $s(t, z_i)$, рассеянного на точечном отражателе на глубине z_i . Матрица, сформированная из сигналов $s(t, z_i)$ с учетом $t_{del}(z_i)$, обозначается как \mathbf{G}_z .

Расчет TOFD-эхосигналов для точечного отражателя

Пусть для излучения ультразвуковых волн используется наклонный ПЭП с пьезоэлементом шириной d и рабочей частотой f_c , который установлен на призму с углом наклона β_w из материала со скоростями продольной и поперечной волны и плотностью $\{c_{w,l}, c_{w,s}, \rho_w\}$. Прием эхосигналов происходит подобным ПЭП. Акустические свойства однородного изотропного объекта контроля обозначим через $\{c_p, c_s, \rho\}$. Считается, что

каждая элементарная площадка пьезоэлемента имеет диаграмму направленности $\Theta(\alpha)$ [6], которую можно приближенно рассчитать по формуле:

$$\Theta(\alpha) \approx \cos(\alpha), \quad (7)$$

где α — угол, отсчитываемый от нормали к поверхности пьезопластины.

Стрелками зеленого цвета на рис. 1 схематически показана траектория распространения импульса продольной волны от элементарной площадки S_l излучающего пьезоэлемента к элементарной площадке приемного пьезоэлемента S_r .

Рассчитать импульс в точке r_i (круг красного цвета на рис. 1) при подаче на пьезоэлемент электрического импульса s_l при условии, что поверхность пьезоэлемента колеблется синхронно, можно по теории геометрической акустики [7]:

$$s_t(\mathbf{r}_l, \mathbf{r}_i, t) = \int_{S_{irr}} \frac{\Theta(\alpha) D_{w,o}(\alpha_t)}{R_t(\mathbf{r}_l, \mathbf{r}_i, as_t)} s(t - t_l(\mathbf{r}_l, \mathbf{r}_i, as_t)) d\mathbf{r}_l, \quad (8)$$

где $D_{w,o}(\alpha_t)$ — коэффициент прозрачности по давлению для угла падения α_t на границу призма-объект контроля; as_t — акустическая схема на излучение для прямого луча $m_t = 0$ имеет вид $c_t = \{c_{w,l}, c_p\}$.

Изменение амплитуды импульса описывается функцией расхождения $R_{irr}(\mathbf{r}_l, \mathbf{r}_i, as)$, вид которой определяется из предположения, что поток энергии в лучевой трубке постоянен [8]. При преломлении на плоской границе он имеет вид

$$R_t(\mathbf{r}_l, \mathbf{r}_i, as_t) = |\mathbf{r}_{l,2}| + |\mathbf{r}_{l,1}| \frac{c_{l,1}}{c_{l,2}} \left(\frac{\cos \alpha_{l,2}}{\cos \alpha_{l,1}} \right)^2. \quad (9)$$

Пусть в точке \mathbf{r}_i находится точечный отражатель $\varepsilon(\mathbf{r}_i) = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)$, для которого коэффициент отражения V не зависит от угла падения луча и отражения и равен -1 . Для расчета принятого эхосигнала следует рассчитать время задержки и амплитуду по всем лучам при излучении импульса $s_i(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_r, t)$ из точки \mathbf{r}_i и проинтегрировать по поверхности S_r приемного ПЭП:

$$p(\mathbf{r}_i, t) = \int_{S_r} V \frac{\Theta(\alpha) D_{o,w}(\alpha_r)}{R_r(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_r, as_i)} s_i(\mathbf{r}_i, t)(t - t_r(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_r, as_i)) d\mathbf{r}_r, \quad (10)$$

где $D_{w,o}(\alpha_r)$ — коэффициент прозрачности по давлению для угла падения α_r на границу объекта контроля—призма; as_r — акустическая схема на прием для прямого луча $m_r = 0$ имеет вид $c_r = \{c_{w,r}, c_l\}$.

Конечные размеры пьезоэлемента приводят к тому, что форма измеренного эхосигнала меняется. Импульс от отражателя на пересечении акустических осей ПЭП практически совпадает с точностью до коэффициента с зондирующим импульсом $p(\mathbf{r}_i, t) \approx s(t)$ и показан на рис. 1 выноской с красной границей. Эхосигнал от точечного отражателя при удалении от точки пересечения акустических осей (выноска синего цвета на рис. 1) заметно отличается от $s(t)$. Масштаб обоих графиков по оси времени одинаков и равен 1 мкс.

При аналитическом расчете поля формулы (7) — (10) записывают как одно выражение, а затем, исходя из допущения, что точечный отражатель находится в дальней зоне ПЭП, общая формула упрощается с использованием метода перевала [9]. В результате получается приближенная, но доступная для анализа и простого расчета формула. В настоящей работе вычисление эхосигнала по (10) происходит численным методом при разбиении пластины излучателя S_i и приемника S_r на элементарные площадки. Таким образом, при формировании матрицы G_z расчет $s(t, z_i)$ можно проводить по (10).

Метод максимальной энтропии

Запись прямой задачи в виде (4) позволяет перейти к поиску оценки $\hat{\varepsilon}$ по измеренным эхосигналам \mathbf{p} методом наименьших квадратов путем минимизации невязки:

$$\chi^2(\hat{\varepsilon}) = \|\mathbf{G}\hat{\varepsilon} - \mathbf{p}\|^2 \rightarrow \min. \quad (11)$$

Восстановленную оценку $\hat{\varepsilon}$ можно записать в виде

$$\hat{\varepsilon} = \arg \min_{\hat{\varepsilon} \in R^{N_i, x, N_i, z}} (\chi^2(\hat{\varepsilon})). \quad (12)$$

Дальнейшее развитие подхода состоит в регуляризации по А.Н. Тихонову [10] процедуры обращения с добавлением штрафного функционала в виде максимальной энтропии. Для этого к критерию невязки решения добавляется функционал в виде так называемой кросс-энтропии [11]:

$$H(\varepsilon_i) = - \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \ln \left(\frac{\varepsilon_i}{e\mu} \right), \quad (13)$$

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:

$$\|\mathbf{G}\hat{\varepsilon} - \mathbf{p}\|^2 - \alpha H(\hat{\varepsilon}) \rightarrow \min, \quad (14)$$

где α — параметр регуляризации, контролирующий вклад стабилизатора $H(\hat{\varepsilon})$ в минимизацию нормы невязки $\chi^2(\hat{\varepsilon})$.

Для поиска оптимального параметра регуляризации использовался метод L -кривой [7], суть которого заключается в вычислении для набора значений параметра регуляризации α в координатах $\{\lg \|\mathbf{G}\hat{\varepsilon} - \mathbf{p}\|, \lg H(\hat{\varepsilon})\}$ и поиске точки с максимальной кривизной [9, 12].

Численные эксперименты

Проверка расчета эхосигнала для одного ПЭП

Для проверки правильности расчета эхосигнала по (10) проведен сравнительный анализ с эхосигналами, рассчитанными программой CIVA (CEA List, Франция) [13], предназначенной для моделирования результатов неразрушающего, в частности, ультразвукового контроля.

Поскольку расчет отраженного поля по (10) позволяет рассчитывать эхосигнал для различных положений точечного отражателя, то для проверки алгоритма проведены следующие расчеты. Пьезопреобразователь (диаметр пьезопластины — 4 мм, частота — 5 МГц, призма со стрелой — 6,0 мм, пробег — 4,0 мм с углом ввода 60°) расположен на поверхности объекта контроля (ОК). Материал объекта толщиной 59,0 мм имеет продольную и поперечную скорости звука равные (5,9; 3,23) мм/мкс и плотность 7,8 г/см³.

Эхосигналы от точечного отражателя на глубине 15 мм от поверхности ОК показаны на рис. 2. Результаты моделирования показаны в двух положениях ПЭП (–61,0; –11,0) мм. Черным цветом даны эхосигналы, рассчитанные по (10), а красным цветом — в программе CIVA. Видно, что из-за конечных размеров пьезоэлемента форма эхосигналов меняется в положениях ПЭП, отличных от тех, когда отражатель находится на акустической оси преобразователя, особенно это заметно в крайних положениях. Импульс от отражателя на глубине 15 мм на пересечении акустических осей преобразователей практически совпадает с зондирующим импульсом $s(t)$. На акустической оси преобразователя разница между эхосигналами, полученными программой CIVA и по (10), различаются менее чем на 5% (рис. 2, б). Таким образом, можно утверждать, что расчет эхосигнала по (10) хорошо совпадает с результатами расчета сертифицированной программы.

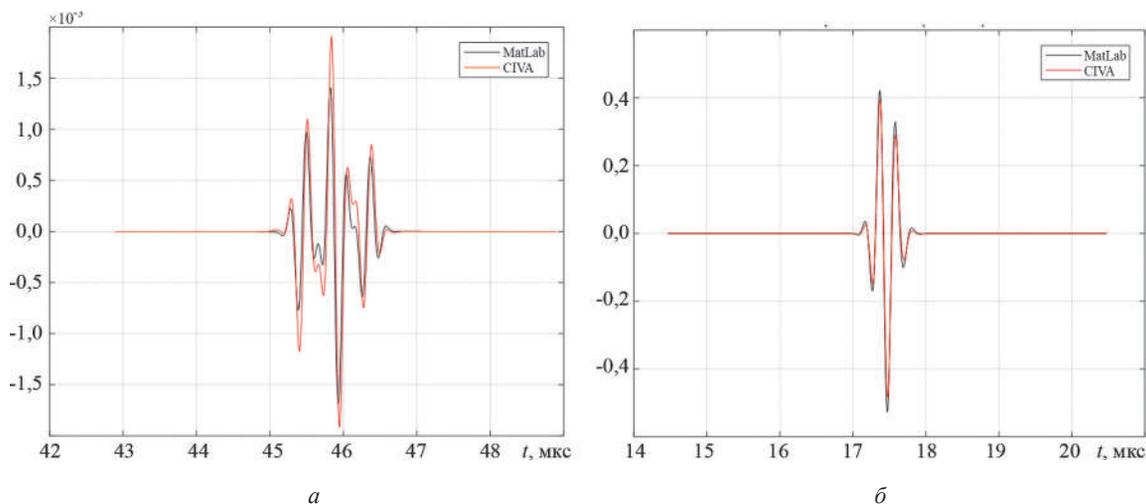


Рис. 2. Эхосигналы $p(t)$ от точечного отражателя при различных положениях ПЭП:

a — 61,0 мм; b — 11,0 мм

Восстановление изображения отражателей методом максимальной энтропии

На рисунке 3 изображен рассчитанный эхосигнал $p(t)$ от шести точечных отражателей $b = 120$ мм. В объекте контроля находятся три пары отражателей, имитирующих трещины высотой 5 мм, находящихся на глубинах (2,5; 7,5), (22,5; 27,5), (42,5; 47,5). Положение отражателей дано на рис. 1 цифрами от 1 до 6. Импульсы головной волны и однократно отраженный от дна образца не рассчитывались. Эхосигналы от второй и третьей пары разрешаются и имеют разность фазы 180° . Эхосигналы от первой пары отражателей не разрешаются, поскольку на малых глубинах $t_{del}(z_i)$ меняется слабо. Амплитуды импульсов от отражателей из-за расхождения ультразвукового пучка разные.

На рисунке 4, a представлен результат оценок $\hat{\epsilon}_{MЭ}(z_i)$ по (14) (график черного цвета) и $\hat{\epsilon}_{C-SAFT}(z_i)$ по (6) (график красного цвета) с использованием матрицы \mathbf{G}_z . Оценка $\hat{\epsilon}_{C-SAFT}(z_i)$ не отличается от формы $p(t)$, за исключением нелинейного преобразования масштаба в соответствии с $t_{del}(z_i)$, а вот $\hat{\epsilon}_{MЭ}(z_i)$ имеет разрешающую способность, превышающую более чем в пять раз, что позволяет разрешить отражатели 1 и 2. Амплитуда

отражателя 1 достаточно низкая. При идеальном восстановлении значения коэффициента отражения $\hat{\epsilon}_{MЭ}(z_i)$ в рассматриваемом примере должны быть равны 1 или -1 . На рис. 4, b показан результат оценок $\hat{\epsilon}_{C-SAFT}(z_i)$ и $\hat{\epsilon}_{MЭ}(z_i)$, при формировании матрицы \mathbf{G} с учетом формы эхосигнала $p(z_p, t)$, рассчитанного для глубины 45 мм. Это привело к тому, что изображения третьей пары отражателей практически идентичны показанным на рис. 4, а у изображения отражателей второй пары появились «боковые лепестки» порядка 40% от размаха всего эхосигнала.

Модельный эксперимент

В качестве примера, демонстрирующего влияние формы эхосигнала, приведем случай практического применения метода МЭ. Объектом контроля выступает пластина толщиной 25 мм с пазами на верхней и нижней поверхностях высотой 2,5 и 1,25 мм. Между ПЭПами (диаметр пьезопластины — 6 мм, частота — 5 МГц, угол ввода 70°) расстояние $b = 18$ мм.

Эхосигнал с импульсами головной волны и однократно отраженного от дна представлен на рис. 5. Видно, что передние фронты двух эхосигналов совпадают,

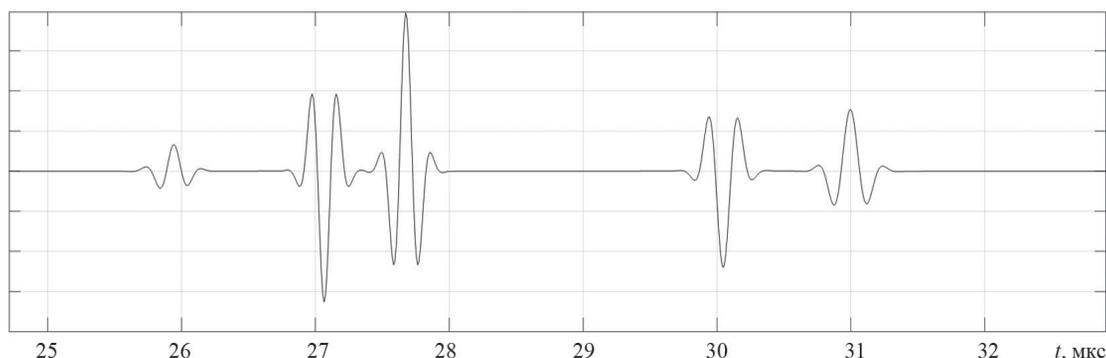


Рис. 3. Рассчитанные TOFD-эхосигналы $p(t)$

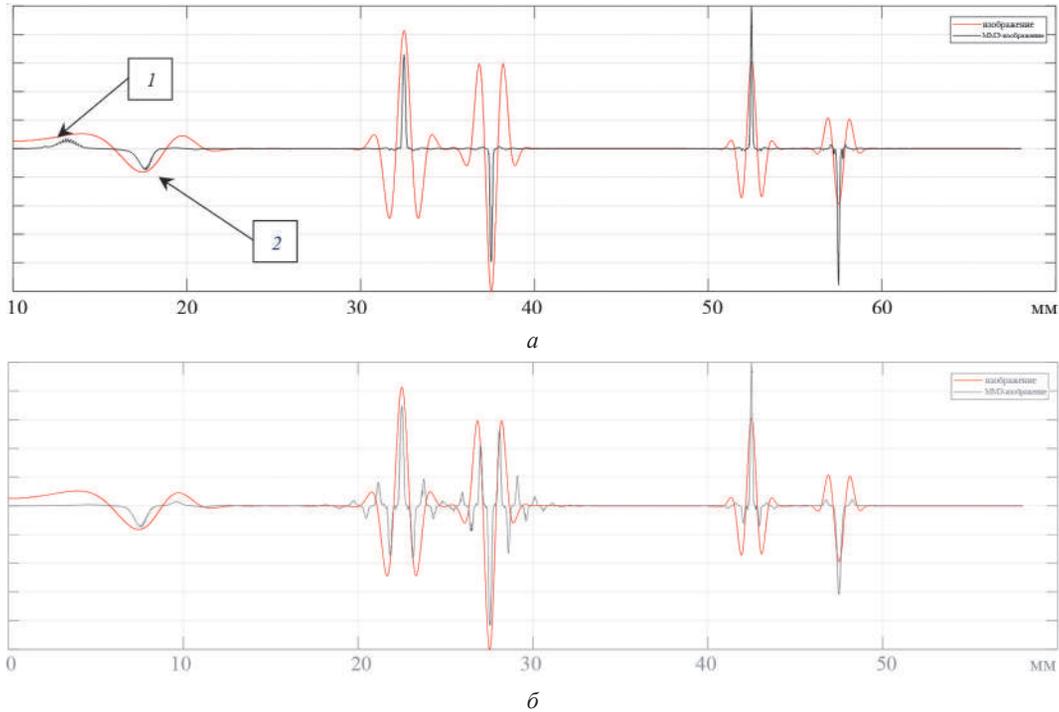


Рис. 4. Оценка изображения отражателей $\hat{\epsilon}_{\text{MЭ}}(z_i)$ и $\hat{\epsilon}_{\text{C-SAFT}}(z_i)$ по TOFD-эхосигналам с использованием \mathbf{G}_z (а) и \mathbf{G} (б)

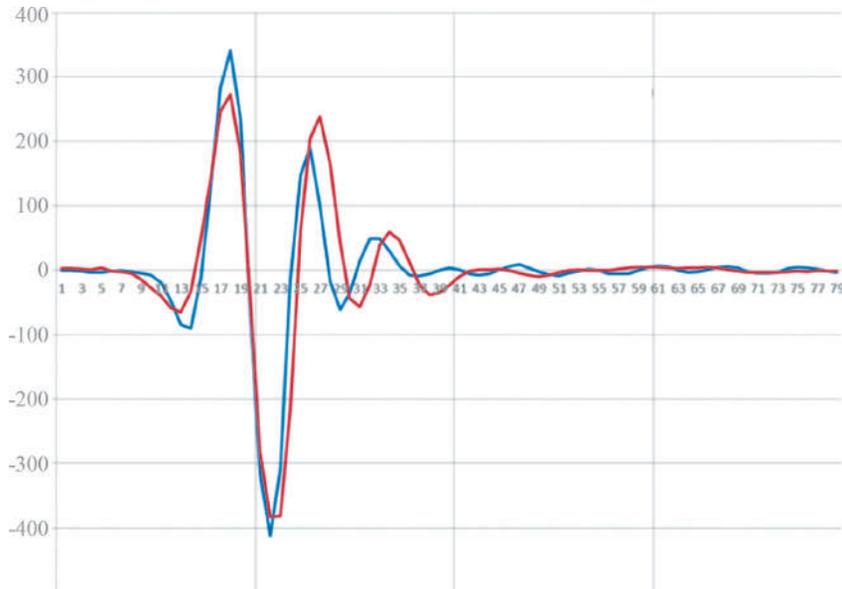


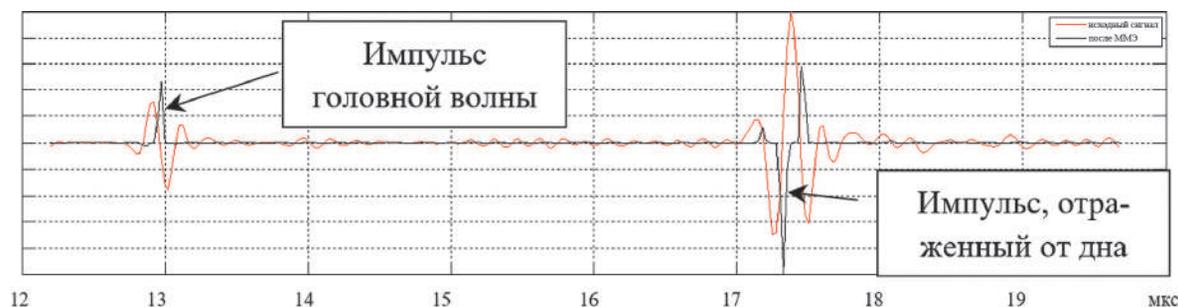
Рис. 5. Импульсы головной волны (—) и однократно отраженного от дна (—)

а длительность заднего фронта импульса, однократно отраженного от дна, оказалась больше заднего фронта импульса головной волны.

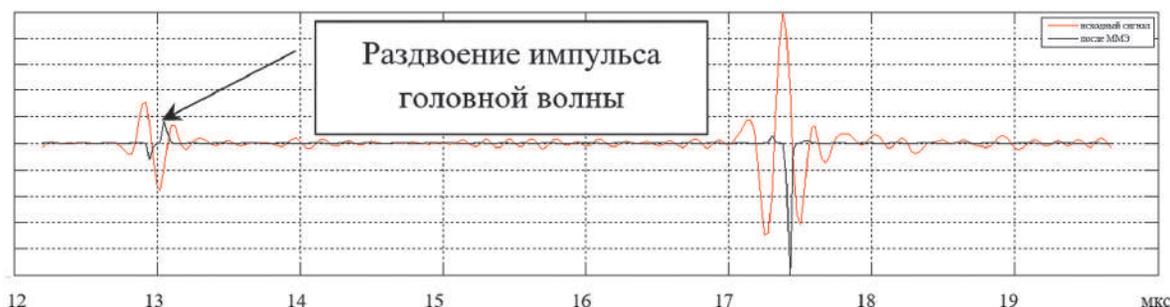
Изменение формы импульса приводит к тому, что результат применения метода МЭ заметно отличается в зависимости от того, какая матрица \mathbf{G} или \mathbf{G}_z используется. Если в качестве эталонного сигнала взять полученный из эхосигнала головной волны (линия синего цвета на рис. 5), то это приводит к тому, что импульс головной волны сжимается «идеально», а импульс однократно отраженной от дна образца после приме-

нения ММЭ раздваивается (рис. 6, а). Если в качестве эталонного сигнала использовать эхосигнал, однократно отраженный от дна, то после обработки методом МЭ импульс головной волны раздваивается, а сигнал, однократно отраженный от дна объекта контроля, отлично сжимается алгоритмом обработки (рис. 6, б).

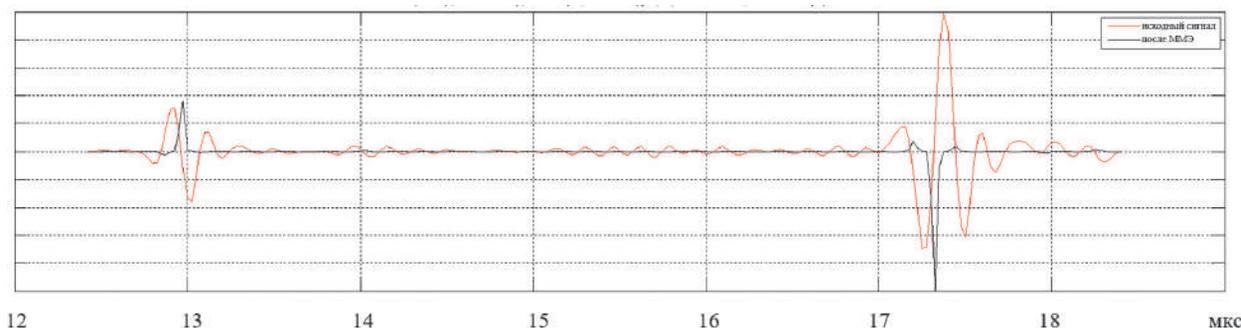
Результат применения метода МЭ при формировании матрицы \mathbf{G}_z показан на рис. 7. Видно, что в отличие от изображений на рис. 6 импульсы головной волны и однократно отраженный от дна сузились более чем в



а



б

Рис. 6. Результат применения ММЭ. Матрица G сформирована импульсами головной волны (а) и отраженным от дна (б)Рис. 7. Результат применения ММЭ при формировании матрицы G_2 с учетом изменения формы эхосигналов

пять раз с минимальным уровнем ложных импульсов и находятся в противофазе.

B -скан исходного эхосигнала (рис. 8, а) после применения МЭ изображен на рис. 8, б (постоянный эталонный импульс) и рис. 8, в (переменный эталонный импульс). В отличие от данных рис. 8, б на рис. 8, в уровень ложных импульсов на глубинах, соответствующих дну образца, уменьшился, и это позволило обнаружить эхосигнал от вершины придонного паза высотой 1,25 мм, однократно отраженный от дна. Хорошо видно, что данные эхосигналы находятся в противофазе.

Заключение

Численные и модельные эксперименты показали, что для эффективного применения метода максимальной энтропии для обработки эхосигналов, измеренных в режиме TOFD, важен учет фактора изменения формы импульсов от отражателей на разных глубинах. Модифицированный метод МЭ, учитывающий переменную форму эхосигнала в матрице G_2 , повысил разрешающую способность изображения отражателей более чем в три раза. Это позволит надежнее определять противофазные эхосигналы от верхнего и нижнего краев трещины и точнее измерять ее высоту.

фицированный метод МЭ, учитывающий переменную форму эхосигнала в матрице G_2 , повысил разрешающую способность изображения отражателей более чем в три раза. Это позволит надежнее определять противофазные эхосигналы от верхнего и нижнего краев трещины и точнее измерять ее высоту.

Литература

1. ISO 16828:2012. Неразрушающий контроль. Ультразвуковой контроль. Времяпролетный дифракционный метод в качестве метода обнаружения и определения размера несплошностей.
2. Darmon M., Ferrand A., Dorval V., Chatillon S. Recent Modelling Advances for Ultrasonic TOFD Inspections // Rev. Prog. Quant. Nondestruct. Eval. 2015. V. 34. Pp. 1757—1765.
3. Базулин Е.Г. О возможности использования в ультразвуковом неразрушающем контроле метода

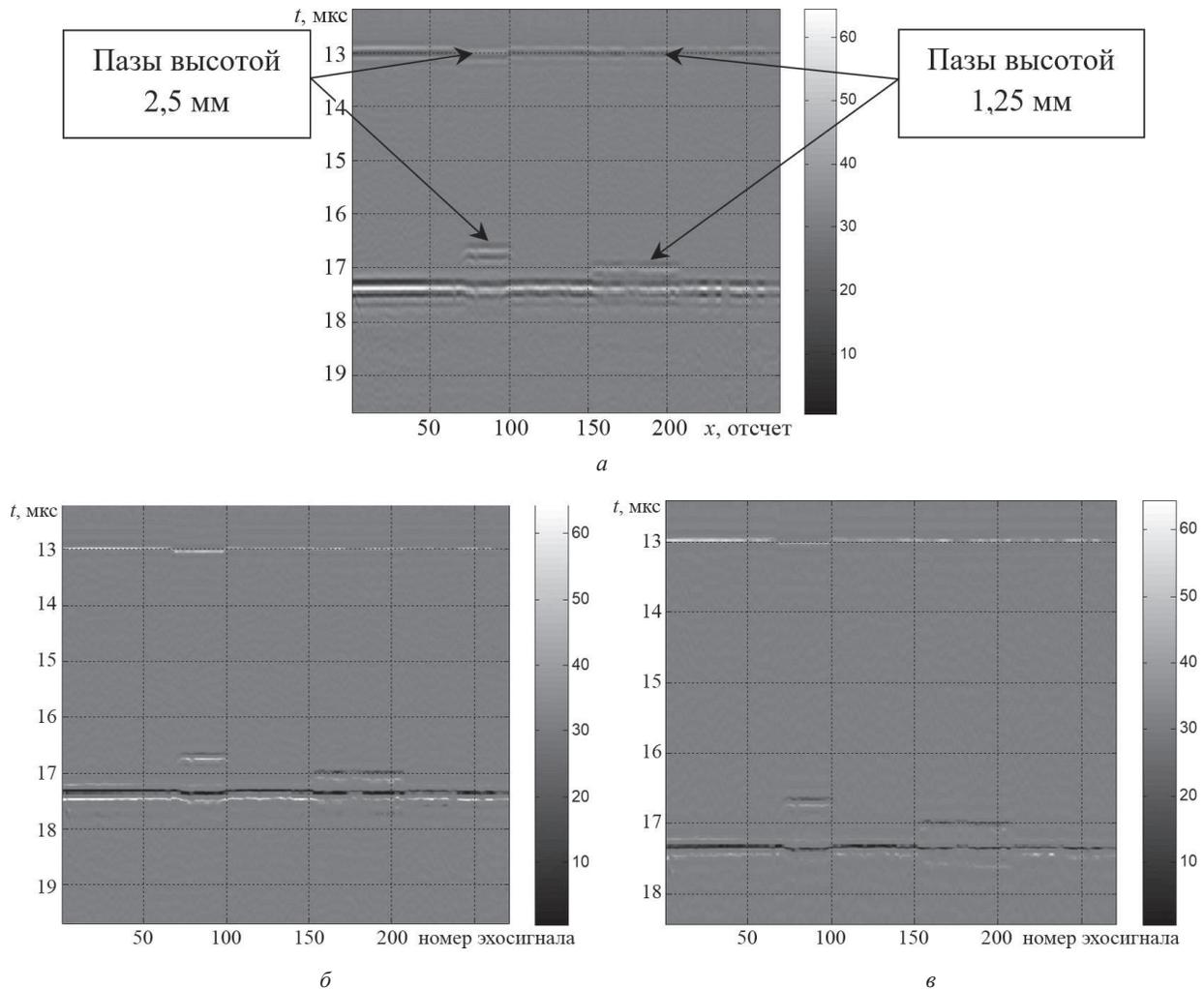


Рис. 8. Результат обработки исходных эхосигналов (а) методом МЭ без учета изменения (б) и с учетом изменения формы эхосигналов (в)

максимальной энтропии для получения изображения рассеивателей по набору эхосигналов // *Акустический журнал*. 2013. Т. 59. № 2. С. 235—254.

4. **Ковалев А.В. и др.** Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // *Дефектоскопия*. 1990. № 2. С. 29—41.

5. **Lingvall F.** Time-domain Reconstruction Methods for Ultrasonic Array Imaging: A Statistical Approach. Uppsala: Uppsala University, 2004.

6. **Schmerr Jr., Lester W.** Fundamentals of Ultrasonic Phased Arrays. Springer, 2015.

7. **Hansen P.C.** The L -curve and Its Use in the Numerical Treatment of Inverse Problems // *Computational Inverse Problems in Electrocardiology*. Southampton: WIT Press, 2001. Pp. 119—142.

8. **Данилов В.Н.** О диаграмме направленности наклонного преобразователя в режиме приема // *Дефектоскопия*. 2011. № 4. С. 33—49.

9. **Левин М.Н., Тагаринцев А.В., Ахкубеков А.Э.** Метод Laplace-DLTS с выбором параметра регуляризации по L -кривой // *ФТП*. 2009. Т. 43. Вып. 5. С. 613—616.

10. **Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.** Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986.

11. **Kullback S.** Information Theory and Statistics. N.-Y.: Dover Publ., 1968.

12. **Сумин М.И.** Метод регуляризации А.Н. Тихонова для решения оптимизационных задач. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского гос. ун-та, 2016.

13. **Extende CIVA** [Официальный сайт] <http://www.extende.com/fr> (дата обращения 20.02.2018).

References

1. **ISO 16828:2012.** Nerazrushayushchiy Kontrol'. Ul'trazvukovoy Kontrol'. Vremyaproyetnyy Difraktsionnyy Metod v Kachestve Metoda Obnaruzheniya i Opredeleniya Razmera Nesploshnostey. (in Russian).

2. **Darmon M., Ferrand A., Dorval V., Chatillon S.** Recent Modelling Advances for Ultrasonic TOFD Inspections. *Rev. Prog. Quant. Nondestruct. Eval.* 2015;34: 1757—1765.

3. **Bazulin E.G.** О Возможности Испол'зования в Ul'trazvukovom Nerazrushayushchem Kontrole Metoda

Maksimal'noy Entropii dlya Polucheniya Izobrazheniya Rasseivateley po Naboru Ekhsignalov. Akusticheskiy Zhurnal. 2013;59;2:235—254. (in Russian).

4. **Kovalev A.V. i dr.** Impul'snyy Ekho-metod pri Kontrole Betona. Pomekhi i Prostranstvennaya Seleksiya. Defektoskopiya. 1990;2:29—41. (in Russian).

5. **Lingvall F.** Time-domain Reconstruction Methods for Ultrasonic Array Imaging: A Statistical Approach. Uppsala: Uppsala University, 2004.

6. **Schmerr Jr., Lester W.** Fundamentals of Ultrasonic Phased Arrays. Springer, 2015.

7. **Hansen P.C.** The L -curve and Its Use in the Numerical Treatment of Inverse Problems. Computational Inverse Problems in Electrocardiology. Southampton: WIT Press, 2001:119—142.

8. **Danilov V.N.** O Diagramme Napravlenosti Naklonnogo Preobrazovatelya v Rezhime Priema. Defektoskopiya. 2011;4:33—49. (in Russian).

9. **Levin M.N., Tatarintsev A.V., Akhkubekov A.E.** Metod Laplace-DLTS s Vyborom Parametra Regularizatsii po L -krivoy. FTP. 2009;43;5: 613—616. (in Russian).

10. **Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya.** Metody Resheniya Nekorrektnykh Zadach. M.: Nauka, 1986. (in Russian).

11. **Kullback S.** Information Theory and Statistics. N.-Y.: Dover Publ., 1968.

12. **Sumin M.I.** Metod Regularizatsii A.N. Tikhonova dlya Resheniya Optimizatsionnykh Zadach. Nizhniy Novgorod: Izd-vo Nizhegorodskogo Gos. Un-ta, 2016. (in Russian).

13. **Extende CIVA** [Ofits. Sayt] <http://www.extende.com/fr> (Data Obrashcheniya 20.02.2018).

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

Вовк Антон Сергеевич — студент кафедры электротехники и интроскопии НИУ «МЭИ», e-mail: anton.s.v@mail.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

Vovk Anton S. — Student of Electrical Engineering and Introscopy Dept., NRU MPEI, e-mail: anton.s.v@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10.12.2017