

УЛУЧШЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ РАЗРЕЖЕННОЙ ДЕКОНВОЛЮЦИИ И ДЕКОМПОЗИЦИИ НА ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЫ

© 2020 г. Бенаммар Абдессалем ^{1,*}, Чибане Фарид^{1,2}

¹ Научно-исследовательский центр промышленных технологий ЦНТИ, п/я 64, Шерага 16014, Алжир,

² Университет Бумердес, Алжир

E-mail: *Abs_benammar@yahoo.fr; a.benammar@crti.dz

Поступила в редакцию 23.11.2019; после доработки 13.12.2019

Принята к публикации 17.04.2020

За последние несколько лет стремительно возросло использование ультразвуковых решеток в неразрушающем контроле, что привело к использованию новых алгоритмов для обработки сигналов. Основной целью данной статьи являются улучшение разрешающей способности контроля дефектов и разработка процедуры контроля настолько быстрой и точной, насколько это возможно. Статья представляет новый метод для улучшения разрешающую способность ультразвуковых фазированных решеток (ФР). Предложенный метод основан на вариационной декомпозиции сигналов и на методе деконволюции. Чтобы снизить уровень шума сигналов используется метод, основанный на декомпозиции на вариационные моды (ДВМ), а для улучшения разрешающей способности — оптимизированный алгоритм разреженной деконволюции с применением метода мажоризации—минимизации. Модельное исследование проводили на образце из нержавеющей стали, который содержал несколько дефектов. Полученные результаты показывают, что предложенный метод может улучшить качество данных ультразвукового контроля, что, в свою очередь, улучшает локализацию дефектов.

Ключевые слова: ультразвуковая фазированная решетка, декомпозиция на эмпирические моды, декомпозиция на вариационные моды, разреженная деконволюция, ММ-алгоритм.

DOI: 10.31857/S0130308220060020

1. ВВЕДЕНИЕ

В течение последних нескольких лет ультразвуковой контроль (УЗК) с помощью ФР происходит в автоматическом режиме, и процедура контроля может выполняться множество раз без необходимости перенастройки оборудования, которое охватывает большую площадь контроля [1]. ФР имеют множество преимуществ над совмещенными преобразователями с точки зрения чувствительности и процедуры контроля [2]. Несмотря на все эти плюсы, изображения, полученные с помощью оборудования на ФР, имеют низкое разрешение, что предполагает использование новых алгоритмов для улучшения качества изображений [2—4]. Часто при ультразвуковом контроле с фазированными решетками (УЗКФР) дефектоскописты используют изображения В-скана, которые состоят из нескольких просуммированных А-сканов. В наши дни разрешение А-сканов может быть значительно улучшено с использованием алгоритмов и методик обработки сигналов, что является целью множества исследований в течение последних десяти лет [1, 4, 5].

Получаемые А-сканы содержат полезную информацию, включая амплитуду и временные задержки, которые могут использоваться для количественной оценки размера и глубины дефектов [6]. Тем не менее процедура УЗК некоторых материалов, таких как нержавеющая сталь, ухудшается из-за ее крупной зеренной структуры, наличие которой приводит к повышенному поглощению и рассеянию. Контроль дефектов в таких материалах затруднителен при анализе амплитудно-временной зависимости, поскольку на амплитуду эха от дефектов влияют такие факторы, как размер зерна и частота возбуждаемой УЗ-волны. Чтобы провести качественный контроль дефектов рекомендуется проводить предварительную обработку для повышения качества сигналов. Во многих методах предполагается улучшение отношения сигнал/шум (ОСШ).

Широко используется метод адаптивного разделения спектра (АРС) [7]. Как альтернатива АРС, такие методы частотно-временного анализа, как оконное преобразование Фурье (ОПФ), вейвлет-преобразование (ВП) и S-преобразование, предложены для оценки сигналов в объединенном частотно-временном анализе [8—10]. Основа этих частотно-временных методов анализа состоит в том, чтобы извлечь разнесенную по частоте важную информацию, которая может использоваться для распознавания помех и экосигналов от дефектов в приложениях УЗК. Однако очень важной задачей является получение основы преобразования общего вида, которое адаптируется к нестационарным и интерферирующим узкополосным, широкополосным и дисперсионным экосигналам, искаженным шумами [11].

Кроме классических методов на основе частотно-временных зависимостей, для анализа сигналов использовалась методика декомпозиции на эмпирические моды (ДЭМ), предложенная Huang et al. [11, 12]. Принцип этого алгоритма заключается в том, что анализируются нелинейные и нестационарные сигналы. Данный алгоритм может разложить любой сигнал на колебательные компоненты, называемыми эмпирическими модами (ЭМ). В некоторых случаях разложение сильно зависит от методов поиска экстремума, интерполяция точек экстремумов в огибающую, критерия остановки. Отсутствие математической теории и степеней свободы, снижающие устойчивость алгоритма ЭМД, привели к теоретическому развитию и улучшению устойчивости разложения. В некоторых экспериментах было показано, что ЭМД имеет важные сходства с вейвлетами и банками фильтров [13].

Недавно Dragomiretskiy и Zosso [14] предложили новый нерекурсивный алгоритм ВМД. В отличие от ЭМД, эта модель способна точно разделить любую пару гармоник, в основном, независимо от их относительных амплитуд и от того, насколько близки их частоты. Таким образом, ВМД подходит для устранения шума в нелинейных и нестационарных сигналах [14].

В качестве альтернативы методам декомпозиции и их способности улучшать качество сигнала в области неразрушающего контроля (НК) разреженная деконволюция широко используется для улучшения разрешения по времени. Деконволюция — это численный процесс, целью которого является компенсация физических ограничений измерительного прибора. Это старая проблема, которая была предметом многих исследований. Несмотря на это, она все еще широко изучается сегодня, поскольку задача не допускает единственного решения [15]. Целью различных методов деконволюции является создание решения, которое является физически приемлемым и численно устойчивым. Если цель всех методов схожа, используемые теоретические концепции и разработанные алгоритмы чрезвычайно разнообразны. Не существует универсального метода деконволюции, который превосходил бы все остальные. Трудно сравнить результаты работы различных методов деконволюции, потому что явные или неявные предположения, характерные для каждого алгоритма, делают оценки лучше для одних классов сигналов и менее хорошо для других. Для решения этих задач был использован ряд алгоритмов, таких как фильтр Винера, процесс Бернулли—Гаусса [16], согласованное преследование (СП) [17] и другие.

Во многих практических приложениях неразрушающего контроля количество дефектов в контролируемой части и, как правило, их распределение можно считать разреженным, следовательно, применялась разреженная деконволюция [3, 18]. Норма L_1 в основном используется для минимизации функции потерь в разреженной деконволюции. В последнее время автор [19] предлагает эффективный итерационный алгоритм (с точки зрения вычислений) для разреженной деконволюции, полученный с использованием ММ-метода оптимизации.

Эта статья посвящена улучшению разрешения изображений В-сканов и УЗК дефектов методами разреженной деконволюции и алгоритма ВМД. Остальная часть статьи структурирована следующим образом: раздел 2 посвящен описанию принципов предлагаемых алгоритмов, таких как ЭМД, ВМД, разреженная деконволюция и сам предложенный алгоритм; в разделе 3.1 представлены результаты, полученные при применении предложенных алгоритмов на смоделированных данных; в разделе 3.2 представлены экспериментальные результаты на образце из нержавеющей стали; наконец, выводы представлены в разделе 4.

2. ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ

Ультразвуковой сигнал можно рассматривать как выходной параметр линейного фильтра. Общее уравнение, связывающее шум на входе и результат применения линейного фильтра для выходного импульсного сигнала $h(t)$, описывается следующим образом [20]:

$$y(t) = h(t) \cdot r(t) + w(t). \quad (1)$$

Конкретный пример для ультразвуковых сигналов (рис. 1): выходной сигнал фильтра $y(t)$ представляет собой сигнал А-скана, измеренный для данной координаты преобразователя. Выходной импульсный сигнал системы $h(t)$ представляет собой падающую волну. Она обычно измеряется на плоском отражателе. Входной сигнал системы представляет собой функцию, называемую коэффициентом отражения $r(t)$, которая в основном учитывает параметры, характерные для материала, но может также дополняться явлением дифракции. Величина $w(t)$ представляет собой аддитивный шум, подразумевающий под собой не только помехи при измерении, но и ошибки при моделировании.

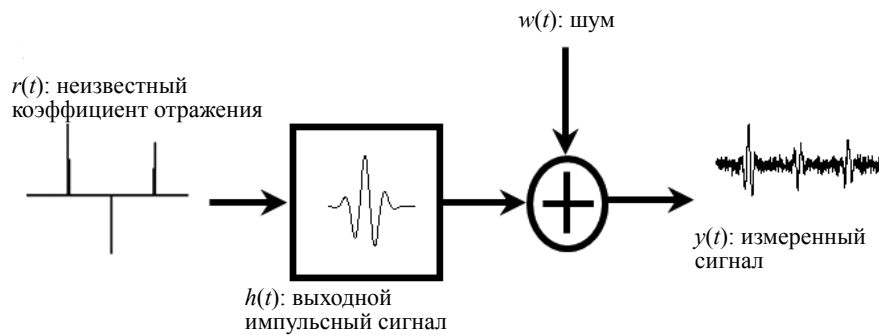


Рис. 1. Моделирование ультразвукового сигнала.

С физической точки зрения может показаться более естественным рассматривать волну, излучаемую ультразвуковым преобразователем как входной сигнал, а коэффициент отражения от среды, в которой волна распространяется, в качестве фильтра. Тем не менее, поскольку неизвестная величина является функцией коэффициента отражения, обычно предпочтительно возвращать ее к задаче деконволюции, используя коммутативность свертки. Даже когда выходной импульсный сигнал системы полностью известен, деконволюция является сложной задачей, потому что она относится к классу плохо обусловленных задач.

2.1. Декомпозиция на эмпирические моды

Метод ДЭМ разбивает сигнал на обычно небольшое количество ЭМ [12]:

$$y(t) = \sum_{k=1}^N IMF_k(t) + r(t), \quad (2)$$

где $r(t)$ — остаток от восстановления сигнала; $IMF_k(t)$ — k -я функция ЭМ. Чтобы рассматриваться в виде ЭМ, сигнал должен удовлетворять двум условиям: (1) число экстремумов (максимумов и минимумов) и количество пересечений нуля должно быть равным или отличаться не более чем на единицу; (2) среднее значение верхней и нижней огибающей везде равно нулю.

2.2. Декомпозиция на вариационные моды

Метод ДВМ может разложить любой сигнал $y(t)$ на компоненты k -моды, где требуется, чтобы каждая мода (подсигналы) u_k была в основном компактной вокруг центральной частоты ω_k , определенной вместе с разложением [14]. В алгоритме ДВМ ЭМ переопределяется как амплитудно-модулированный-частотно-модулированный (АМ-ЧМ) сигнал

$$u_k(t) = A_k(t) \cos(\phi_k(t)), \quad (3)$$

где $A_k(t)$ и $\omega_k(t)$ — мгновенная амплитуда и мгновенная частота функции $u_k(t)$, $\omega_k(t) = d\phi(t)/dt$.

Процесс разложения сигнала осуществляется путем поиска оптимального решения ограниченной вариационной модели. Каждая ЭМ имеет компактный носитель вокруг центральной частоты, и она фиксируется с помощью ограниченной полосы пропускания вокруг ее характерных центральных частот. Центр частоты и ширина полосы каждого компонента постоянно итеративно обновляются при решении по вариационным модам. Затем в соответствии с характеристиками частотной области реального сигнала можно выполнить адаптивное разложение полосы сигнала, и мы получим ряд узкополосных компонентов ЭМ [21]. Оценка ширины полосы моды требует:

1. Вычисление аналитического сигнала, связанного с u_k , с помощью преобразования Гильберта для получения одностороннего спектра частоты.

2. Спектр частоты каждой моды смещается в основную полосу перемножением на экспоненту, настроенной на соответствующую расчетную центральную частоту.

3. Ширина полосы модовой компоненты оценивается через размытие по Гауссу H_1 демодулированного сигнала; например, квадратичная L_2 -норма градиента.

Тогда ограниченная вариационная задача для нахождения всех мод, полученных с помощью описанной выше процедуры, определяется как

$$\min_{u_k, \omega_k} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \quad (4)$$

при условии $\sum_k u_k = y$,

где y обозначает сигнал для разложения; $\{u_k\} := \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$ — k -я мода; $\{\omega_k\} := \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k\}$ — центральная частота k -й моды; δ — распределение Дирака; t — время; k — количество мод; $*$ обозначает свертку. Более высокие значения k соответствуют модам с компонентами более низкой частоты.

2.3. Разреженная деконволюция

Дискретизация ультразвукового сигнала, описанная в уравнении (1), может быть выражена как

$$y(k) = h(k) * r(k) + w(k), \quad (5)$$

где $*$ обозначает свертку.

Здесь мы полагаем, что линейная стационарная система может быть описана рекурсивным разностным уравнением [6, 19]:

$$y(n) = \sum_k b(k)r(n-k) - \sum_k a(k)y(n-k). \quad (6)$$

Можно записать уравнение (6) в матричной форме:

$$Ay = Br, \quad (7)$$

где A и B — полосовые матрицы [9].

Из (7) выходное значение y системы может быть записано как

$$y = A^{-1}Br = Hr, \quad (8)$$

где матрица системы

$$H = A^{-1}B. \quad (9)$$

Обратите внимание, что если A и B являются полосовыми матрицами, то H не является (инверсия полосовой матрицы в общем случае не полосовая). Модель данных (5) записывается в матричной форме как [19]

$$y = Hr + w. \quad (10)$$

Чтобы оценить коэффициент отражения $r(n)$ по измеренному ультразвуковому сигналу $y(n)$, рассмотрим задачу оптимизации

$$F(r) = \arg \min_r \frac{1}{2} \|y - Hr\|_2^2 + \lambda \|r\|_1, \quad (11)$$

где λ — параметр регуляризации, который следует выбирать в соответствии с уровнем шума.

Задача оптимизации (11) не может быть решена прямо. Однако используется алгоритм, описанный в [9]. На практике этот алгоритм сходится в несколько итераций и эффективен с точки зрения вычислительный. Он основан на ММ-методе оптимизации. Можно обобщить алгоритм разреженной деконволюции в следующие шаги [6, 19, 21].

Шаг 1. Вход: сигнал А-скана $y(t)$, λ , Nit (число итераций), коэффициенты фильтра (b , a) для линейной стационарной системы свертки H (матрицы A и B).

Шаг 2. Инициализация для первой итерации $r = y$.

Шаг 3. Вычислить

$$g \leftarrow B^T \times A^T \times y. \quad (12)$$

Шаг 4. Выполнить итерации (от $k = 1$ до Nit):

$$W_k \leftarrow \frac{1}{\lambda} \text{diag}(|r^{(k)}|), \quad (13)$$

$$r^{(k+1)} \leftarrow W_k \left[g - B^T (AA^T + BW_k B^T)^{-1} BW_k g \right]. \quad (14)$$

Шаг 5. Вывод: получение коэффициента отражения.

2.4. Предлагаемый метод

В предлагаемом способе улучшение разрешения данных УЗК осуществляется с использованием алгоритма ДВМ и разреженной деконволюции. ДВМ может адаптивно раскладывать ультразвуковой сигнал на ряд ЭМ от низких до высоких частот. Частотные составляющие эхосигналов ультразвукового А-скана в основном доступны в первой ЭМ IMF1, а частотные составляющие шума распределены в остальных ЭМ. Фильтрованный ультразвуковой сигнал А-скана, полученный с ДВМ, используется в качестве входных данных для алгоритма итеративной деконволюции для получения А-скана с высоким разрешением. Если $y(t)$ — данные сигнала А-скана, мы можем описать наш метод следующими шагами.

Шаг 1. Начать с зашумленного сигнала А-скана $y(t)$, содержащего несколько эхосигналов в качестве входных данных.

Шаг 2. Разложить сигнал $y(t)$ А-скана с ДМВ и сохранить IMF1.

Шаг 3. Применить алгоритм разреженной деконволюции к полученной IMF1.

Шаг 4. Найти и локализовать основное эхо (эхо с амплитудой Max) и сохранить его координату.

Шаг 5. Выделить локализованный эхосигнал окном Гаусса.

Шаг 6. Вычесть локализованный эхосигнал из исходного сигнала.

Шаг 7. Повторять процедуру с шага (4) до (6) и использовать результат в качестве нового сигнала, пока $\text{Max} < \text{Thr}$. Мы получим А-скан с высоким разрешением.

Пороговое значение представляет собой среднее значение зашумленного сигнала А-скана $y(t)$, выражаемое как

$$\text{Thr} = \sum_{t=1}^N |y_i(t)| / N, \quad (15)$$

где N — длина сигнала.

Улучшение разрешения данных В-скана с использованием предлагаемого метода сводится к следующему.

Шаг 1. Изначально на вход алгоритма подаются данные зашумленного В-скана.

Шаг 2. Вычислить ДВМ каждого сигнала А-скана $y_i(t)$.

Шаг 3. Применить алгоритм итеративной разреженной деконволюции к улучшенным сигналам А-сканов.

Шаг 4. Процесс повторяется пока не закончатся А-сканы.

3. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И АНАЛИЗ

3.1. Данные моделирования

Для применения предложенного метода была использована модель сигнала А-скана, смоделированную Demirli и др. [22]. Образец, использованный для моделирования, показан на рис. 2а. Мы смоделировали В-скан образца, показанный на рис. 2б, чтобы воспроизвести реальный случай УЗК.

Сигналы А-скана являются результатом свертки функцией отражательной способности, состоящей из нескольких отражателей, и волны центральной частоты, равной 5 МГц. На рис. 2б показан смоделированный шум (ОСШ = 5 дБ) для В-скана, содержащего несколько дефектов. Рис. 2в и 2г показывают результаты улучшения В-сканов с использованием алгоритмов ДЭМ и ДВМ соответственно.

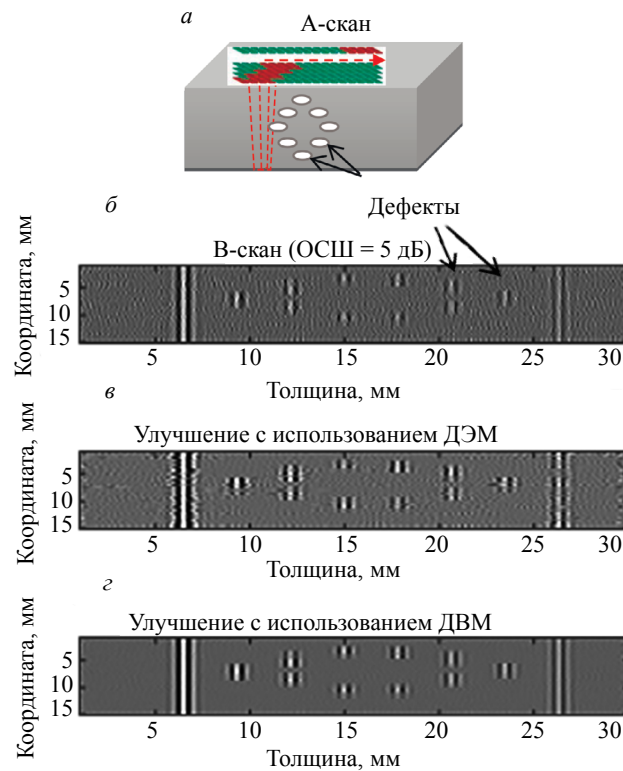


Рис. 2. Образец, используемый для моделирования (а); зашумленный В-скан с дефектами (ОСИ=5дБ) (б); улучшение с использованием ДЭМ (в); улучшение с использованием ДВМ (г).

На рис. 3а показан сигнал А-скана с координатой (8 мм) на В-скане. Рис. 3б и в показывают улучшение сигнала с использованием алгоритмов ДЭМ и ДВМ соответственно. Чтобы сравнить эффективность улучшения сигнала с алгоритмами ДЭМ и ДВМ, мы вычислили ОСИ для различных уровней шума во входном сигнале.

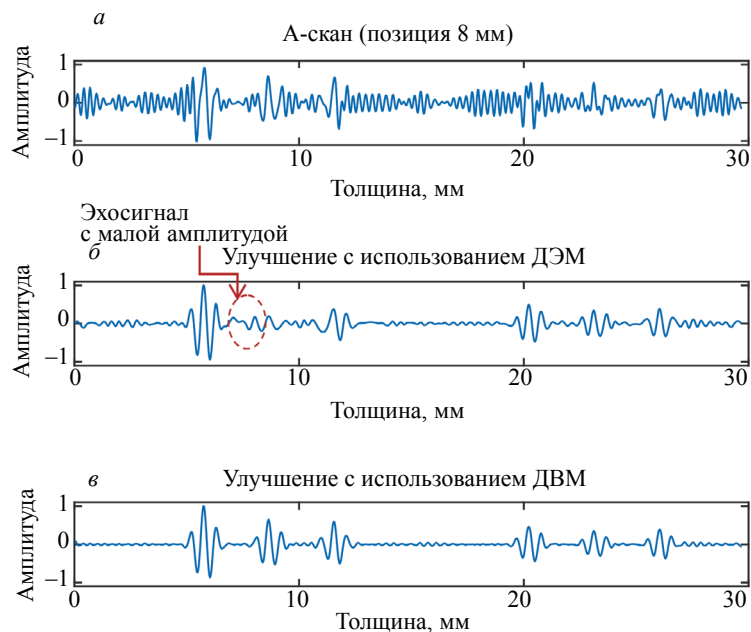


Рис. 3. Исходный А-скан с ОСИ 5дБ (а); улучшение с использованием ДЭМ (б); улучшение с использованием ДВМ (в).

ОСШ оценивалось на основе среднего квадратического (СК) улучшенного сигнала ($СК_{\text{сигн}}$) и СК шума ($СК_{\text{шум}}$) с использованием следующего соотношения [23, 24]:

$$SNR = 20 \log \left(\frac{RMS_{\text{signal}}}{RMS_{\text{noise}}} \right), \quad (16)$$

где SNR — ОСШ, RMS_{signal} — СК_{сигн}, RMS_{noise} — СК_{шум}.

Таблица 1

Улучшение ОСШ при использовании ДЭМ и ДВМ

Уровни шума, дБ	15	10	5	1,5
Улучшение с ДЭМ, дБ	22,51	16,89	13,03	9,95
Улучшение с ДВМ, дБ	35,72	29,11	22,39	15,35

Из результатов, представленных в табл. 1, мы можем видеть, что повышение уровня ОСШ исходного сигнала является значительным при использовании алгоритма ДВМ по сравнению с результатами, полученными с использованием алгоритма ДЭМ.

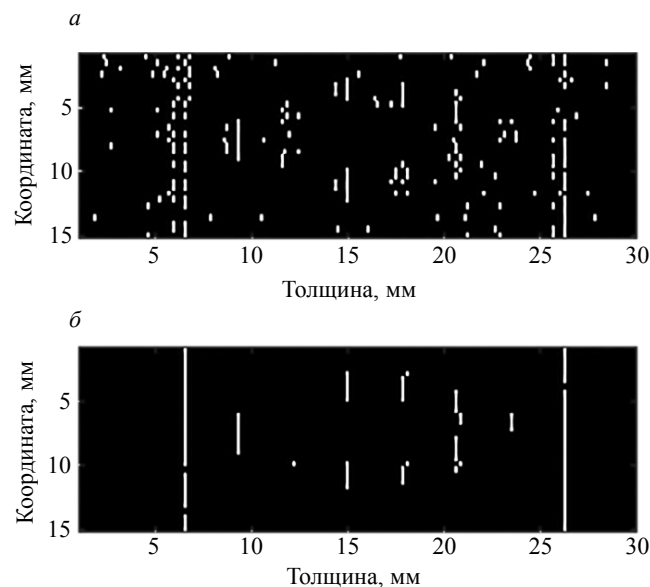


Рис. 4. Результаты применения предложенного метода на улучшенном В-скане: используя ДЭМ (а); используя ДВМ (б).

На рис. 4а показан результат применения предложенного метода для улучшенного В-скана с использованием алгоритма ДЭМ. Можно отметить появление ложных эхосигналов при использовании предложенного метода, основанного на улучшении данных В-скана методе ДЭМ. На рис. 4б показан результат применения предложенного метода улучшенного В-скана с использованием алгоритма ДВМ. Полученный по предлагаемому способу результат, основанный на улучшении ультразвукового В-скана алгоритмом ДВМ, лучше по сравнению с результатом предложенного метода с использованием алгоритма ДЭМ.

3.2. Данные УЗК

Предложенный метод был экспериментально проверен на образце из нержавеющей стали размером 100×50×12 мм. Отверстия диаметром 1,5 мм были просверлены с интервалом от 1,75 до 3,25 мм, как показано на рис. 5, чтобы изучить точность контроля. Скорость звука в этом мате-



Рис. 5. Образец из нержавеющей стали, датчик и геометрия отверстий.

риале $V_{\text{обр}} = 5800$ м/с. Такой случай часто встречается на производстве, когда несколько дефектов присутствуют в одной и той же зоне, на расстоянии нескольких миллиметров друг от друга. Такая геометрия приводит к ультразвуковым сигналам, когда несколько эхосигналов близки во времени. Такая ситуация может ввести в заблуждение дефектоскописта, который может ошибиться при диагностике. Поэтому целью этого эксперимента является показать полезность этого типа обработки сигналов для пользователей в области УЗК.

Ультразвуковые сигналы в этом эксперименте были получены с помощью дефектоскопа OMNISCAN MX компании Olympus. Используемый датчик состоит из 32 линейных пьезоэлементов с центральной частотой 5 МГц. Сигналы А-скана были экспортированы с помощью ПО TOMOVIEW и представлены в виде В-скана.

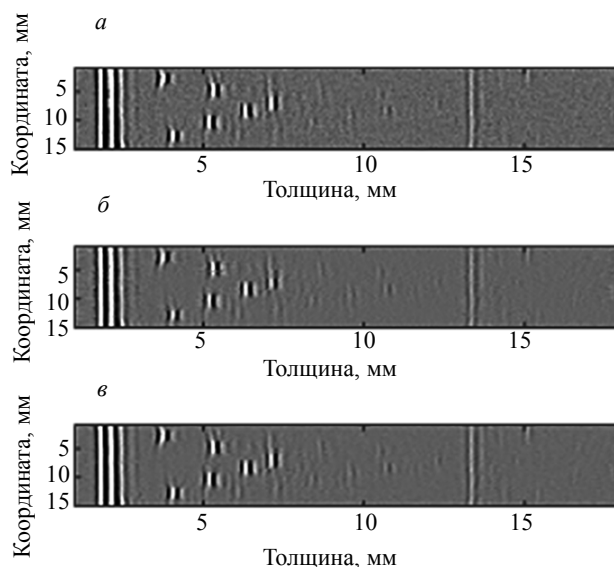


Рис. 6. Экспериментальный В-скан, полученный на образце из нержавеющей стали (а); улучшение с использованием ДЭМ (б); улучшение с использованием ДВМ (в).

На рис. 6а показан В-скан, полученный на образце из нержавеющей стали. На рис. 6б и в представлены результаты улучшения, полученные с использованием алгоритмов ДЭМ и ДВМ соответственно. Чтобы оценить работу алгоритмов, мы рассчитываем ОСШ на входном экспериментальном В-скане и на выходе алгоритмов ДЭМ и ДВМ. Отношение сигнал/шум на входном В-скане составляет $\text{ОСШ}_{\text{вх}} = 11,51$ дБ. ОСШ алгоритма ДЭМ равно $\text{ОСШ}_{\text{ДЭМ}} = 14,12$ дБ, а ОСШ алгоритма ДВМ равно $\text{ОСШ}_{\text{ДВМ}} = 16,73$ дБ. Из результатов видно, что повышение уровня ОСШ исходного

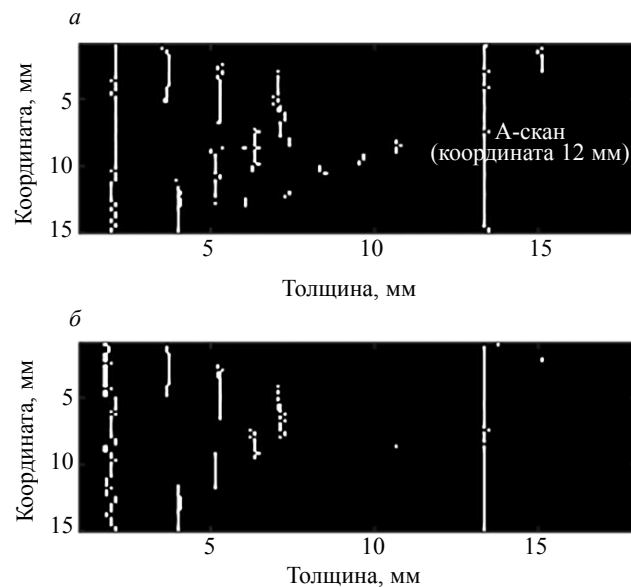


Рис. 7. Предложенный метод с использованием ДЭМ (а); предложенный метод с использованием ДВМ (б).

сигнала является значительным при использовании алгоритма ДВМ по сравнению с результатами, полученными с использованием алгоритма ДЭМ.

На рис. 7а и б представлены результаты применения предложенного метода к экспериментальному В-скану, полученному с использованием алгоритмов ДЭМ и ДВМ соответственно.

Можно отметить, что результат предложенного метода, использующего улучшение алгоритма ДВМ, лучше, чем использование улучшения алгоритма ДЭМ. На рис. 7а видно, что при использовании алгоритма ДЭМ появляется несколько ложных эхосигналов.

На примере А-скана с координатой 12 мм мы можем видеть, что появляется ложный эхосигнал при использовании алгоритма ДЭМ (рис. 8б).

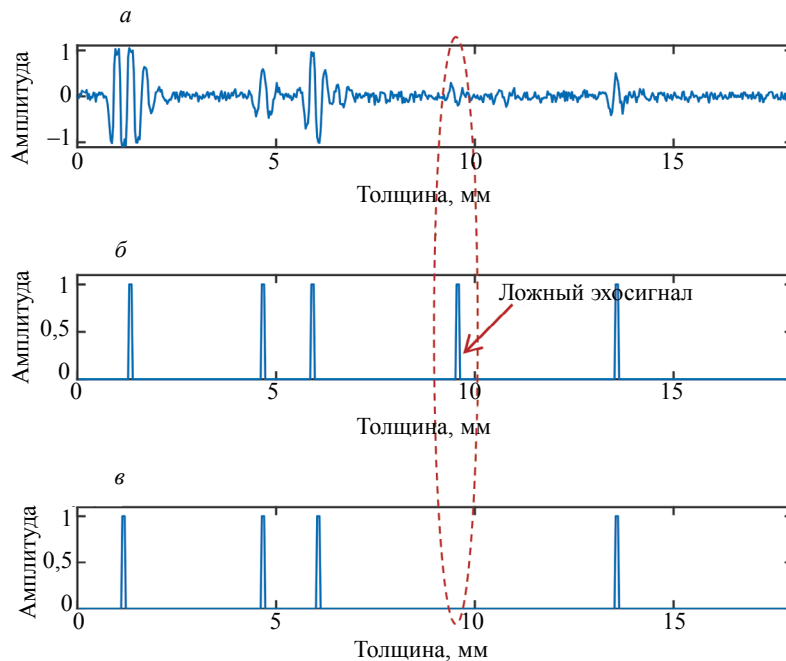


Рис. 8. А-скан (координата 12 мм) (а); предложенный метод с использованием ДЭМ (б); предложенный метод с использованием ДВМ (в).

На рис. 8а, б и в показан экспериментальный А-скан (координата 12 мм) и результаты его обработки с использованием предложенного метода и алгоритмами ДЭМ и ДВМ соответственно. Принимая во внимание полученные результаты улучшения разрешения УЗ-данных, можно сделать вывод, что применение данных методов в УЗК представляет большой интерес.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрен новый метод, применяемый к сигналам УФР. Предложенный способ должен обеспечить автоматический анализ УЗК для улучшения разрешения УЗ-данных и облегчения контроля дефектов и определения их положения. Следует отметить, что современные методы определения параметров дефектов основаны на тяжелых ручных процедурах и не подходят для больших массивов информации, получаемых при УЗК. Сначала мы представили модель ультразвукового сигнала. Впоследствии мы представили алгоритмы ДЭМ и ДВМ. Далее мы представили теорию используемого метода деконволюции. В последней части раздела 2 мы показали этапы при обработке сигналов предложенным методом. В экспериментальной части мы применили предложенный метод на смоделированных и реальных данных. Как показано в табл. 1, полученные результаты подтверждают, что повышение уровня ОСШ исходного сигнала является значительным при использовании алгоритма ДВМ по сравнению с результатами, полученными с использованием алгоритма ДЭМ. Результаты, полученные предложенным способом, являются весьма удовлетворительными с точки зрения улучшения качества сигнала и обнаружении дефектов. Настоящая работа может дать эффективное решение проблемы автоматического анализа данных УФР и открывает интересные перспективы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Osman A.* Automated evaluation of three dimensional ultrasonic datasets / Der Technischen Fakultät der. Universität Erlangen—Nürnberg, 2013.
2. *Humeida Y., Wilcox P.D., Todd M.D., Drinkwater B.W.* A probabilistic approach for the optimisation of ultrasonic array inspection techniques // *NDT & E Inter.* 2014. V. 68. P. 43—52.
3. *Jin H., Yang K., Wu S., Wu H., Chen J.* Sparse deconvolution method for ultrasound images based on automatic estimation of reference signals // *Ultrasonics.* 2016. V. 67. P. 1—8.
4. *Benammar A., Draï R., Kechida A., Dris L., Chibane F.* Enhancement of phased array ultrasonic signal in composite materials using TMST algorithm // *Physics Procedia.* 2015. V. 70. P. 488—491.
5. *Benammar A., Draï R.* Ultrasonic flaw detection in composite materials using SSP-MPSD algorithm // *Journal of Electrical Engineering & Technology (JEET).* 2014. V. 9 (5). P. 1753—1761.
6. *Wu B., Huang Y., Krishnaswamy S.* A Bayesian approach for sparse flaw detection from noisy signals for ultrasonic NDT // *NDT&E Inter.* 2017. V. 85. P. 76—85.
7. *Bilgutay N.M., Saniie J.* The effect of grain size on flaw visibility enhancement using split spectrum processing // *Material Evaluations.* 1984. V. 4 (2).
8. *Rodriguez M.A., San Emeterio J.L., Lazaro J.C., Ramos A.* Ultrasonic flaw detection in NDE of highly scattering materials using wavelet and Wigner—Ville transform processing // *Ultrasonics.* 2004. V. 42 (1—9). P. 847—851.
9. *Song S., Que P.* Wavelet based noise suppression technique and its application to ultrasonic flaw detection // *Ultrasonics.* 2006. V. 44 (2). P. 188—193.
10. *Malik M.A., Saniie J.* S-transform applied to ultrasonic non-destructive testing // *IEEE Int. Ultrason. Symp. Proc.* 2008. P. 184—187.
11. *Lu Y., Oruklu E., Saniie J.* Chirplet signal and empirical mode decompositions of ultrasonic signals for echo detection and estimation // *Journal of Signal and Information Processing.* 2013. V. 4. P. 149—157.
12. *Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shih H.H., Zheng Q., Yen N.C., Tung C.C., Liu H.H.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // *Proc. R. Soc. Lond. Ser.* 1998. V. 454 (3). P. 903—995.
13. *Dragomiretskiy K.* Variational methods in signal decomposition and image processing. Ph.D thesis, University of California, Los Angeles, 2015.
14. *Dragomiretskiy K., Zosso D.* Variational mode decomposition // *IEEE Transactions on Signal Processing.* 2014. V. 62 (3). P. 531—544.
15. *Kern M.* Problèmes Inverses. INRIA, 2002—2003.
16. *Kormylo J.J., Mendel J.M.* Mazimum likelihood detection and estimation of Bernouilli-Gaussian processes // *IEEE trans. on information theory.* 1982. V. 28 (3). P. 482—488.
17. *Liang W., Que P.W., Lei H.M., Chen L.* Matching pursuit for decomposition and approximation of ultrasonic pulse-echo wavelet and its application in ultrasonic nondestructive evaluation // *Rev. Sci. Instrum.* 2008. V. 79 (7).

18. *Zhang G.M., Zhang C.Z., Harvey D.M.* Sparse signal representation and its applications in ultrasonic NDE // *Ultrasonics*. 2012. V. 52 (3). P. 351—363.
 19. *Selesnick I.W.* Sparse signal estimation by maximally sparse convex optimization // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2014. V. 62 (5). P. 1078—1092.
 20. *Xin J., Bilgutay N.M.* Ultrasonic range resolution enhancement using L_1 norm deconvolution // *IEEE Trans. Ultrasonics Symposium*. 1993. P. 711—714.
 21. *Lu J.Y., Ye D., Ma W.P.* Time delay estimation based on variational mode decomposition // *Advances in Mechanical Engineering*. 2017. V. 9 (1). P. 1—6.
 22. *Demirli R., Saniie J.* Model-based estimation of ultrasonic echoes. Part I: analysis and algorithms // *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*. 2001. V. 48 (3). P. 787—802.
 23. *Zhu Y., Weight J.P.* Ultrasonic nondestructive evaluation of highly scattering materials using adaptive filtering and detection // *IEEE Transactions On Ultrasonics, Ferroelectrics, And Frequency Control*. 1994. V. 41. № 1.
 24. *Unluturk M.S., Saniie J.* Deconvolution neural networks for ultrasonic testing // *IEEE Ultrasonics Symposium*. 1995. P. 715—719.
-