

ВЫБОР ШАГА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РАЗДЕЛЬНО-СОВМЕЩЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С НЕПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

© 2019 г. В.Г. Карташев¹, В.К. Качанов^{1,*}, И.В. Соколов¹, А.С. Фадин¹, Д.В. Тимофеев¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия 111250 Москва,
ул. Красноказарменная, 14
E-mail: *kachanovvk@mail.ru

Поступила в редакцию 29.04.2019; после доработки 29.06.2019
Принята к публикации 12.07.2019

Отмечено, что при ультразвуковом контроле изделий из сложноструктурных материалов для выделения полезного эхосигнала из структурного шума используется пространственно-временная обработка сигналов, осуществляемая, как правило, с применением ультразвуковых антенных решеток. Если же поверхность изделия неплоская, то в этом случае следует использовать антенну с синтезированной апертурой, представляющую собой раздельно-совмещенный преобразователь (РС ПЭП), перемещающийся по поверхности изделия с шагом d . Для определения оптимального шага перемещения d , при котором достигается максимальное соотношение сигнал/структурный шум, установлена зависимость величины взаимной корреляции реализаций структурного шума от расстояния между двумя положениями РС ПЭП, по которой был определен оптимальный шаг перемещения РС ПЭП, зависящий от размера апертуры преобразователя.

Ключевые слова: ультразвуковой неразрушающий контроль, выделение сигнала из структурного шума, раздельно-совмещенные преобразователи, оптимальный шаг перемещения преобразователя, пространственно-временная обработка сигналов.

DOI: 10.1134/S0130308219120029

ВВЕДЕНИЕ

При ультразвуковом (УЗ) эхоимпульсном контроле изделий из материалов с неоднородной сложной структурой (бетона, чугуна, колокольной бронзы и др.) эхосигналы ослабляются из-за рассеивания зондирующего сигнала на структурных неоднородностях материала. При определенном соотношении длины УЗ волны λ и среднего размера элемента структурной неоднородности D рассеивание может быть столь сильным, что множественные отражения от случайно расположенных элементов структуры формируют структурный шум (СШ), маскирующий эхосигнал, отраженный от дефектов или дна объекта контроля (ОК) [1, 2]. В этих случаях для выделения полезного эхосигнала из смеси его со структурным шумом используют пространственно-временную обработку сигналов (ПВОС), суть которой заключается в многократном зондировании контролируемого изделия из разных позиций пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) на поверхности контролируемого изделия с последующим суммированием (накоплением) принятых сигналов. При суммировании сигналов, полученных в результате N последовательных зондирований объекта, амплитуда искомого эхосигнала от дефекта возрастает в N раз, а суммарная амплитуда структурного шума увеличивается лишь в \sqrt{N} раз. При этом отношение сигнал/СШ возрастает в \sqrt{N} раз.

Идея пространственно-временной обработки сигналов подробно обсуждалась нами в [2], где было показано, что для различных ОК, отличающихся своей формой, следует использовать различные алгоритмы ПВОС. В частности, в зависимости от конфигурации и размера доступной части поверхности объекта контроля оператор, реализующий алгоритм ПВОС, может перемещать ПЭП вдоль как прямолинейной, так и криволинейной траектории, или, например, вращать ПЭП вокруг своей геометрической оси. Там же было показано, что при линейном перемещении преобразователя реализуется алгоритм ПВОС, подобный тому, что используется в традиционных томографах, построенных на базе УЗ линейных антенных решеток (АР) [3, 4].

Как правило, выбор шага УЗ линейных антенных решеток производится по аналогии с радиолокационными АР исходя из требования качественного построения томограмм [3, 4]. Однако в [1, 5] было показано, что при выборе шага линейных антенных решеток, предназначенных для УЗ томографии изделий из сложноструктурных материалов, следует руководствоваться в первую очередь требованием обеспечения максимального соотношения сигнал/СШ, так как прежде всего следует выделять полезные эхосигналы из СШ и только после этого осуществлять построение томограммы ОК.

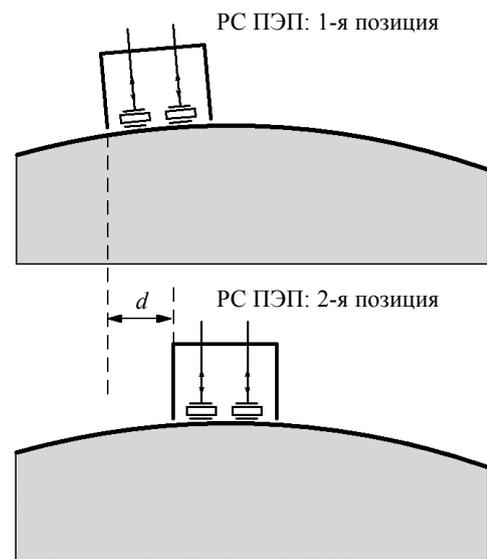
Рис. 1. Использование РС ПЭП для УЗ томографии изделий с неплоской поверхностью.

Как правило, большинство УЗ АР предназначены для контроля изделий с плоской поверхностью. В том случае, когда возникает необходимость УЗ контроля объектов с неплоской поверхностью, использовать традиционные линейные АР не представляется возможным, так как невозможно обеспечить одновременный надежный акустический контакт всех элементов АР с поверхностью контролируемого изделия. Изготавливать же для каждого ОК специализированные АР, повторяющие форму поверхности изделия, сложно, дорого и не всегда целесообразно. Поэтому наиболее простой путь решения проблемы контроля таких ОК состоит в использовании АР с синтезированной апертурой, в которых осуществляется перемещение одиночного совмещенного УЗ ПЭП по поверхности ОК [2, 6]. Возможно также синтезировать виртуальную антенную решетку, предполагающую использование раздельных излучающего и приемного преобразователей [6], работающих согласно алгоритму САФТ. Однако практика контроля крупнобаритных изделий с неплоской конфигурацией поверхности контроля показала, что для таких изделий технологично использовать один раздельно-совмещенный преобразователь, который перемещается оператором вдоль поверхности контролируемого изделия с определенным шагом d и позиционируется в определенных точках контроля (рис. 1). В каждой позиции излучается зондирующий сигнал, принятые эхосигналы сохраняются в памяти компьютера и затем совместно обрабатываются с целью достижения максимального соотношения сигнал/СШ.

В зависимости от конфигурации поверхности контроля РС ПЭП может перемещаться как прямолинейно, синтезируя виртуальную АР линейной конфигурации, так и криволинейно, по произвольной траектории. При этом возникает вопрос о выборе оптимального шага $d_{\text{опт}}$ перемещения РС ПЭП, при котором достигается наилучшее соотношение сигнал/СШ.

Впервые вопрос о выборе шага в линейных УЗ АР, предназначенных для томографии изделий из сложноструктурного бетона, рассматривался в [5], где было предложено выбирать шаг антенной решетки, равный радиусу корреляции СШ. Более детально проблема выбора оптимального шага УЗ антенных решеток в условиях структурного шума была исследована в [7, 8], где были определены взаимно-корреляционные характеристики структурного шума на соседних элементах АР. Однако при использовании РС ПЭП в виртуальных АР корреляционные характеристики СШ отличаются от тех, которые наблюдаются при использовании конструктивных АР. И именно поэтому этот вопрос требует дополнительного изучения. В [9] была исследована проблема выбора шага перемещения РС ПЭП, выполненных на базе низкочастотных малоапертурных преобразователей с широкой диаграммой направленности (ДН) — преобразователей с сухим точечным контактом, используемых при контроле строительных конструкций из бетона. Однако при контроле изделий из металлов обычно используются РС преобразователи, имеющие размер апертуры в несколько длин волн и, как следствие, сравнительно узкую диаграмму направленности. Именно это обстоятельство потребовало проведения дополнительных исследований, так как корреляционные характеристики реализаций СШ, как это показано в [1], зависят от ширины ДН преобразователей. Поэтому и величина оптимального шага перемещения РС ПЭП тоже зависит от апертуры используемых в нем преобразователей.

При выборе шага перемещения РС ПЭП необходимо учитывать следующие обстоятельства. Как известно, эффективность выделения сигнала на фоне СШ определяется числом независимых зондирований объекта N , при которых реализации СШ в соседних положениях РС ПЭП не коррелированы. В этом случае отношение сигнал/СШ увеличивается в \sqrt{N} раз по сравнению с однократным зондированием. Однако для получения независимых реализаций СШ шаг перемещения датчика d может оказаться достаточно большим. В изделиях же с нестандартной конфигурацией часто размеры поверхности, доступной для контроля, ограничены, поэтому ограничено и число точек контроля, в которых можно получить независимые реализации СШ. В этих случаях шаг перемещения РС ПЭП и число зондирований оказываются взаимосвязанными: чем больше шаг



перемещения РС ПЭП, тем меньше число точек контроля на доступной поверхности изделия. Иначе говоря, если число статистически независимых реализаций СШ невелико, то и отношение сигнал/СШ тоже оказывается небольшим. Кроме того, при слишком большом шаге сканирования возможен пропуск дефектов или утрата существенных элементов изображения внутренней структуры объекта.

Если же на ограниченной по размерам поверхности сканирования обеспечить небольшой шаг перемещения РС ПЭП, то соседние реализации СШ оказываются частично коррелированными. При этом суммарная дисперсия СШ оказывается больше суммы дисперсий отдельных реализаций СШ. Поэтому при увеличении числа зондирований N отношение сигнал/СШ возрастает медленнее, чем \sqrt{N} , или даже совсем перестает расти. Подобное явление «насыщения» обнаружено и описано нами в [9, 10] при исследовании зависимости отношения сигнал/СШ от шага линейной УЗ АР. Все это позволяет сделать вывод о том, что существует оптимальный шаг перемещения РС ПЭП, при котором обеспечивается максимальное соотношение сигнал/СШ.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРНОГО ШУМА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗДЕЛЬНО-СОВМЕЩЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Входящие в состав РС ПЭП излучающий (ИП) и приемный (ПП) пьезоэлементы имеют, как правило, апертуру полукруглой формы (рис. 2).



Рис. 2. Схема расположения РС ПЭП на объекте контроля.

В процессе зондирования изделия с нестандартной (неплоской) поверхностью РС ПЭП может перемещаться в направлении как координаты X , так и Y . Нашей задачей является определение оптимального шага перемещения РС ПЭП в каждом из этих двух направлений. Для ее решения мы должны сначала определить взаимно корреляционные характеристики реализаций СШ.

Рассмотрим сначала режим перемещения РС ПЭП в направлении координаты X . На рис. 3 показаны два соседних положения РС ПЭП, разнесенные на расстояние d один от другого. Расстояние между фазовыми центрами излучающего и приемного преобразователей обозначим через a . Выберем начало координат O в центре структуры. Координаты i -й неоднородности обозначим x_i, y_i, z_i . Тогда разности хода сигналов, прошедших путь от излучающего элемента до неоднородности P и от нее до приемного элемента в положениях РС ПЭП 1 и 2, определяются выражением

$$\Delta l = (l_{21} + l_{22}) - (l_{11} + l_{12}), \quad (1)$$

где

$$l_{11} = \sqrt{\left(x_i + \frac{a}{2} + \frac{d}{2}\right)^2 + y_i^2 + z_i^2} \quad \text{— длина пути } A_1P,$$

$$l_{12} = \sqrt{\left(x_i - \frac{a}{2} + \frac{d}{2}\right)^2 + y_i^2 + z_i^2} \quad \text{— длина пути } PB_1, \quad (2)$$

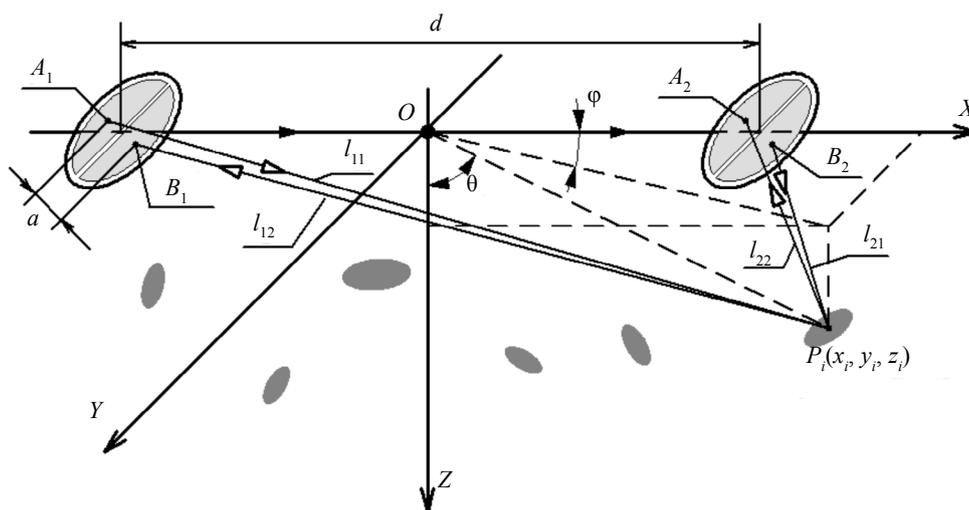


Рис. 3. К определению взаимной корреляции реализаций СШ, регистрируемых в двух произвольных положениях РС преобразователя.

$$l_{21} = \sqrt{\left(x_i + \frac{a}{2} - \frac{d}{2}\right)^2 + y_i^2 + z_i^2} \text{ — длина пути } A_2P,$$

$$l_{22} = \sqrt{\left(x_i - \frac{a}{2} - \frac{d}{2}\right)^2 + y_i^2 + z_i^2} \text{ — длина пути } PB_2.$$

Введем дополнительно сферическую систему координат с центром в точке O , причем угол θ будем отсчитывать от оси Z , а угол φ — оси X . Координаты i -й неоднородности в сферической системе координат r_i, θ_i, φ_i связаны с ее декартовыми координатами соотношениями:

$$x_i = r_i \sin\theta_i \cos\varphi_i, y_i = r_i \sin\theta_i \sin\varphi_i, z_i = r_i \cos\theta_i. \tag{3}$$

Подставляя (3) в (2) и (1), можно выразить разность хода Δl через координаты r, θ, φ , но получающееся при этом выражение оказывается слишком громоздким для дальнейшего использования. Однако если расстояние до неоднородности P значительно больше расстояния между излучающим и приемным элементами a и шага перемещения РС ПЭП d , то, пренебрегая величинами высших порядков малости, можно получить приближенное выражение

$$\Delta l \approx 2d \sin\theta \cos\theta. \tag{4}$$

Эта формула обеспечивает приемлемую точность расчетов при выполнении условий $z_i > 3a$ и $z_i > 3d$, то есть в дальней зоне преобразователей.

При перемещении РС ПЭП вдоль координаты Y анализ проводится аналогично и также приводит к формуле (4), которой можно пользоваться при $z_i > 2a$ и $z_i > 2d$.

В [1, 2] были рассмотрены взаимно корреляционные характеристики реализаций СШ на соседних приемных преобразователях в неподвижной антенной решетке. Там было получено выражение для разности хода сигналов, приходящих на соседние приемные преобразователи, расположенные на расстоянии d друг от друга

$$\Delta l \approx d \sin\theta \cos\theta. \tag{5}$$

Нетрудно видеть, что при использовании РС ПЭП разность хода Δl при таком же расстоянии d получается вдвое больше, чем для неподвижной антенной решетки. Это объясняется тем, что при одновременном перемещении излучающего и приемного преобразователей изменяются оба расстояния: AP и PB (см. рис. 3). Иначе говоря, если сравнивать РС ПЭП с двумя преобразователями (излучающим и приемным) и антенную решетку с такими же преобразователями, как в РС ПЭП,

то при перемещении РС ПЭП на расстояние d взаимная корреляция реализаций СШ в этих двух положениях РС ПЭП будет такая же, как на выходах двух элементов AP , разнесенных на расстояние $2d$.

Методика определения взаимно корреляционной функции (ВКФ) реализаций СШ для преобразователей конкретных типов изложена в [1]. Для решения этой задачи нужно знать ДН преобразователей. Для определения ДН ПЭП с полукруглой апертурой можно воспользоваться классической методикой теории антенн [11]. Апертуру преобразователя нужно разбить на маленькие участки размером значительно меньше длины волны и просуммировать поля всех участков в дальней зоне. С помощью этой методики была рассчитана ДН полукруглого преобразователя радиусом 5 длин волн (рис. 4).

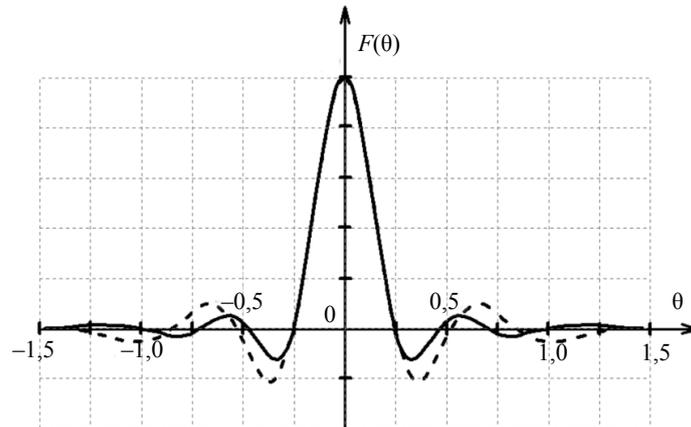


Рис. 4. Диаграммы направленности ПЭП с полукруглой (сплошная линия) и прямоугольной апертурами с такой же шириной главного лепестка ДН (штриховая линия).

Для упрощения последующего анализа желательно описать ДН преобразователей аналитическим выражением — функцией координат θ , φ . Это можно сделать, если аппроксимировать полукруглую апертуру ПЭП прямоугольной с такой же шириной ДН. На рис. 4 штриховой линией показана ДН преобразователя с прямоугольной апертурой, размеры которой подобраны таким образом, чтобы совпадали главные лепестки ДН прямоугольного и полукруглого преобразователей. Нетрудно видеть, что прямоугольная апертура размером $4\lambda \times 8\lambda$ имеет такой же главный лепесток ДН, как полукруглая радиусом 5λ , но ДН прямоугольной апертуры имеет несколько более высокий уровень боковых лепестков.

В теории антенн известно выражение для ДН прямоугольной апертуры шириной D как функции одной координаты θ :

$$F(\theta) = \text{sinc}\left(\frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta\right), \quad (6)$$

где $\text{sinc } x = \sin x/x$.

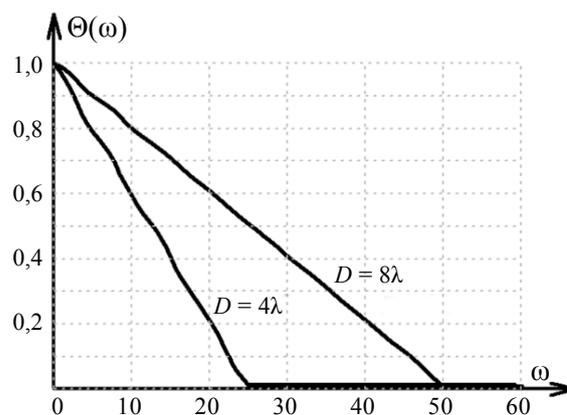
Однако для дальнейших преобразований нам нужно иметь ДН прямоугольной апертуры как функции двух координат θ и φ . Чтобы получить выражение для ДН в двумерной форме, нужно перемножить два одномерных выражения вида (6) для ДН в двух взаимно перпендикулярных плоскостях XOZ и YOZ . В результате после ряда преобразований получаем

$$F(\theta, \varphi) = \text{sinc}\left(\frac{\pi D_x}{\lambda} \sin \theta \cos \varphi\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{\pi D_y}{\lambda} \sin \theta \sin \varphi\right), \quad (7)$$

где D_x , D_y — размеры апертуры в направлении координат x и y соответственно.

В соответствии с корреляционной теорией СШ, изложенной в [1], для определения взаимно корреляционных характеристик СШ необходимо проделать следующие действия. Сначала вычисляется плотность вероятности разности задержек сигналов, отраженных от неоднородностей материала, принимаемых соседними приемными преобразователями. Далее вычисляется характеристическая функция $\Theta(\omega)$ как преобразование Фурье от этой плотности вероятности. Умножая энергетический спектр СШ на характеристическую функцию, находим взаимный энергетический

Рис. 5. Характеристическая функция для преобразователя с прямоугольной апертурой.



спектр соседних реализаций СШ. После этого, если необходимо, можно найти ВКФ реализаций СШ как обратное преобразование Фурье от взаимного энергетического спектра.

Проводя математические преобразования и расчеты в соответствии с изложенной в [1] методикой, находим характеристическую функцию структурного шума $\Theta(\omega)$ при использовании преобразователей с прямоугольной апертурой. Графики характеристической функции $\Theta(\omega)$ для $D = 4\lambda$ и $D = 8\lambda$ приведены на рис. 5.

В тех случаях, когда система преобразователей содержит излучающий и несколько приемных преобразователей (например, в составе антенной решетки), характеристическая функция определяет значения коэффициента взаимной корреляции реализаций СШ на соседних приемных преобразователях в зависимости от безразмерной переменной u , которая пропорциональна частоте и расстоянию между приемными преобразователями d ,

$$u = \frac{2\pi d}{\lambda} = \frac{\omega d}{C}, \quad (8)$$

где C — скорость УЗ волны.

Из графиков характеристической функции на рис. 5 видно, что она убывает по закону, близкому к линейному, а при некотором значении аргумента, равном u_0 , становится практически равной нулю. При размере апертуры преобразователя $D = 4\lambda$ $u_0 \approx 25$, а при $D = 8\lambda$ $u_0 \approx 50$. Поскольку при $u = u_0$ ВКФ реализаций СШ становится равной нулю, можно сделать вывод, что значение $u = u_0$ соответствует радиусу корреляции СШ. Отсюда нетрудно определить величину радиуса корреляции СШ при конкретных размерах апертуры преобразователей. Например, при размере апертуры $D = 4\lambda$ радиус корреляции СШ равен

$$r_k = d \approx \frac{25\lambda}{2\pi} = 3,98\lambda \approx 4\lambda, \quad (9)$$

а при $D = 8\lambda$

$$r_k = d \approx \frac{50\lambda}{2\pi} = 7,96\lambda \approx 8\lambda. \quad (10)$$

Таким образом, при использовании преобразователей с прямоугольной апертурой радиус корреляции СШ равен размеру апертуры преобразователя. Этот результат согласуется с приведенными в [1] сведениями о радиусе корреляции СШ при использовании преобразователей с круглой апертурой.

При использовании РС ПЭП для определения корреляционных характеристик СШ можно пользоваться результатами анализа и расчетными формулами для характеристик СШ на приемных преобразователях в составе АР, заменив d на $2d$. В этом случае аргументом характеристической функции является переменная

$$u = \frac{4\pi d}{\lambda} = \frac{2\omega d}{C}. \quad (11)$$

В соответствии с этим вдвое уменьшается радиус корреляции СШ: при размере апертуры преобразователя $D = 4\lambda$ он равен 2λ , а при $D = 8\lambda$ — 4λ , то есть при использовании РС ПЭП с преобразователями прямоугольной формы радиус корреляции СШ равен половине размера апертуры преобразователей, входящих в состав РС ПЭП. Соответственно, для РС ПЭП с преобразователями полукруглой формы радиус корреляции СШ определяется размерами эквивалентной прямоугольной апертуры с такой же шириной ДН.

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/СШ ОТ ШАГА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РАЗДЕЛЬНО-СОВМЕЩЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Рассмотрим, как влияет шаг перемещения РС ПЭП на величину отношения сигнал/СШ. При числе зондирований, равном N , амплитуда донного сигнала U_0 будет равна $N \cdot U_0$, а эффективное напряжение суммарного СШ $\sigma_{\text{сум}}$ — квадратному корню из дисперсии СШ, которая вычисляется по формуле

$$\sigma_{\text{сум}}^2 = N\sigma^2 + \sum_{i,j=1}^N R_{ij}, \quad (i, j=1, \dots, N, i \neq j), \quad (12)$$

где R_{ij} — коэффициент взаимной корреляции реализаций СШ в i - и j -м положениях РС ПЭП.

Для определения коэффициента взаимной корреляции реализаций СШ в различных положениях РС ПЭП нужно найти взаимный энергетический спектр этих реализаций СШ как произведение собственного энергетического спектра СШ $W_0(\omega)$ и характеристической функции $\Theta(\omega)$ и проинтегрировать его по всей полосе частот, занимаемой спектром СШ

$$R_{ij} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} W_0(\omega) \Theta\left(\frac{2\omega d_{ij}}{C}\right) d\omega, \quad (13)$$

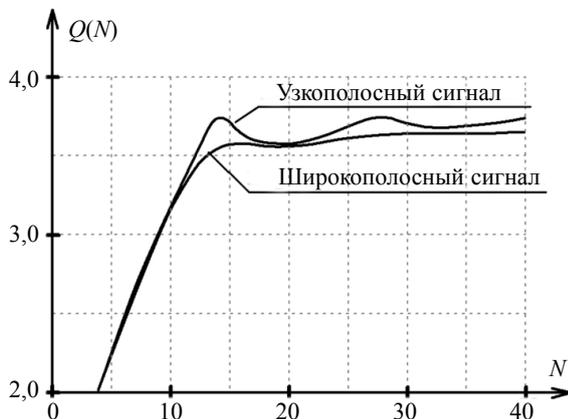
где d_{ij} — расстояние между i - и j -м положениями РС ПЭП.

Расчет отношения сигнал/СШ проводился по формулам (12), (13) при следующих конкретных данных: диаметр апертуры преобразователя предполагался равным 10λ , откуда следуют размеры прямоугольной апертуры с такой же шириной ДН: $D_x = 4\lambda$ и $D_y = 8\lambda$. Размер области перемещения РС ПЭП L (расстояние между крайними положениями РС ПЭП) вдоль осей X и Y примем равным 30λ . Число позиций зондирования в каждом направлении

$$N = \frac{L}{d} + 1, \quad (14)$$

где d — шаг перемещения РС ПЭП. Расчеты проводились для двух видов зондирующего сигнала: узкополосного и широкополосного с шириной спектра 50 %. Результаты расчета для перемещения РС ПЭП вдоль оси X приведены на рис. 6, на котором показано, во сколько раз увеличивается отношение сигнал/СШ при многократном зондировании по сравнению с однократным. При небольшом числе зондирований N , когда шаг перемещения РС ПЭП d больше радиуса корреляции СШ, реализации СШ в соседних положениях РС ПЭП не коррелированы и отношение сигнал/СШ получается в \sqrt{N} раз больше, чем при однократном зондировании.

Если зондирующий сигнал узкополосный, максимум отношения сигнал/СШ достигается при $N = 16$, когда $d = 2\lambda = D_x/2$. При $N > 16$, когда шаг перемещения РС ПЭП d меньше $D_x/2$, начинает сказываться взаимная корреляция реализаций СШ и отношение сигнал/СШ падает. При дальнейшем увеличении числа зондирований N отношение сигнал/СШ колеблется в нешироких пределах, оставаясь все время немного ниже максимального значения, которое достигается при $d = D_x/2$. Следовательно, оптимальный шаг перемещения РС ПЭП вдоль координаты X равен $D_x/2$, то есть радиусу корреляции СШ.



При использовании широкополосного зондирующего сигнала характер графика зависимости отношения сигнал/СШ от числа зондирований (см. рис. 6) в целом такой же, как при использовании узкополосного сигнала, но имеет более сглаженный вид, явный максимум здесь не наблюдается. Однако и в этом случае оптимальный шаг перемещения РС ПЭП можно считать равным $D_x/2$, поскольку при увеличении числа зондирований больше того числа, которое соответствует этому шагу, отношение сигнал/СШ увеличивается не более чем на 2-3 %.

Рис. 6. Зависимость отношения сигнал/СШ от количества N точек контроля при линейном перемещении РС ПЭП вдоль оси X .

При перемещении РС ПЭП вдоль координаты Y результаты получаются аналогичные. Оптимальный шаг перемещения РС ПЭП получается равным $D_y/2$, то есть радиусу корреляции СШ в направлении оси Y .

Далее необходимо учесть, что D_x и D_y — это размеры прямоугольной апертуры преобразователя с такой же шириной диаграммы направленности, как у преобразователя с полукруглой апертурой, причем $D_x \approx 0,8 \cdot R$, $D_y \approx 1,6 \cdot R$, где R — радиус апертуры полукруглого ПЭП. Отсюда следует, что оптимальный шаг перемещения РС ПЭП в направлении координаты X приблизительно равен 0,2 диаметра преобразователя, а в направлении координаты Y — 0,4. Применять более мелкий шаг перемещения РС ПЭП при соответствующем увеличении числа зондирований не имеет смысла, так как это приведет к увеличению затрат труда, но не увеличит отношение сигнал/СШ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проверки справедливости результатов теоретического анализа был проведен эксперимент по выделению донного сигнала из СШ на двух образцах из бронзы с относительно небольшой толщиной. У образца № 1 толщиной 42 мм средний размер зерна — 28 мкм, а у образца № 2 толщиной 43 мм — 64 мкм. Контроль образцов проводился с помощью РС ПЭП типа D2763 с диаметром апертуры 6 мм. В качестве возбуждающего ПЭП сигнала использовался радиоимпульс длительностью один период синусоиды с частотой 10 МГц. Ширина спектра сигнала на уровне 0,7 с учетом частотных характеристик преобразователей и используемых при обработке сигнала фильтров составляла 2,5 МГц.

Несмотря на относительно небольшие размеры структурных неоднородностей в образцах бронзы, реализации эхосигнала имели значительный уровень СШ, на фоне которого не всегда удавалось однозначно идентифицировать донный сигнал (рис. 7а). После суммирования сигналов, полученных при последовательном зондировании образцов с выбранным шагом перемещения РС ПЭП, относительный уровень донного сигнала значительно повышался (рис. 7б).

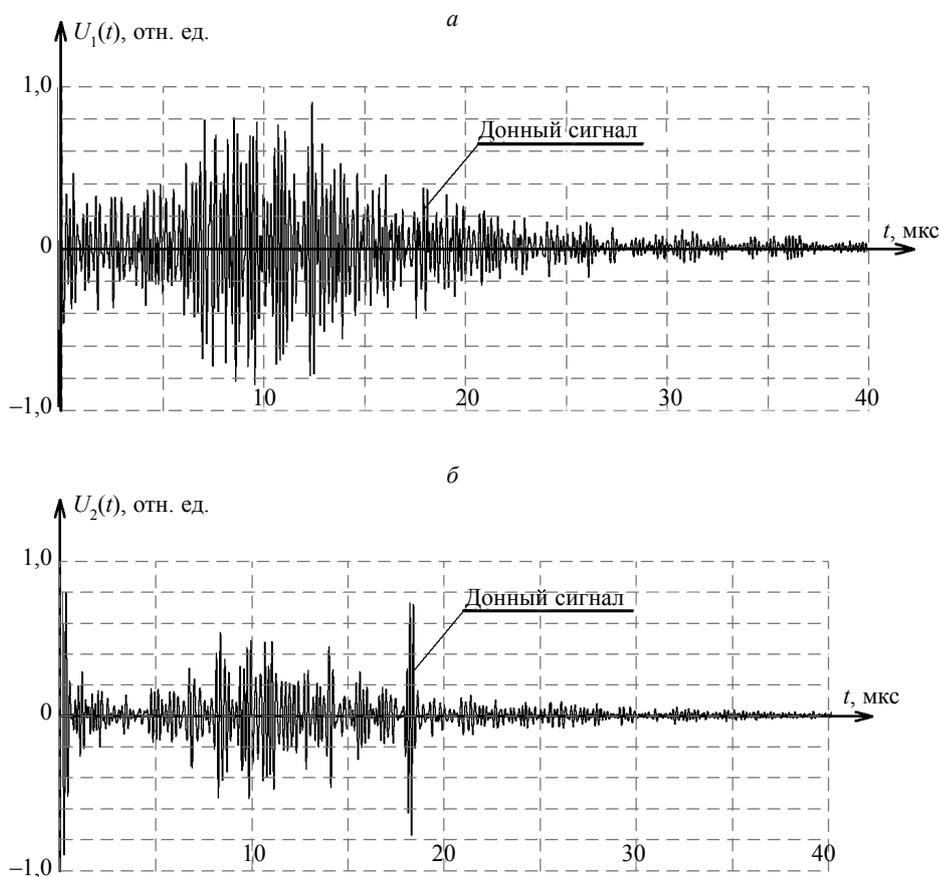


Рис. 7. Эпюра зарегистрированного сигнала, содержащего структурный шум и донный эхосигнал (а), эпюра зарегистрированного сигнала после ПВОС (б).

Преобразователи, входящие в состав РС ПЭП типа D2763, имеют полукруглую, то есть несимметричную форму и поэтому ДН преобразователей тоже несимметричная. Соответственно, и расстояние до границы дальней зоны зависит от того, в какой плоскости рассматривается диаграмма направленности. Если рассматривать ДН в плоскости, перпендикулярной линии раздела излучающего и приемного преобразователей (в плоскости XOZ на рис. 3), где эффективные размеры апертуры минимальны и равны $2,4 \lambda$, то расстояние до границы дальней зоны равно 12 мм и задняя граница образцов находится в дальней зоне преобразователей.

В противоположной плоскости (YOZ) размер апертуры преобразователя в 2 раза больше, а расстояние до границы дальней зоны в 4 раза больше, чем в предыдущем случае, и равно 48 мм, то есть больше толщины исследуемых образцов. Поэтому в рамках данной работы эксперименты по выбору шага производились только при перемещении РС ПЭП вдоль оси X (см. рис. 3).

РС ПЭП перемещался в пределах области протяженностью 30 мм, число позиций контроля в которой варьировалось от 5 до 51. Соответственно, шаг перемещения РС ПЭП изменялся от 7,5 до 0,6 мм. Для каждого значения шага перемещения РС ПЭП производилось соответствующее ему количество зондирований объекта, принятые сигналы суммировались, после этого просуммированный сигнал обрабатывался. В результате обработки вычислялось среднее квадратическое значение СШ в окрестности донного сигнала и определялись амплитуда донного сигнала и отношение сигнал/СШ.

Результаты экспериментов приведены на рис. 8. В целом характер полученной экспериментально зависимости отношения сигнал/СШ от числа зондирований N совпадает с тем, который получен в результате теоретического анализа. При маленьких значениях числа зондирований N (большом шаге перемещения РС ПЭП) отношение сигнал/СШ растет приблизительно пропорционально \sqrt{N} . При некотором значении N наблюдается максимальное значение отношения сигнал/СШ, причем во всех сериях экспериментов это оптимальное значение N оказалось равным 25, что соответствует шагу перемещения РС ПЭП 1,25 мм, которое практически совпадает с теоретически предсказанным оптимальным значением шага, равным 0,2 диаметра апертуры преобразователя, или 1,2 мм (для используемого РС ПЭП).

При небольших значениях числа зондирований N наблюдается сильный разброс измеренных значений отношения сигнал/СШ. Это объясняется неоднородностью структуры исследуемых образцов. При зондировании объекта в разных местах в поле зрения преобразователей попадают разные неоднородности и от этого уровень структурного шума может варьироваться в широких пределах. Соответственно, изменяется и отношение сигнал/СШ. При большом числе зондирований N происходит усреднение результатов измерений и степень разброса значений отношения сигнал/СШ становится значительно меньше.

Эксперимент подтвердил основной результат теоретического анализа: существование оптимального шага перемещения РС ПЭП, который определяется размером апертуры преобразователя и не зависит от структуры материала (по крайней мере, для исследованных образцов).

Результаты проведенного исследования по выбору шага перемещения РС преобразователя были использованы при УЗ контроле колокола «Большой» на колокольне Данилова монастыря с помощью раздельно-совмещенного ПЭП мозаичного типа [12] (рис. 9). При этом использовалось как линейное перемещение РС ПЭП, так и его вращение вокруг собственной оси.

Колокол был отлит в 1890 г. из высокооловянистой бронзы старинного литья, его вес — 12 т; диаметр — 2,5 м, высота — 2,5. В 2008 г. при его транспортировке из США в Россию он

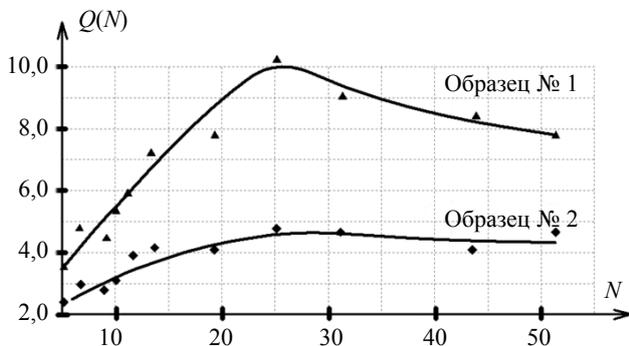


Рис. 8. Зависимость отношения сигнал/СШ от числа зондирований N .



Рис. 9. Контроль колокола «Большой» на звоннице Данилова монастыря.

получил повреждение — небольшой скол в нижней области юбки. В связи с обращением фонда «Колокола России» о проведении дефектоскопического обследования колокола «Большой» Данилова монастыря г. Москвы в 2009 г. был проведен его УЗ контроль в области губы с целью выявления возможных трещин колокольной бронзы. В последующие годы осуществляется регулярный мониторинг его состояния, который показал отсутствие трещин вблизи поврежденной области колокола.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Установлен оптимальный шаг перемещения раздельно-совмещенного преобразователя при УЗ контроле материалов с неоднородной структурой, при котором достигается максимальное соотношение сигнал/СШ. Этот оптимальный шаг для РС ПЭП, у которого преобразователи имеют полукруглую форму, равен радиусу корреляции СШ, определяется размерами апертуры преобразователя и практически не зависит от параметров структуры объекта контроля. Очевидно, что при других значениях апертуры возможны иные оценки оптимального шага.

Показано, что перемещение РС ПЭП в пределах фиксированной площади поверхности объекта с шагом меньше оптимального не приводит к увеличению отношения сигнал/СШ, несмотря на увеличение числа зондирований.

Поскольку корреляционные характеристики СШ инвариантны к способам УЗ контроля и определяются размерами и формой апертуры преобразователей, то полученная величина оптимального шага перемещения РС ПЭП справедлива при УЗ контроле объектов, выполненных из различных материалов с неоднородной структурой и различной конфигурацией поверхности.

Статья подготовлена при реализации Проекта государственного задания Министерства образования и науки РФ в сфере научной деятельности № 11.9879.2017/8.9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В., Воронкова Л.В., Шалимова Е.В. Структурный шум в ультразвуковой дефектоскопии. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. 186 с.
2. Kartashev V.G., Kachanov V.K., Sokolov I.V. et al. Pattern-Noise in Ultrasonic Inspection of Articles Made of Complexly Structured Materials // Russian Journal of Nondestructive testing. 2018. V. 54. No. 1. P. 17—30. [Карташев В.Г., Качанов В.К., Соколов И.В., Воронкова Л.В., Концов Р.В. Структурный шум при ультразвуковом контроле изделий из материалов со сложной структурой // Дефектоскопия. 2018. № 1. С. 19—32.]
3. Doctor S.R., Hall T.E., Reid L.D. SAFT — the Evolution of a Signal Processing Technology for Ultrasonic Testing // NDT International 19. 1986. P. 163—167.
4. Schickert M. Towards SAFT-Imaging in Ultrasonic Inspection of concrete // International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin. 26 — 28.09.1995. P. 411—418.
5. Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Яковлев Н.Н., Ковалёв А.В., Шевалдыкин В.Г. Акустическая В- и С-томография крупнотекстурных материалов импульсным эхометодом // Приборы и системы управления. 1989. № 7. С. 21—24.
6. Шевалдыкин В.Г., Самокрутов А.А., Смородинский Я.Г. Термины ультразвукового контроля с антенными решетками и что они означают // Дефектоскопия. 2018. № 9. С. 31—40.
7. Карташев В.Г., Качанов В.К. Оптимальное выделение сигналов на фоне структурного шума в УЗ дефектоскопии // Дефектоскопия. 1992. № 7. С. 14—24.
8. Kachanov V.K., Kartashev V.G., Popko V.P. Application of signal processing methods to ultrasonic non-destructive testing of articles with high structural noise // Nondestr. Test. Eval. 2001. V. 17. P. 15—40.
9. Салем А.З.С., Карташев В.Г., Шалимова Е.В., Качанов В.К., Соколов И.В. Влияние шага ультразвуковой антенной решетки на эффективность выделения сигнала из структурного шума в дефектоскопии // Измерительная техника. 2016. № 7. С. 61—66.
10. Kartashev V.G., Kachanov V.K., Sokolov I.V. et al. Choosing Phased Array Pitch in Ultrasonic Tomography of Materials with Inhomogeneous Structure // Russian Journal of Nondestructive testing. 2018. V. 54. No. 4. P. 223—231. [Карташев В.Г., Качанов В.К., Соколов И.В., Концов Р.В., Фадин А.С. Выбор шага антенной решетки при ультразвуковой томографии материалов с неоднородной структурой // Дефектоскопия. 2018. № 4. С. 3—11.]
11. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. М.: Энергия, 1975. 528 с.
12. Kachanov V.K., Sokolov I.V., Kartashev V.G. et al. Applying Special Spatiotemporal Signal Processing Algorithms to Ultrasonic Testing of Large Antique Cast Bells // Russian Journal of Nondestructive testing. 2018. V. 54. No. 5. P. 316—327. [Качанов В.К., Соколов И.В., Карташев В.Г., Шалимова Е.В. Применение специальных алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов при ультразвуковом контроле больших колоколов старинного литья // Дефектоскопия. 2018. № 5. С. 16—25].