

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭХОМЕТОДА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

© 2021 г. В.Г. Карташев<sup>1,\*</sup>, Э.И. Трунов<sup>1,\*\*</sup>, Е.В. Шалимова<sup>1,\*\*\*</sup>, Р.В. Концов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
Россия 111250 Москва, ул. Красноказарменная, 14  
E-mail: \*kartashevvg@mail.ru; \*\*ediktrunov@mail.ru; \*\*\*shalimovayv@mail.ru

Поступила в редакцию 28.04.2021; после доработки 24.09.2021

Принята к публикации 08.10.2021

Рассматривается модернизация эхометода ультразвуковой дефектоскопии, отличающейся тем, что кроме решетки преобразователей, контактирующих с рабочей (передней) поверхностью объекта, дополнительно используется один или несколько приемных преобразователей на боковой поверхности объекта. Данный способ расположения антенных решеток позволяет существенно улучшить разрешающую способность, а в случае использования антенной решетки на боковой поверхности объекта — получить дополнительную информацию для построения изображения внутренней структуры объекта. С целью получения потенциальной разрешающей способности используется сверхширокополосный зондирующий сигнал с гауссовской огибающей в комбинации с оригинальным алгоритмом обработки сигналов, включающий в себя суммирование, одностороннее ограничение и перемножение принятых сигналов. В работе даны некоторые практические рекомендации. Проведена оценка потенциальной разрешающей способности в различных направлениях.

*Ключевые слова:* ультразвуковая дефектоскопия, разрешающая способность, антенная решетка, алгоритм, сверхширокополосный сигнал, обработка сигналов.

DOI: 10.31857/S0130308221110038

### ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковая (УЗ) дефектоскопия является одним из самых распространенных методов неразрушающего контроля изделий. При этом наиболее информативным является эхометод, при котором излучающие и приемные преобразователи располагаются на одной и той же стороне объекта [1, 2]. Эхометод позволяет не только обнаружить дефекты и элементы структуры объекта, но и определить их координаты.

Расстояние до дефекта обычно измеряется посредством измерения временной задержки сигнала, точность измерения которой зависит от длительности зондирующего импульса.

Разрешающая способность по координате, параллельной зондируемой поверхности объекта, обеспечивается решеткой ультразвуковых преобразователей (антенной решетки), находящейся в акустическом контакте с поверхностью объекта. Чем больше размеры апертуры антенной решетки, тем выше разрешающая способность. На практике, как правило, разрешающая способность по глубине, которая обеспечивается измерением задержки сигнала, оказывается лучше, чем разрешающая способность в поперечном направлении, которая обеспечивается размерами антенной решетки. К тому же, разрешающая способность в поперечном направлении обычно ухудшается по мере продвижения вглубь объекта.

Этот недостаток можно преодолеть, если есть возможность разместить на боковой поверхности объекта один или несколько дополнительных приемных преобразователей [8]. Наличие дополнительных приемных преобразователей на боковой поверхности позволяет существенно увеличить разрешающую способность в поперечном направлении (вдоль координаты  $x$  на рис. 1).

А если на боковой поверхности объекта расположить не один преобразователь, а антенную решетку, параллельную оси  $z$  (см. рис. 1), то это позволит получить дополнительную информацию, необходимую для построения трехмерного изображения внутренней структуры объекта.

### ВЫБОР ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА

Разрешающая способность по дальности зависит от длительности сигнала: чем меньше длительность зондирующего сигнала, тем лучше получается разрешающая способность. Поэтому в качестве зондирующих сигналов должны использоваться короткие видеоимпульсы. Однако необходимо учитывать, что пьезопреобразователи имеют конечную полосу пропускания в окрестности резонансной частоты, и видеоимпульс, проходя через них, превращается в знакопеременный радиоимпульс. Как показано в [3], минимальную длительность при фиксированной ширине спектра имеет гауссов импульс.

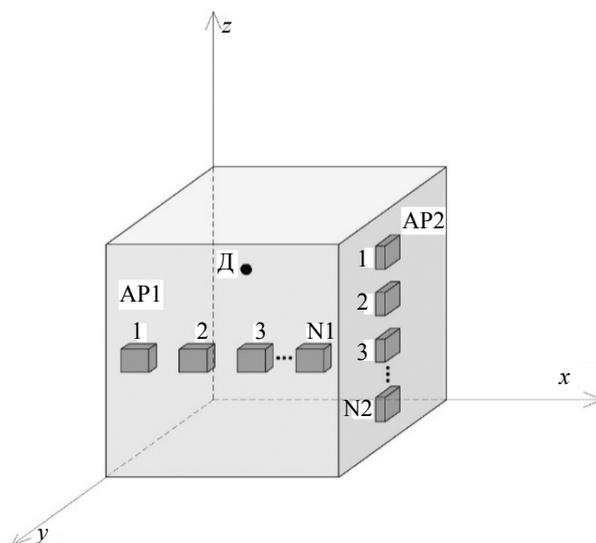


Рис. 1. Схема зондирования объекта.

Учитывая это обстоятельство, в качестве математической модели реального зондирующего сигнала при математическом моделировании мы будем рассматривать короткий радиоимпульс с гауссовой огибающей:

$$f(t) = U \exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right) \cos(\omega_0 t), \quad (1)$$

где  $U$  — амплитуда сигнала;  $\omega_0$  — центральная частота спектра;  $\tau$  — параметр, характеризующий ширину огибающей.

Зондирующий сигнал с гауссовой огибающей может быть получен при прохождении короткого видеоимпульса через преобразователи, форма частотной характеристики которых близка к гауссовой кривой. Параметр  $\tau$  выбирается таким образом, чтобы обеспечить минимальный уровень боковых лепестков сигнала, что позволяет минимизировать уровень ложных сигналов при возможности его практической реализации. На рис. 2а приведена временная диаграмма радиоимпульса с гауссовой огибающей при  $\tau = 3,33/\omega_0$ , а на рис. 2б — его спектр.

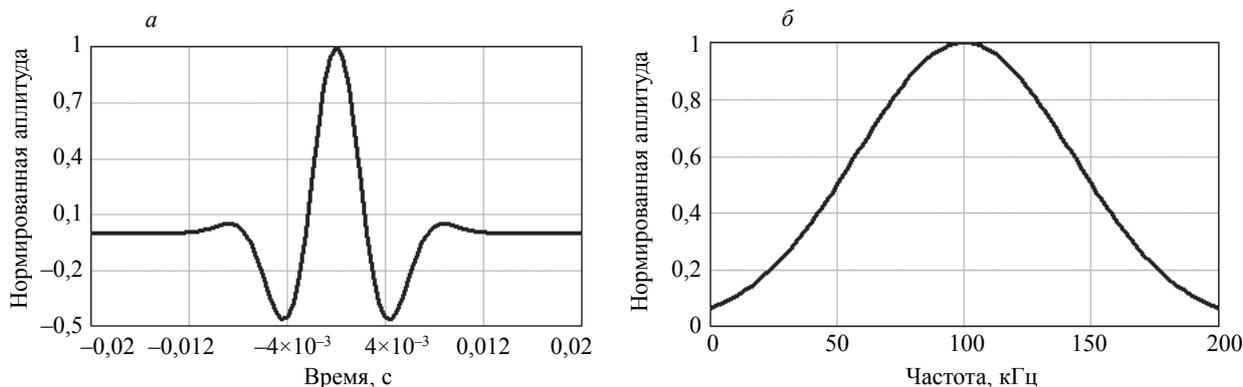


Рис. 2. Зондирующий сигнал (а) и его спектр (б).

Сигнал с параметром  $\tau = 3,33/\omega_0$  во временной области имеет незначительный уровень положительных боковых лепестков (около 3%), что позволяет минимизировать уровень ложных сигналов. Если уменьшить значение параметра  $\tau$ , уровень боковых лепестков станет еще меньше, однако практическая реализация такого сигнала может оказаться проблематичной. Поэтому рассматриваемый сигнал близок к предельно достижимому, а разрешающую способность метода при использовании такого сигнала можно рассматривать как потенциально возможную.

Еще одно преимущество рассматриваемого сигнала состоит в том, что если при обработке сигналов проводить ограничение сигналов снизу (т.е. обнулять отрицательные значения сигналов), то оставшаяся часть сигнала будет представлять собой видеоимпульс длительностью в половину периода колебания с частотой  $\omega_0$ . Это позволит реализовать максимально возможную разрешающую способность при заданной частоте зондирующего сигнала.

### АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ОБЪЕКТА

Возможны различные варианты алгоритмов обработки сигналов, позволяющих построить изображение внутренней структуры объектов применительно к схеме размещения преобразователей, приведенной выше на рис. 1.

Наиболее простой алгоритм, позволяющий построить изображение при минимальном числе математических операций, использует только один излучающий преобразователь (ИП), входящий в состав антенной решетки AP1, расположенной на передней стороне объекта (см. рис. 1). Все остальные преобразователи в обеих антенных решетках работают как приемные. Зондирующий сигнал отражается от дефектов и элементов структуры объекта; отраженные сигналы принимаются приемными преобразователями, усиливаются и сохраняются в памяти компьютера для последующей обработки. Сигнал, принимаемый  $i$ -м приемным преобразователем антенной решетки AP1, обозначим как  $u1_i(t)$ , а сигнал, принимаемый  $j$ -м преобразователем решетки AP2, — как  $u2_j(t)$ .

Зондирующий сигнал, отраженный от заданной точки P и пришедший на приемные преобразователи, можно записать в виде:  $u1_i(t) = A \cdot f(t - t_{1i})$  для  $i$ -го приемного преобразователя антенной решетки AP1 и  $u2_j(t) = A \cdot f(t - t_{2j})$  для  $j$ -го преобразователя решетки AP2. Коэффициент  $A$  пропорционален коэффициенту отражения зондирующего сигнала в выбранной точке,  $f(t)$  — функция, описывающая форму зондирующего сигнала. Временные задержки сигналов  $t_{1i}$  и  $t_{2j}$  вычисляются по формулам:  $t_{2j} = l_{2j} / C$ ,  $t_{1i} = l_{1i} / C$ , где  $C$  — скорость УЗ волны;  $l_{1i}$  — длины путей от ИП до выбранной точки P и далее до  $i$ -го преобразователя антенной решетки AP1;  $l_{2j}$  — длины путей от ИП до выбранной точки P и далее до  $j$ -го преобразователя антенной решетки AP2.

Сигналы, пришедшие на приемные преобразователи, суммируются с такими задержками, чтобы обеспечить синхронное сложение всех сигналов, отраженных от выбранной точки P. Практически у принятых сигналов берется единственное значение, соответствующее задержке при отражении от выбранной точки P, и эти значения суммируются. В результате при суммировании сигналов, принятых преобразователями антенной решетки AP1 получается значение  $S1 = N_1 A \cdot f(0)$ , где  $N_1$  — число приемных преобразователей AP1. Аналогично для антенной решетки AP2 получается значение  $S2 = N_2 A \cdot f(0)$ , где  $N_2$  — число приемных преобразователей AP2.

После этого сигналы от обеих антенных решеток подвергаются одностороннему ограничению (т.е. обнуляются отрицательные значения) и перемножаются:

$$S0(x, y, z) = S1_{\text{огр}} \cdot S2_{\text{огр}}, \quad (2)$$

$$\text{где } S1_{\text{огр}} = \begin{cases} S1, & \text{если } S1 > 0 \\ 0, & \text{если } S1 \leq 0 \end{cases}, \quad S2_{\text{огр}} = \begin{cases} S2, & \text{если } S2 > 0 \\ 0, & \text{если } S2 \leq 0 \end{cases}$$

В результате для каждой точки пространства получается значение  $S0$ , пропорциональное квадрату коэффициента отражения от выбранной точки P с координатами  $(x, y, z)$ , а также оно зависит от напряженности поля, формируемого излучателями в данном конкретном месте. Повторяя эту процедуру для других точек пространства, можно получить изображение внутренней структуры объекта. Реализация этого алгоритма подробно рассмотрена в [8]. В результате расчетов в соответствии с изложенным выше алгоритмом получаются значения  $S0$ , пропорциональные квадрату коэффициента отражения. Это бывает удобно, если нужно выделить сильный сигнал и уменьшить более слабые, например, ослабить отражения от структурных неоднородностей материала. Если же нужно получить «пропорциональную» картину, то из результатов расчетов величины  $S0$  следует извлекать квадратный корень.

Недостатком рассмотренного выше простого алгоритма является наличие «слепых» зон, где происходит подавление слабого сигнала более сильным. Если расстояния для двух отражателей различаются на половину длины волны, то максимум одного сигнала накладывается на отрицательный полупериод второго и происходит их взаимная компенсация. Если сигналы имеют одинаковую

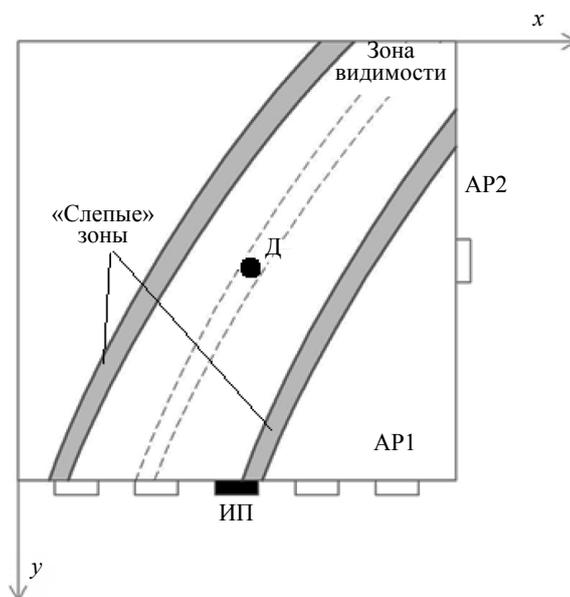


Рис. 3. Схема образования «слепых» зон.

амплитуду, то каждый из них ослабляется не более чем в 2 раза, и они хорошо различимы на изображении структуры объекта. Если же сигналы различаются по амплитуде более чем в 2 раза, то происходит полное или почти полное подавление более слабого сигнала. При этом сильный сигнал ослабляется незначительно. «Слепые» зоны, где происходит подавление слабых сигналов, имеют вид эллипсоидных полос (см. рис. 3).

Каждому сильному отражателю соответствуют две таких полосы, ширина каждой из них приблизительно равна  $\lambda / (2\sqrt{2})$ . Между ними располагается зона, где сигналы совпадают по фазе. Если слабый сигнал попадает в эту зону, то он, складываясь с сильным сигналом, как бы усиливается в несколько раз.

Подавление слабых сигналов — явление неопасное и даже желательное, если надо выделить один сигнал от наиболее сильного отражателя. Однако, если нужно получить полную информацию о структуре объекта, с этим явлением необходимо бороться.

Если не усложнять систему преобразователей, то наиболее простой выход из положения состоит в следующем. Зондирование нужно проводить с помощью нескольких ИП, работающих поочередно и расположенных в разных местах антенной решетки AP1. При этом положение «слепых» зон, которые представляют собой узкие полосы, будет меняться. После каждого зондирования производится обработка принятых сигналов в соответствии с изложенным выше алгоритмом и формируется изображение структуры объекта. Изображения, полученные с помощью разных ИП, суммируются. При этом, если слабый отражатель попал в «слепую» зону при одном положении ИП, то при другом положении ИП велика вероятность, что он в «слепую» зону не попадет. Если число зондирований из разных позиций достаточно велико, то происходит сглаживание, а после извлечения квадратного корня картина еще больше нивелируется и, в итоге, картина слабо отличается от истинной.

Чем больше число излучающих преобразователей, тем лучше качество изображения. В предельном случае мы получаем режим SAFT или SAFT-C [4, 5], когда каждый элемент решетки AP1 поочередно работает как излучающий. Этот режим не только позволяет получить высокое качество изображения, но и обеспечивает эффективное подавление шумов.

Если возникает задача получения адекватного изображения наиболее простыми методами, то число излучающих преобразователей должно быть не меньше трех.

### ОЦЕНКА РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

Оценка разрешающей способности рассматриваемого метода проводилась с помощью математического моделирования. Моделирование осуществлялось в пакете прикладных программ MATLAB. В качестве зондирующего сигнала использовался короткий радиоимпульс с гауссовой

огibaющей, описываемый выражением (1) при заданном  $\tau = 3,33/\omega_0$ . Такой сигнал после операции ограничения имеет незначительный уровень боковых лепестков (около 0,03), которые практически не влияют на качество изображения. Использовать еще более короткие импульсы не имеет смысла, так как это практически не улучшит разрешающую способность, а формирование таких сигналов может представлять неоправданно сложную задачу. Поэтому можно считать, что результаты данного моделирования позволяют оценить потенциальную разрешающую способность метода.

Предполагалось, что отражатели — точечные, а отраженная УЗ волна будет равномерно рассеиваться во всех направлениях. При моделировании не учитывались ослабление сигнала в процессе распространения и диаграммы направленности преобразователей. Эти факторы слабо влияют на разрешающую способность, пока отношение сигнал/шум остается достаточно большим. Однако при сильном частотно-зависимом затухании УЗ волн в среде спектр сигнала сужается и смещается в сторону более низких частот. При этом длительность сигнала увеличивается, что приводит к ухудшению разрешающей способности.

Разрешающая способность в разных направлениях определяется разными физическими процессами: в плоскости  $xOy$  она определяется точностью измерения задержки сигналов, а в направлении координаты  $z$  — фокусировкой УЗ волн антенной решеткой АР2. Поэтому разрешающую способность в разных направлениях мы будем рассматривать отдельно.

Для оценки потенциальной разрешающей способности нет необходимости моделировать полный алгоритм обработки сигналов. Достаточно использовать простейший алгоритм, в котором работает только один излучающий преобразователь.

При моделировании предполагалось, что каждая АР содержала 21 элемент. Шаг АР (расстояние между соседними элементами) составлял  $0,75\lambda$ , апертура каждой АР —  $15\lambda$ . Моделировалось отражение от двух точечных отражателей, расположенных напротив середины каждой АР на небольшом расстоянии друг от друга; расстояние до каждой АР составляло около  $10\lambda$ .

Рассмотрим сначала разрешающую способность в плоскости  $xOy$ . Как показали результаты моделирования, разрешающая способность зависит от взаимного расположения отражателей и от степени различия коэффициентов отражения от этих отражателей. Наилучшая разрешающая способность получается, если отражатели равновеликие. В этом случае два отражателя успешно различаются, если расстояние между ними вдоль координаты  $x$  превышает  $0,6\lambda$  (см. рис. 4б) или если расстояние между ними вдоль координаты  $y$  превышает  $0,2\lambda$  (см. рис. 5).

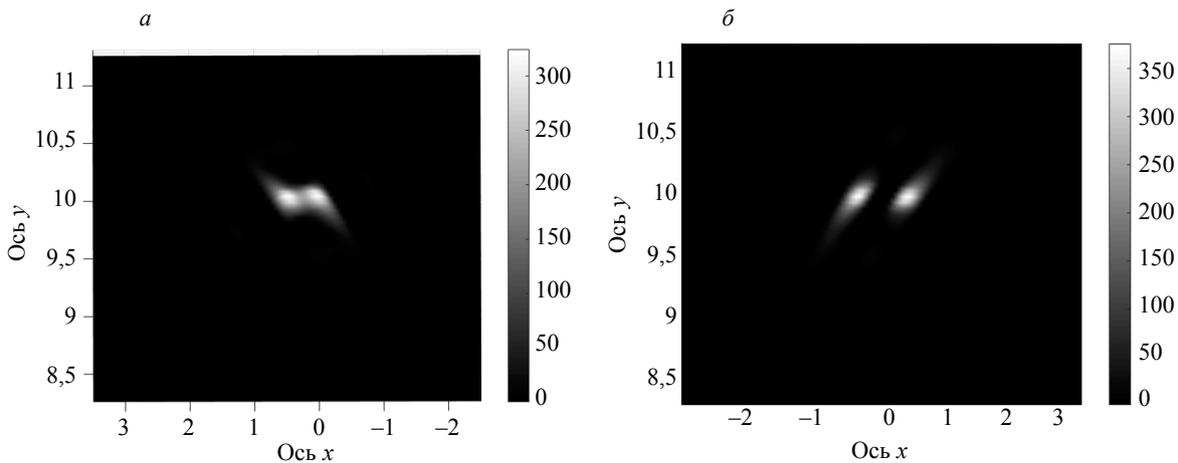


Рис. 4. Изображение двух точечных отражателей, разнесенных в направлении оси  $x$  на  $0,5\lambda$  (а) и на  $0,7\lambda$  (б).

В промежуточных направлениях разрешающая способность принимает промежуточные значения. При очень маленьком расстоянии между отражателями отраженные сигналы частично накладываются друг на друга и происходит их частичная взаимная компенсация: у верхнего отражателя ослабляется правая сторона, а у нижнего — левая. В результате на изображении (рис. 5а) они оказываются не точно один над другим, хотя в модели для них установлены одинаковые значения координаты  $x$ . При увеличении расстояния между отражателями (рис. 5б) этот эффект перестает проявляться.

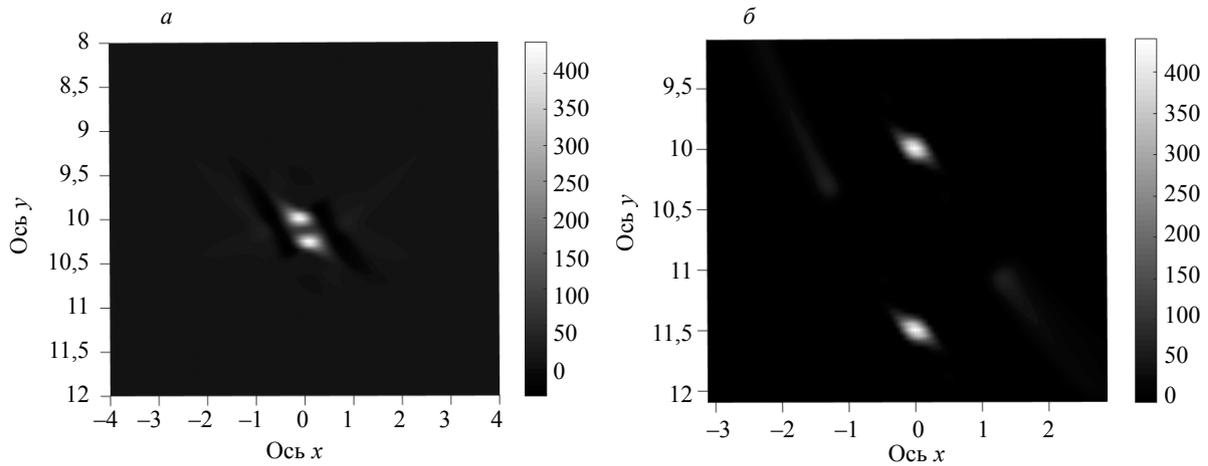


Рис. 5. Изображение двух точечных отражателей, разнесенных в направлении оси  $y$  на  $0,21\lambda$  ( $a$ ) и на  $1,5\lambda$  ( $b$ ).

Изображения на рис. 4 и 5 соответствуют предельной разрешающей способности, когда равновеликие сигналы, отраженные от соседних отражателей, разнесены во времени только на половину периода, поэтому частично компенсируют друг друга, но все же хорошо различимы. Но если при таком же расстоянии между отражателями сигналы различаются по амплитуде более, чем в 2 раза, то происходит подавление слабого сигнала сильным. Поэтому для отражателей разной величины разрешающая способность получается в 2 раза хуже, чем для одинаковых отражателей.

Разрешающая способность в направлении координаты  $z$  обеспечивается антенной решеткой AP2. Чем больше размер апертуры AP2, тем лучше разрешающая способность. Однако при очень больших размерах апертуры антенной решетки AP2 рост разрешающей способности замедляется из-за того, что сигнал на крайние элементы AP2 приходит более ослабленным, чем на центральные элементы решетки. Этот эффект усиливается при сильном затухании УЗ волн в среде, а также из-за того, что ДН преобразователей, входящих в состав AP2, не является все-направленной. В качестве примера на рис. 6 представлены графики сечения изображения двух отражателей, расположенных на расстоянии  $2\lambda$  друг от друга при числе элементов решетки AP2  $N_2 = 21$  (рис. 7а) и  $N_2 = 51$  (рис. 6б).

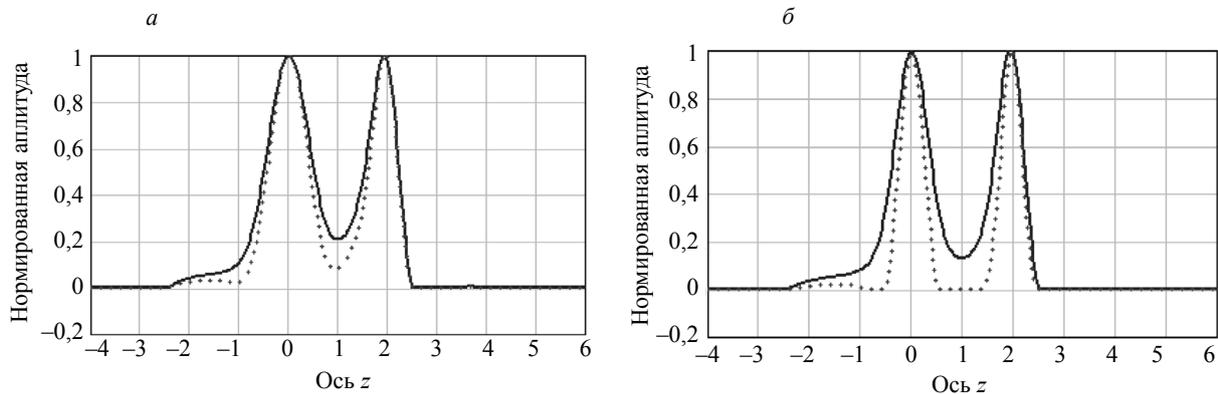


Рис. 6. Сечение изображения двух точечных отражателей, разнесенных в направлении оси  $z$  на  $2\lambda$ :  $a$  — при 21-элементной решетке AP2;  $b$  — при 51-элементной решетке AP2.

Шаг антенной решетки предполагался равным  $0,8\lambda$ , расстояние от отражателей до решетки AP2 —  $10\lambda$ . Пунктирная линия соответствует идеальному варианту, когда ДН преобразователей — всенаправленные, а затухание УЗ волн в среде отсутствует. Сплошная линия соответствует ситуации, когда ДН преобразователей описывается выражением  $F(\theta) = \cos \theta$ , а затухание УЗ волн в среде составляет 0,2 непера на длину волны или 44 дБ/м при длине волны 40 мм (усредненные данные

для бетонных конструкций). Анализируя результаты моделирования, можно сделать вывод, что нет смысла использовать антенные решетки с очень большой апертурой; размер апертуры решетки AP2 не должен сильно превышать расстояние от AP2 до исследуемой области объекта контроля.

### НЕКОТОРЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Проведенный анализ позволяет сформулировать некоторые рекомендации по выбору параметров антенных решеток.

В отличие от антенной решетки AP2, размеры апертуры решетки AP1 почти не влияют на разрешающую способность по координате  $z$ . Основное предназначение этой AP — препятствовать формированию ложных сигналов (формированию изображений ложных отражателей). Ложные изображения могут возникать при маленькой апертуре решетки AP1, когда объект контроля содержит несколько отражателей. В процессе обработки сигналов может сложиться ситуация, когда при перемножении сигналов  $S1$  и  $S2$  в соответствии с формулой (2) накладываются друг на друга и перемножаются сигналы, принадлежащие разным отражателям. В результате формируется ложное изображение отражателя. Чтобы это не происходило, необходимо осуществлять предварительную пространственную селекцию отражателей с помощью антенной решетки AP1. Для этого решетка AP1 должна иметь достаточно большую апертуру. Как показали результаты моделирования, для успешного выполнения этой функции размеры апертуры решетки AP1 должны быть не меньше, чем расстояние до обследуемой области контролируемого объекта.

При оценке разрешающей способности с помощью математического моделирования шаг обеих AP был принят равным  $0,75\lambda$ . Однако, как показали последующие исследования, такие же результаты получаются при шаге AP, равном длине волны или даже чуть больше. Но если шаг AP превышает  $1,2\lambda$ , возможно формирование ложных сигналов.

Преобразователи, входящие в состав антенных решеток, должны иметь широкую диаграмму направленности. Это могут быть либо малоапертурные преобразователи продольных акустических волн с диаграммой направленности вида  $F(\theta) = \cos \theta$ , либо преобразователи с сухим точечным контактом [6, 7], имеющие еще более широкую диаграмму направленности.

Второе требование, предъявляемое к преобразователям, — широкая полоса пропускания. Она должна быть достаточной для прохождения рассмотренных выше сверхширокополосных радиоимпульсов. При недостаточно широкой полосе пропускания преобразователей длительность зондирующих импульсов будет увеличиваться, что приведет к ухудшению разрешающей способности.

Возможны различные модификации рассматриваемого метода УЗ дефектоскопии. Например, не всегда есть возможность разместить многоэлементную AP на боковой поверхности. В этих случаях приходится ограничиться короткой антенной решеткой или даже единичным приемным преобразователем на боковой поверхности объекта. Такая конфигурация антенной системы не позволяет получить разрешение в направлении координаты  $z$ , но наличие даже одного приемного преобразователя на боковой поверхности объекта в сочетании с изложенным выше алгоритмом позволяет в несколько раз увеличить разрешающую способность в направлении координаты  $x$  по сравнению с традиционной схемой, когда используется только одна антенная решетка на передней поверхности объекта. На рис. 7 приведены результаты моделирования при разном количестве элементов в AP.

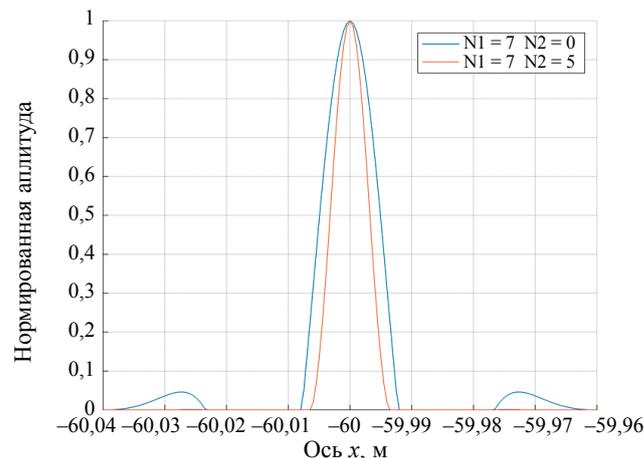


Рис. 7. Сечения для разных размеров антенной решетки в направлении координаты  $x$ .

Рассмотренную антенную систему можно модифицировать для того, чтобы получить хоть какую-то разрешающую способность в направлении координаты  $z$ . Для этого можно каждый элемент антенной решетки AP1 выполнить в виде нескольких параллельно соединенных преобразователей, расположенных по прямой линии, параллельной оси  $z$ .

Основная область применения рассматриваемого метода, как нам представляется, — неразрушающий контроль строительных конструкций из бетона и других материалов с неоднородной структурой. Метод может быть использован и для контроля состояния круглых колонн; при этом антенная решетка AP1 должна иметь дугообразную форму и должны быть скорректированы расчетные формулы, которые используются в алгоритме обработки сигналов.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для проверки работоспособности предложенного метода был проведен эксперимент. В качестве объекта контроля использовался бетонный блок (марка бетона М300) с размерами  $350 \times 400 \times 280$  мм (см. рис. 8) с искусственным дефектом в виде отверстия. Диаметр отверстия равен 50 мм. В качестве зондирующего сигнала был взят один период синуса длительностью 20 мкс и амплитудой 10 В. Для такого сигнала центральная частота 50 кГц, ширина спектра 50 кГц. Выбор такой низкой частоты обусловлен неоднородностью внутренней структуры бетона, приводящей к высокому значению затухания ультразвуковых колебаний.

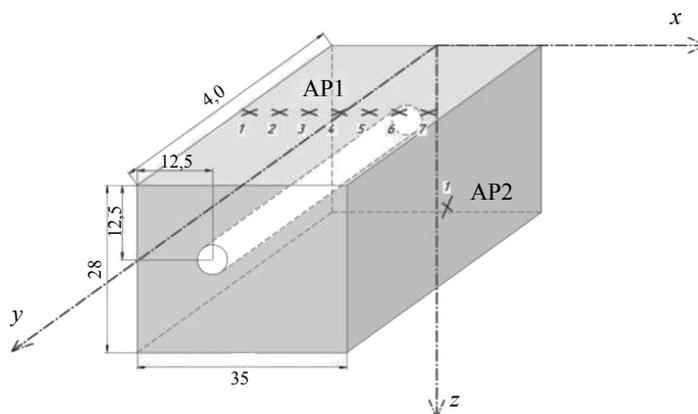


Рис. 8. Объект контроля.

Для возбуждения и приема продольных волн использовались пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) фирмы «Акустические контрольные системы» с артиклем S1803. Датчики были объединены в две AP — AP1 и AP2, которые располагались сверху и сбоку контролируемого объекта, соответственно (рис. 9). Расстояние между соседними элементами AP  $d = 30$  мм.

Результаты эксперимента представлены на рис. 9. В зависимости от числа элементов, входящих в состав антенных решеток AP1 и AP2, изменялась картина изображения. Картина внутренней структуры, представленная на рис. 9а, содержит ложные отражатели и не позволяет получить изображение отверстия. Это связано с недостаточным числом ПЭП AP1. Добавление даже одного элемента второй антенной решетки AP2 приводит к существенному улучшению изображения даже при недостаточном числе элементов AP1 и позволяет получить изображение отверстия (рис. 9б), что подтверждает эффективность предложенного метода. Увеличение числа элементов решетки AP1 приводит к улучшению качества изображения, что видно из сравнения рис. 9а и 9в.

Добавление элементов антенной решетки AP2, расположенной на боковой поверхности, приводит к улучшению разрешающей способности и, соответственно, к улучшению качества изображения внутренней структуры объекта, что видно из сравнения рис. 9в и 9г.

Для сравнения приведем картину изображения (см. рис. 10) при обычном алгоритме SAFT-C.

Результаты проведенных экспериментов показали, что в случае использования предложенного алгоритма обработки пятно имеет более выраженный цвет и очертание, что говорит о лучшей разрешающей способности.

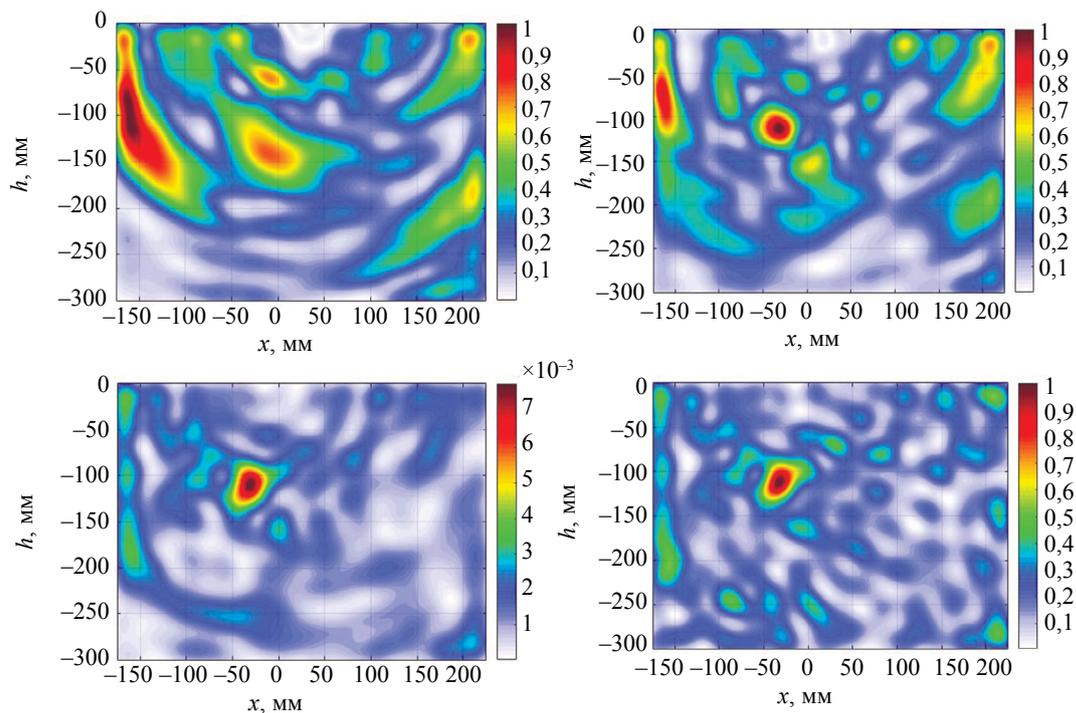


Рис. 9. Картина внутренней структуры объекта при разном количестве элементов на передней N1 и боковой стенке N2: *a* — N1 = 4, N2 = 0 (боковой решетки нет); *b* — N1 = 4, N2 = 1; *c* — N1 = 7, N2 = 0 (боковой решетки нет); *d* — N1 = 7, N2 = 5.

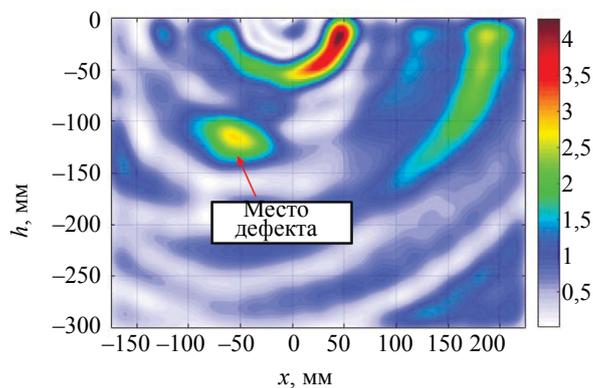


Рис. 10. Картина внутренней структуры объекта N1 = 7, N2 = 5 при использовании классического алгоритма SAFT-C.

Вдобавок, когда требуется высокое быстродействие при минимальных аппаратно-вычислительных ресурсах, можно использовать только один элемент боковой антенной решетки AP2.

## ВЫВОДЫ

Специфика рассмотренного метода УЗ дефектоскопии состоит в том, что кроме антенной решетки, контактирующей с одной из поверхностей объекта, используются дополнительные приемные преобразователи на боковой поверхности объекта. В сочетании со сверхширокополосным зондирующим сигналом и своеобразным алгоритмом обработки это позволяет в несколько раз увеличить фронтальную разрешающую способность, а при использовании достаточно большой антенной решетки на боковой поверхности объекта — получить трехмерное изображение внутренней структуры объекта. Наиболее перспективная область применения метода — неразрушающий контроль строительных конструкций из бетона и других строительных материалов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ) в рамках научного проекта № 19-38-90223.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зацепин А.Ф.* Акустический контроль: учебное пособие / А. Ф. Зацепин; под. общ. ред. В.Е. Щербина. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2016. 211 с.
2. *Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н.* Импульсный эхометод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29—41.
3. *Харкевич А.А.* Спектры и анализ / Изд. 5-е. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 240 с.
4. *Schickert M., Krause M., Müller W.* Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique // Journal of Materials in Civil Engineering. 2003. V. 15. P. 235—246.
5. *Базулин Е.Г.* Восстановление изображения отражателей методом C-SAFT с учетом анизотропии материала объекта контроля // Дефектоскопия. 2015. № 4. С. 42—52.
6. *Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г.*, Ультразвуковой низкочастотный преобразователь // Патент РФ № 2082163. Бюлл. изобр. № 17. 1997.
7. *Данилов В.Н., Самокрутов А.А., Люткевич А.М.* Теоретические и экспериментальные исследования малоапертурных прямоугольных преобразователей // Контроль. Диагностика. 2003. № 7. С. 29—33.
8. *Kartashev V.G., Trunov E.I., Shalimova E.V.* Effective ultrasonic flaw detection method / Proceedings of the 2nd 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2020. 2020. С. 9059192.