

УДК 620.179

Оптимизация шага перемещения датчика при ультразвуковой толщинометрии объектов из материалов с неоднородной структурой

В. Г. Карташев*, Али Зайд Салех Салем, А. С. Фадин

Исследовано влияние шага перемещения датчика на величину отношения сигнал/структурный шум при измерении толщины объектов из неоднородных материалов ультразвуковым эхо-методом. Датчик содержит один излучающий и один приемный преобразователи; каждый преобразователь имеет круглую апертуру диаметром несколько длин волн. Предполагалось, что размеры области зондирования объекта фиксированные; датчик перемещается в пределах этой области с определенным шагом. Анализ проводился как теоретически, так и экспериментально. В результате теоретического анализа было установлено, что существует оптимальный шаг перемещения датчика, равный половине диаметра апертуры преобразователя. При шаге перемещения датчика больше оптимального отношение сигнал/структурный шум пропорционально квадратному корню из числа зондирований; при шаге перемещения меньше оптимального отношение сигнал/структурный шум остается постоянным, несмотря на увеличение числа зондирований.

Эксперимент проводился с чугуном образцом толщиной 100 мм. Датчик состоял из двух преобразователей с диаметром апертуры 20 мм. В качестве зондирующего сигнала использовался короткий радиопульс — один период синусоиды. Частота зондирующего сигнала — 1,8 МГц. Датчик перемещали по поверхности изделия с различным шагом; из каждого положения зондировали объект; принятые сигналы сохранялись в памяти компьютера и затем обрабатывались.

Результаты эксперимента полностью совпали с теоретическими показателями. Оптимальный шаг перемещения датчика оказался равным половине диаметра апертуры преобразователя. На основании полученных результатов составлены практические рекомендации о выборе шага перемещения датчика при измерении толщины изделий из материалов с неоднородной структурой.

Ключевые слова: ультразвуковая толщинометрия, шаг перемещения, материалы с неоднородной структурой.

* KartashevVG@mpei.ru

При измерении толщины объектов из неоднородных материалов ультразвуковым (УЗ) эхо-методом обычно используются датчики, состоящие из одного излучающего и одного приемного преобразователей.

Основной помехой при зондировании неоднородных материалов является структурный шум (СШ), возникающий в результате отражения зондирующего сигнала от многочисленных неоднородностей объекта. Интенсивность СШ часто бывает настолько велика, что полезный сигнал, отраженный от задней границы изделия, становится неразличимым на его фоне. В этих случаях используют многократное зондирование объекта из разных позиций с последующим суммированием (накоплением) принятых сигналов. При этом возникает вопрос о необходимом числе зондирований и выборе шага перемещения датчика. Обычно площадь поверхности изделия, доступная для зондирования, бывает ограниченной, поэтому количество зондирований N и шаг перемещения датчика d взаимосвязаны. Оптимальный шаг перемещения зависит от корреляционных характеристик структурного шума.

При небольшом числе зондирований и, соответственно, большом шаге перемещения датчика реализации СШ в соседних положениях датчика не коррелированы. При этом амплитуда сигнала получается в N раз больше, а эффективное напряжение СШ — в \sqrt{N} раз больше, чем при однократном зондировании. В результате отношение сигнал/СШ увеличивается в \sqrt{N} раз по сравнению с однократным зондированием.

При маленьком шаге перемещения датчика соседние реализации СШ оказываются 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. Следовательно, существует оптимальный шаг перемещения датчика, который зависит от корреляционных характеристик СШ.

Вопрос о выборе шага перемещения датчика при измерении толщины объектов с помощью ультразвукового зондирования рассматривался в [1]. В этой работе предполагалось, что в датчике используются малоапертурные преобразователи с широкой диаграммой направленности. Однако на практике в таких датчиках чаще используются преобразователи с апертурой в несколько длин волн и сравнительно узкой диаграммой направленности. Очевидно, что корреляционные характеристики реализаций СШ при использовании таких преобразователей отличаются от тех, которые получаются при использовании малоапертурных преобразователей. Поэтому и величина оптимального шага перемещения датчика тоже получится иной.

Для определения оптимального шага перемещения датчика нужно сначала найти взаимнокорреляционные характеристики реализаций СШ. Для определенности рассмотрим датчик с преобразователями круглой фор-

мы (рис. 1), который может перемещаться по поверхности изделия в направлении координат x и y . Обозначим диаметр апертуры каждого преобразователя как D .

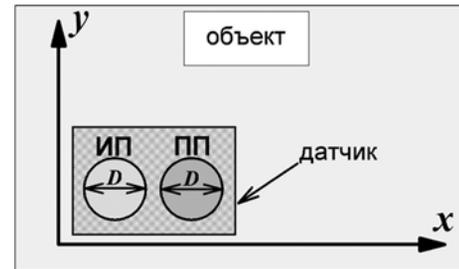


Рис. 1. Схема зондирования объекта:

ИП, ПП — излучающий и приемный преобразователи

Как показано в [2], диаграмма направленности круглого раскрыва с апертурой D описывается выражением

$$F(\theta) = \Lambda_1\left(\frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta\right),$$

где $\Lambda_1(x)$ — лямбда-функция, $\Lambda_1(x) = \frac{2}{x} J_1(x)$.

Для определения взаимнокорреляционных характеристик СШ в соседних положениях датчика нужно сначала решить вспомогательную задачу об определении взаимнокорреляционных характеристик СШ, предполагая, что излучающий преобразователь неподвижен, а перемещается только приемный преобразователь. Методика решения задачи изложена в [3, 4].

Сначала определяется двумерная плотность вероятности $p(\theta, \varphi)$:

$$p(\theta, \varphi) = k \sin \theta [F(\theta, \varphi)]^2, \quad (1)$$

где θ — угол, отсчитываемый от нормали к поверхности объекта; φ — азимутальный угол, который отсчитывается от оси x ; $F(\theta, \varphi)$ — диаграмма направленности преобразователя, определяемая выражением (1); k — коэффициент, определяющийся из условия:

$$\int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\varphi=0}^{2\pi} p(\theta, \varphi) d\theta d\varphi = 1.$$

Вводятся две безразмерные переменные:

$$s_1 = \sin \theta \cos \varphi; \quad s_2 = \sin \theta \sin \varphi.$$

Физический смысл этих переменных следующий. Переместим приемный преобразователь вдоль координаты x из 1-го положения во 2-е на расстояние d . Обозначим через Δl разность путей, проходимых сигналом от некоторой неоднородности до 1-го и 2-го положений преобразователя. Тогда $s_1 = \Delta l / d$ — нормированная разность путей сигналов, иначе $s_1 = \Delta t / t_0$ — нормированная разность временных задержек сигналов (t_0 — время прохождения УЗ-сигналом пути d). Аналогично,

s_2 — это нормированная разность задержек сигналов при перемещении преобразователя вдоль координаты y .

Далее, от плотности вероятности $p(\theta, \varphi)$ перейдем к плотности вероятности $p(s_1, s_2)$:

$$p(s_1, s_2) = p(\theta, \varphi) |I|,$$

где I — якобиан преобразования.

Проведя необходимые математические преобразования, получим:

$$p(s_1, s_2) = k \frac{\Lambda_1^2 \left(\frac{\pi D}{\lambda} \sqrt{s_1^2 + s_2^2} \right)}{\sqrt{1 - (s_1^2 + s_2^2)}}.$$

Чтобы найти плотность вероятности $p(s_1)$, надо проинтегрировать $p(s_1, s_1)$ по «лишней» переменной s_2 :

$$p(s_1) = \int_{-\sqrt{1-s_1^2}}^{\sqrt{1-s_1^2}} p(s_1, s_2) ds_2.$$

Выполнив численное интегрирование по s_1 , найдем одномерную плотность вероятности $p(s_1)$ (рис. 2).

Применив к $p(s_1)$ преобразование Фурье, найдем характеристическую функцию, с помощью которой можно будет рассчитать взаимную корреляцию реализаций СШ. Графики характеристической функции при нескольких значениях диаметра апертуры D приведены на рис. 3. Аргументом характеристической функции является безразмерная частота $u = 2\pi d/\lambda = \omega d/V_\phi$, где d — расстояние между приемными преобразователями; V_ϕ — фазовая скорость УЗ-волны. Характеристическая функция $\Theta(u)$ описывает степень взаимной корреляции реализаций СШ на приемных преобразователях в зависимости от расстояния между преобразователями и частоты сигнала.

Характеристические функции убывают по закону, который близок к линейному. Это позволяет при выполнении приближенных расчетов аппроксимировать их линейными функциями. При некоторых критических значениях аргумента $u = u_k$ характеристические функции становятся равными нулю и при $u > u_k$ имеют

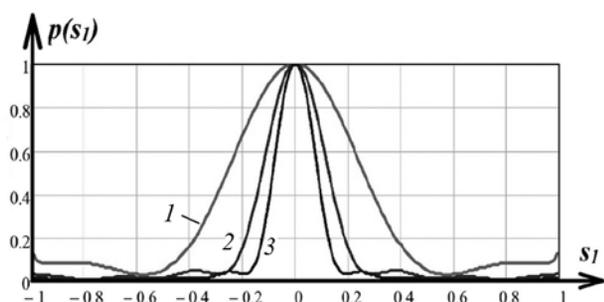


Рис. 2. Графики плотности вероятности $p(s_1)$ при использовании преобразователей с круглой апертурой при $D = 2\lambda$ (1), 4λ (2) и 6λ (3)

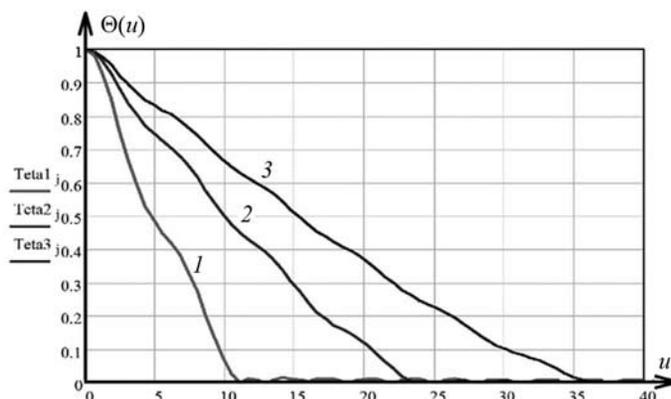


Рис. 3. Графики характеристической функции при использовании преобразователей с круглой апертурой при $D = 2\lambda$ (1), 4λ (2) и 6λ (3)

пренебрежимо малые значения, т.е. при $u > u_k$ реализации СШ на соседних преобразователях не коррелированы. Расстояние между преобразователями, которое соответствует критическому значению u_k , называют радиусом корреляции СШ r_k . Анализируя графики характеристической функции, нетрудно установить, что радиус корреляции СШ в каждом конкретном случае приблизительно равен 95% диаметра апертуры преобразователя.

Перейдем к выбору шага перемещения датчика. Для определенности примем диаметр преобразователей $D = 6\lambda$. Размер области перемещения L (расстояние между крайними положениями датчика) вдоль осей x и y примем равным 12λ . Число позиций зондирования в каждом направлении $N = D/d + 1$, где d — шаг перемещения датчика.

Обозначим U_0 амплитуду полезного сигнала, σ — эффективное напряжение СШ при однократном зондировании. При числе зондирований, равном N , амплитуда полезного сигнала будет равна NU_0 , а эффективное напряжение суммарного структурного шума $\sigma_{\text{сум}}$ — это корень из дисперсии СШ, которая вычисляется как:

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

где R_{ij} — коэффициент взаимной корреляции (нормированная взаимнокорреляционная функция) реализаций СШ в i -м и j -м положениях датчика. Для упрощения расчета будем учитывать только взаимную корреляцию реализаций СШ в соседних положениях датчика, а более удаленные корреляционные связи учитывать не будем. При этом формула (2) может быть упрощена:

$$\sigma_{\text{сум}}^2 = \sigma^2 [N + 2(N-1)R_{12}],$$

где R_{12} — коэффициент взаимной корреляции реализаций СШ в соседних положениях датчика.

Рассмотрим вопрос о выборе оптимального шага перемещения датчика для двух видов зондирующего сигнала: узкополосного и широкополосного сигналов с шириной спектра в октаву.

Для определения коэффициентов взаимной корреляции реализаций СШ можно воспользоваться графиками характеристических функций. Однако следует учесть, что приведенные графики на рис. 3 построены для ситуации, когда перемещается только приемный преобразователь. Если одновременно перемещаются и излучающий, и приемный преобразователи, то, как показано в [5], можно воспользоваться теми же графиками характеристической функции, только аргумент характеристической функции надо удваивать, т.е. полагать $u = 4\pi d/\lambda$.

В случае использования узкополосных зондирующих сигналов значения коэффициента взаимной корреляции равны значениям характеристической функции при соответствующих значениях ее аргумента. При использовании широкополосных зондирующих сигналов для определения коэффициента взаимной корреляции надо энергетический спектр СШ умножить на характеристическую функцию и проинтегрировать.

По этой методике были рассчитаны значения выигрыша в отношении сигнал/СШ по сравнению с однократным зондированием при разном числе зондирований N и фиксированном диапазоне перемещения датчика. Результаты расчетов отношения сигнал/СШ q приведены на рис. 4. При зондировании узкополосным сигналом при $N = 5$ (это соответствует шагу перемещения датчика, равному половине диаметра преобразователя D) рост отношения сигнал/СШ прекращается и при дальнейшем увеличении числа зондирований отношение сигнал/СШ почти не меняется из-за положительной взаимной корреляции реализаций СШ.

При зондировании широкополосным сигналом зависимость отношения сигнал/СШ от шага перемещения датчика получается немного сглаженной, но здесь тоже можно считать оптимальным шаг, равный поло-

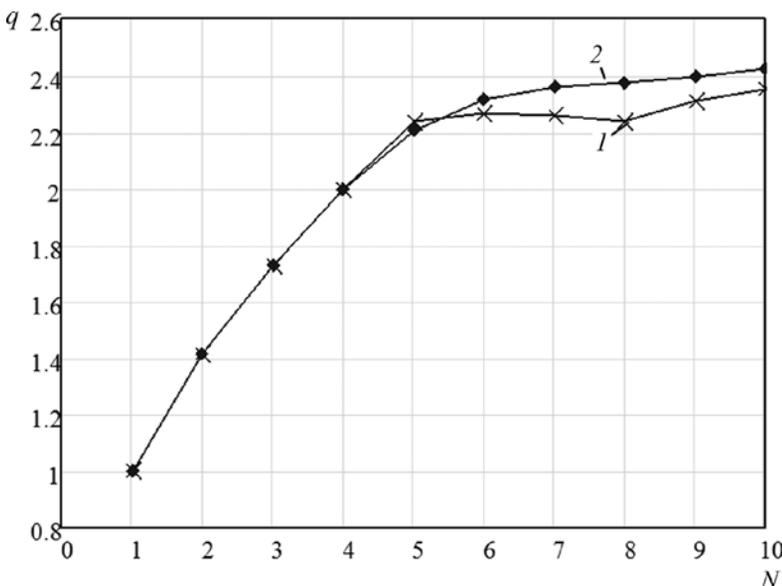


Рис. 4. Зависимость отношения сигнал/СШ от числа зондирований при разном диапазоне зондирования 12λ и диаметре апертуры преобразователей 6λ при зондировании узкополосным (1) и широкополосным (2) сигналами



Рис. 5. Экспериментальная установка

вине диаметра апертуры преобразователя, так как при дальнейшем уменьшении шага отношение сигнал/СШ увеличивается незначительно.

Для проверки основных теоретических положений было проведено экспериментальное исследование влияния шага перемещения датчика на величину отношения сигнал/СШ. Выполнялось зондирование чугунного образца толщиной 100 мм с помощью датчика, состоящего из одного излучающего и одного приемного преобразователей; каждый преобразователь имел круглую апертуру диаметром 20 мм (рис. 5). Датчик перемещался по поверхности объекта с различным шагом (от 2,5 до 30 мм), и из каждого положения производилось зондирование объекта. В качестве зондирующего сигнала использовался короткий радиоимпульс (1 период синусоиды) с несущей частотой 1,8 МГц. Количество зондирований в каждой серии опытов определялось шагом перемещения датчика и равнялось $N = L/d + 1$, где $L = 122,5$ мм — диапазон перемещения (размер области зондирования), d — шаг перемещения датчика. Принятые сигналы сохранялись в памяти компьютера и затем совместно обрабатывались. Таким образом, реализовывался метод синтезированной апертуры.

На рис. 6 приведена одна из осциллограмм принятого сигнала при однократном зондировании. Хорошо виден донный сигнал; отношение сигнал/СШ приблизительно равно 11. При шаге перемещения датчика 15 мм, когда число зондирований равно 9, отношение сигнал/СШ получается равным 32, что приблизительно в 3 раза больше, чем при одиночном зондировании. Это означает, что при таком шаге перемещения датчика взаимная корреляция реализаций СШ еще не проявляется.

При шаге перемещения датчика 10 мм, и числе зондирований 13 отношение сигнал/СШ получается равным 39, что в 3,5 раза больше, чем при одиночном зондировании. Осциллограмма соответствующего просуммированного сигнала приведена на рис. 7. При дальнейшем уменьшении шага отношение сигнал/СШ не увеличивается и остается приблизительно равным 39.

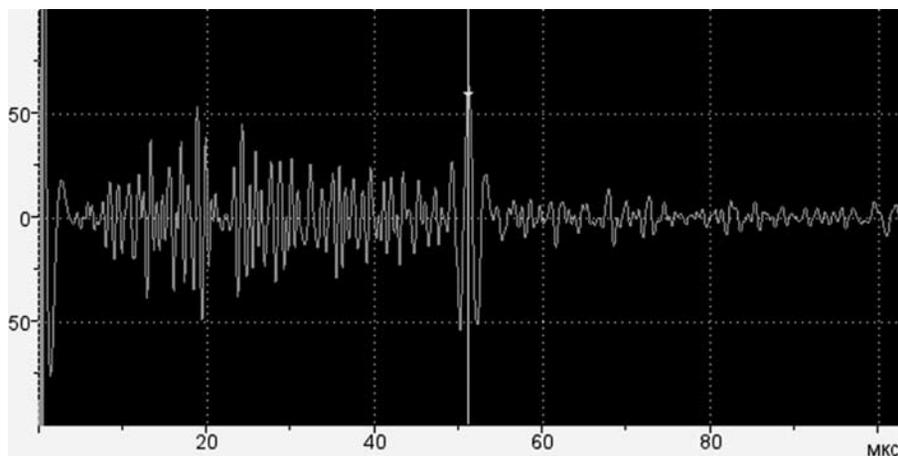


Рис. 6. Осциллограмма сигнала при однократном зондировании

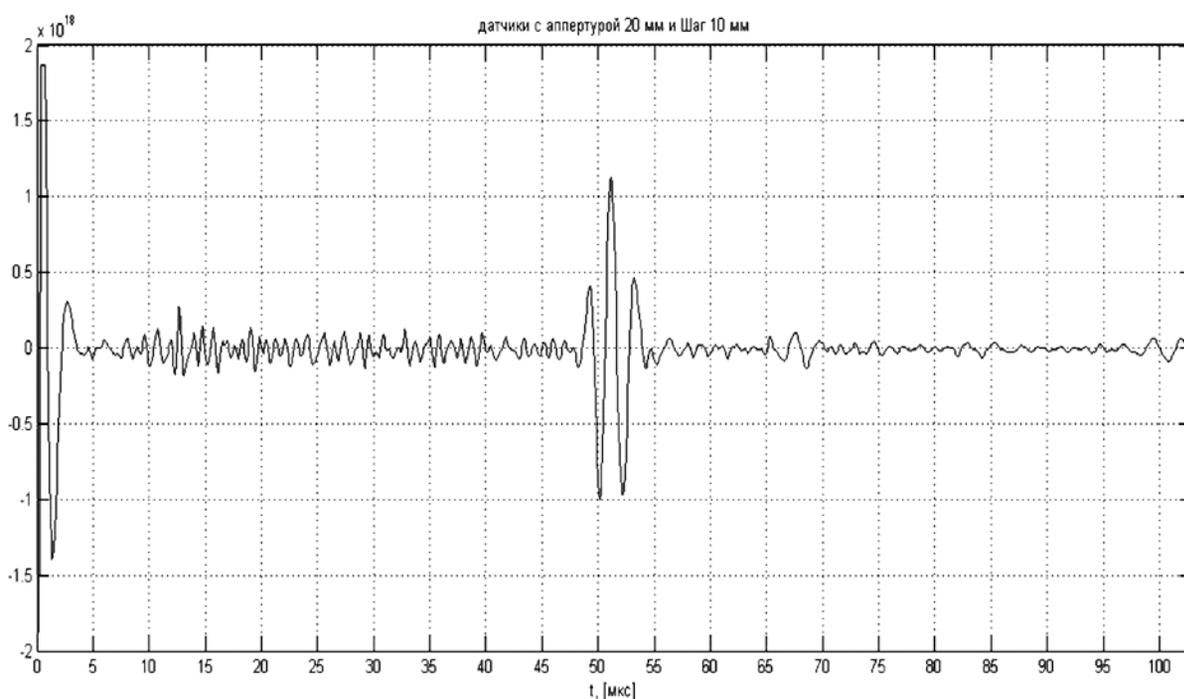


Рис. 7. Осциллограмма просуммированного сигнала при шаге 10 мм

По результатам обработки экспериментальных данных на рис. 8 построен график зависимости отношения сигнал/СШ от числа суммируемых сигналов N при фиксированном размере области зондирования L . Хорошо видно, что при $N = 13$ (при шаге $d = 10$ мм) отношение сигнал/СШ достигает максимума и при дальнейшем увеличении числа N не возрастает. Следовательно, оптимальный шаг перемещения датчика в данном случае равен 10 мм, или половине диаметра апертуры преобразователя, что соответствует изложенным выше теоретическим результатам.

Таким образом, экспериментально подтверждено наличие оптимального шага перемещения датчика при фиксированном размере области зондирования и установлено, что оптимальный шаг приблизительно равен половине размера апертуры преобразователя.

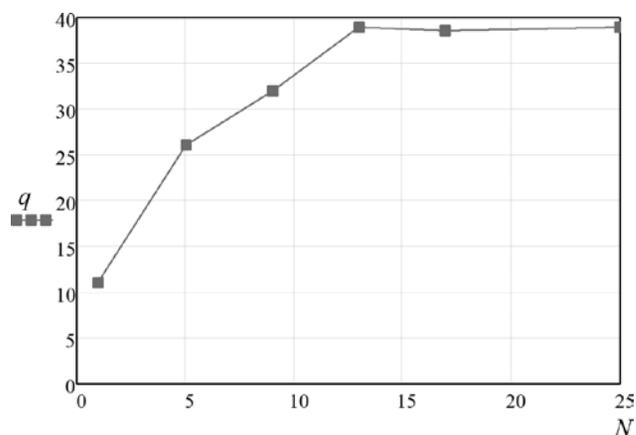


Рис. 8. График зависимости отношения сигнал/СШ от количества суммируемых сигналов при фиксированном размере области зондирования

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 15-19-00096)

Литература

1. **Карташев В.Г., Али Зайд Салех Салем.** Выбор шага антенной решетки при ультразвуковом зондировании объектов с неоднородной структурой // Радиотехнические тетради. 2014. № 53. С. 35 — 38.

2. **Марков Г.Т.** Антенны. М.: Энергия, 1975.

3. **Карташев В.Г., Севалкин Д.А.** Корреляционные характеристики структурного шума в ультразвуковой дефектоскопии // Вестник МЭИ. 2007. № 3. С. 100 — 105.

4. **Карташев В.Г., Шерцак П.В.** Построение оптимального алгоритма обработки сигналов в ультразвуковой дефектоскопии на основе уточненной модели формирования структурного шума // Вестник МЭИ. 2009. № 1. С. 57 — 62.

5. **Карташев В.Г., Шалимова Е.В.** Пространственно-временная обработка сигналов при зондировании неоднородных материалов поперечными акустическими или электромагнитными волнами с использованием метода синтезированной апертуры // Радиотехнические тетради. 2009. № 38. С. 38 — 42.

Статья поступила в редакцию 04.04.2016