

УДК 620.179.1

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-4-146-155

Определение коэффициента погонного затухания ультразвуковой волны в неоднородном материале посредством обработки реализаций структурного шума

В.Г. Карташев, А.С. Фадин, Э.И. Трунов, Али Зайд Салех Салем

Представлен новый метод измерения коэффициента затухания ультразвуковых волн в неоднородном материале посредством обработки реализаций структурного шума (СШ) с учетом характера частотной зависимости коэффициента затухания ультразвуковых волн, диаграмм направленности преобразователей и их зависимости от частоты. В качестве зондирующего сигнала предложен импульс с линейной модуляцией с большой базой. Показан алгоритм обработки реализаций структурного шума, включающий: определение закона изменения дисперсии СШ посредством интегрирования реализаций СШ в скользящем окне; процедуру исключения влияния побочных факторов; логарифмирование полученной зависимости и операцию линейной регрессии. Для уточнения результатов предложено использовать итерационный процесс с применением корректирующей функции.

Для экспериментальной проверки метода проведены измерения коэффициента затухания ультразвуковых волн в бетонном блоке как классическим теневым, так и предлагаемым методами. Хорошее совпадение результатов измерений подтвердило работоспособность нового метода; он может быть использован для мониторинга состояния крупногабаритных объектов при одностороннем доступе.

Ключевые слова: ультразвуковые волны, измерение коэффициента затухания, неоднородные материалы, структурный шум, экспериментальное подтверждение.

Для цитирования: Карташев В.Г., Фадин А.С., Трунов Э.И., Али Зайд Салех Салем. Определение коэффициента погонного затухания ультразвуковой волны в неоднородном материале посредством обработки реализаций структурного шума // Вестник МЭИ. 2017. № 4. С. 146—155. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-4-146-155.

Determining the Ultrasonic Wave Specific Attenuation Ratio in Inhomogeneous Material by Processing Structural Noise Realizations

V. G. Kartashev, A.S. Fadin, E.I. Trunov, Ali Zayed Saleh Salem

The article presents a new method for measuring the ultrasonic wave attenuation ratio in inhomogeneous material by processing structural noise (SN) realizations taking into account the frequency dependence pattern of ultrasonic wave attenuation ratio, the converter directivity characteristics and their frequency dependences. A pulse with a broad-base linear modulation is suggested to be used as the probing signal. A structural noise realization processing algorithm is proposed, which includes determination of the SN dispersion variation law by integrating SN realizations in a sliding window, a procedure for eliminating the influence of side factors, the taking of logarithm of the obtained dependence, and a linear regression operation. In order to obtain more accurate results, it is recommended to apply an iterative process with using a correction function.

For experimentally verifying the method, the ultrasonic wave attenuation ratio in a concrete block was measured using both the classical shadow method and the proposed technique. Good agreement between the measurement results has confirmed the efficiency of the new technique, which can be used for monitoring the state of bulky objects with one-sided access.

Key words: ultrasonic waves, attenuation ratio measurement, inhomogeneous materials, structural noise, experimental corroboration.

For citation: Kartashev V.G., Fadin A.S., Trunov E.I., Ali Zayed Saleh Salem. Determining the Ultrasonic Wave Specific Attenuation Ratio in Inhomogeneous Material by Processing Structural Noise Realizations. MPEI Vestnik. 2017; 4: 146—155. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-4-146-155.

Постановка задачи

Важной характеристикой, несущей информацию о состоянии структуры материала, является коэффициент погонного затухания ультразвуковой (УЗ) волны в исследуемом материале. В процессе эксплуатации любого объекта происходит старение материала, воз-

никают усталостные микротрещины и другие изменения структуры, которые можно обнаружить, измеряя коэффициент затухания УЗ-волн в материале.

Существуют различные методы измерения коэффициента затухания УЗ-волн. Наиболее простой метод основан на измерении амплитуды прошедшего сигнала. При одностороннем доступе к изделию можно измерять амплитуду донного сигнала. Однако в неко-

торых случаях размеры объекта бывают настолько велики, что донный сигнал невозможно обнаружить. В этих случаях единственным источником информации о коэффициенте затухания УЗ-волн в материале является структурный шум.

Структурный шум формируется в результате отражения зондирующего сигнала от неоднородностей материала, расположенных на различной глубине. Чем глубже расположена неоднородность, тем длиннее путь УЗ-волны до этой неоднородности и обратно и тем сильнее затухание УЗ-волны на этом пути. Вследствие этого реализации СШ убывают во времени, и скорость убывания реализации СШ зависит от коэффициента погонного затухания УЗ-волны.

Кроме коэффициента затухания УЗ-волны, скорость убывания дисперсии СШ зависит и от других факторов: от типа волны (поперечная или продольная), диаграммы направленности преобразователей и их взаимного расположения, а также от того, что коэффициент затухания УЗ-волны в среде зависит от частоты. Необходимость учета всех этих факторов сильно усложняет задачу определения коэффициента затухания УЗ-волны посредством анализа реализаций СШ

Идея метода определения коэффициента затухания УЗ-волн в неоднородном материале по скорости убывания дисперсии СШ изложена в [1]. Однако там не учитывалось, что коэффициент затухания зависит от частоты. Кроме того, в [1] анализ проводился в предположении, что для зондирования объекта используются малоапертурные преобразователи продольных акустических волн. Однако они имеют невысокий коэффициент передачи, что отрицательно сказывается на динамическом диапазоне и на точности измерения коэффициента затухания. Поэтому для зондирования объекта целесообразнее использовать преобразователи с апертурой порядка длины волны или больше. Диаграмма направленности таких преобразователей зависит от частоты, что дополнительно усложняет задачу.

Пренебрегать частотной зависимостью при анализе нельзя, потому что при исследовании СШ при зондировании объекта используются короткие радиоимпульсы или сложномодулированные сигналы с последующей согласованной фильтрацией, которые имеют широкий спектр.

Для практической реализации разрабатываемого метода предстоит решить ряд проблем, связанных с частотной зависимостью затухания УЗ-волн в среде, выбрать тип зондирующего сигнала, разработать алгоритм обработки реализаций СШ, позволяющий определить коэффициент затухания УЗ-волн в среде с максимальной точностью. Анализ этих проблем и поиску путей их решения посвящена настоящая работа.

Учет частотно-зависимого затухания ультразвуковых волн в среде

Для упрощения задачи будем считать, что излучение и приём УЗ-сигналов проводится с помощью малоапертурных преобразователей продольных акустических волн. В [1] для этого случая получено выражение, описывающее закон изменения дисперсии СШ во времени, в котором учитываются диаграммы направленности преобразователей и сферический характер УЗ-волн, но не учитывается их затухание в среде:

$$A(t') = A_0 \sqrt{(t'^2 - 1)^5} \int_0^{\pi/2} \frac{\cos^5 u du}{\sqrt{(t'^2 - \sin^2 u)^7}}, \quad (1)$$

где $t' = t/t_0$ — нормированное время; t_0 — время прохождения УЗ-волной пути, равного расстоянию между излучающим и приёмным преобразователями. График функции (1) приведен на рис. 1.

Как показано в [1], при обработке реализаций СШ с целью определения коэффициента затухания УЗ-волны нужно для устранения побочных факторов полученную экспериментально зависимость дисперсии

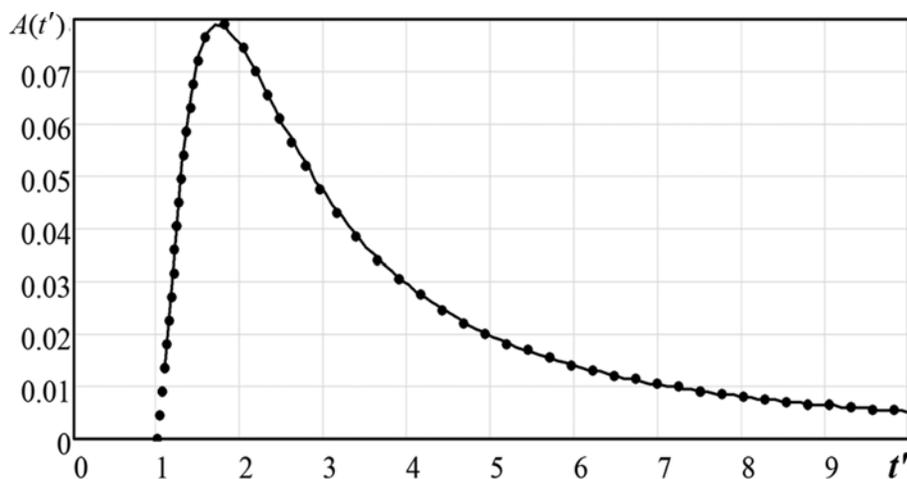


Рис. 1. График зависимости дисперсии СШ от времени при использовании малоапертурных преобразователей продольных волн без учета затухания УЗ-волн в среде (сплошная линия — расчет по точной формуле; ● — по аппроксимирующей)

СШ от времени поделить на функцию (1). Однако при этом не учитывается зависимость коэффициента затухания УЗ-волны от частоты.

В большинстве сложноструктурных материалов коэффициент затухания УЗ-волн увеличивается с ростом частоты пропорционально ω^n , где n может лежать в пределах от 1 до 2. В результате частотно-зависимого затухания высокочастотные составляющие спектра сигнала ослабляются сильнее, чем низкочастотные; при этом спектр сигнала сужается, что приводит к дополнительному уменьшению дисперсии СШ.

При распространении УЗ-волны в среде ее амплитуда уменьшается пропорционально $e^{-\delta z}$. Зависимость коэффициента погонного затухания δ от частоты представим в виде $\delta = \delta_0(\omega/\omega_0)^n$, где δ_0 — коэффициент погонного затухания УЗ-волны на частоте ω_0 . Волна, отраженная от неоднородности, расположенной на расстоянии z от преобразователей, проходит путь $2z$ и ее амплитуда уменьшается пропорционально $e^{-2\delta z}$. Поскольку энергетический спектр пропорционален квадрату амплитудного спектра, его величина на том же пути уменьшается пропорционально $e^{-4\delta z}$.

В экспериментально снятой реализации сигнал структурного шума является функцией времени t , а не координаты z . Поскольку полный путь УЗ-сигнала до неоднородности и обратно равен $2z$, связь между переменными t и z будет иметь вид $2z = Ct$, где C — фазовая скорость УЗ-волны. Поэтому вместо коэффициента погонного затухания УЗ-волны δ при описании реализации СШ следует использовать коэффициент убывания эффективного напряжения СШ во времени α , который связан с коэффициентом δ соотношением $\alpha = \delta C$ и, соответственно, $\alpha_0 = \delta_0 C$.

Составляющие СШ, сформированные отражениями от неоднородностей, расположенных на разной глубине, искажаются из-за частотно-зависимого затухания в разной степени. Из-за этого энергетический спектр СШ является функцией не только частоты, но и времени. Обозначим $W_0(\omega)$ — энергетический спектр зондирующего сигнала с учетом искажений при прохождении через преобразователи. Тогда для энергетического спектра СШ в момент времени t можно записать

$$W(\omega, t) = A(t)W_0(\omega)e^{-2\alpha_0 t \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^n}, \quad (2)$$

где $A(t)$ вычисляется по (1).

Дисперсия СШ определяется как интеграл от энергетического спектра:

$$\sigma^2(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty W(\omega, t) d\omega. \quad (3)$$

Сложность вычисления интеграла (3) зависит от вида энергетического спектра зондирующего сигнала $W_0(\omega)$ и показателя степени n . Поскольку можно выбрать любой вид зондирующего сигнала, рассмотрим

вначале простейший вариант, когда зондирующий сигнал имеет прямоугольный энергетический спектр, равный W_0 в полосе частот от ω_0 до ω_1 и нулю за пределами этой полосы частот. Близкий к прямоугольной форме спектр имеет, например, сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-импульс) с большой базой. В этом случае интеграл (3) можно записать в следующем виде:

$$\sigma^2(t) = A(t)W_0 \frac{1}{\pi} \int_{\omega_0}^{\omega_1} e^{-2\alpha_0 t \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^n} d\omega. \quad (4)$$

Для упрощения дальнейших действий введем нормированную частоту $w = \omega/\omega_0$. С учетом этого выражение (4) можно преобразовать к следующему виду:

$$\sigma^2(t) = \frac{A(t)W_0\omega_0}{\pi} \int_1^{\omega_1/\omega_0} e^{-2\alpha_0 t w^n} dw. \quad (5)$$

Интеграл (5) легко вычислить только при $n = 1$; при любых других значениях n надо использовать численные методы. Поэтому рассмотрим вначале путь решения поставленной задачи при $n = 1$. Обозначим для краткости $m = \omega_1/\omega_0$. Тогда, вычисляя интеграл (5), получим

$$\sigma^2(t) = \frac{A(t)W_0\omega_0}{\pi} \frac{e^{-2\alpha_0 t}}{2\alpha_0 t} (1 - e^{-2\alpha_0 t(m-1)}). \quad (6)$$

Из-за частотно-зависимого затухания УЗ-волн в среде при движении вдоль реализации (при увеличении t) высокочастотные составляющие спектра ослабляются сильнее, чем низкочастотные, что приводит к сужению спектра СШ и дополнительному уменьшению дисперсии. Этот дополнительный эффект зависимости дисперсии СШ от времени описывается множителем t в знаменателе выражения (6).

Анализ выражения (6) позволяет определить последовательность действий для определения коэффициента затухания α_0 по реализации СШ. Сначала нужно исключить влияние на характер дисперсии СШ побочных факторов: диаграммы направленности (ДН) преобразователей и сферического характера УЗ-волны. Для этого нужно или полученную экспериментально реализацию СШ разделить на $\sqrt{A(t)}$ и потом найти закон изменения дисперсии, или сначала найти закон изменения дисперсии СШ и затем разделить его на $A(t)$. Эта операция соответствует изъятию множителя $A(t)$ в выражении (6):

$$\sigma^2(t) = \frac{W_0\omega_0}{\pi} \frac{e^{-2\alpha_0 t}}{2\alpha_0 t} (1 - e^{-2\alpha_0 t(m-1)}). \quad (7)$$

При достаточно большом значении $\alpha_0 t$ второе слагаемое в скобках выражения (7) становится пренебрежимо малым, и тогда можно приближенно записать

$$\sigma^2(t) \approx \frac{W_0\omega_0}{\pi} \frac{e^{-2\alpha_0 t}}{2\alpha_0 t}. \quad (8)$$

Для определения коэффициента α_0 по экспериментально полученной реализации СШ нужно выбрать такой участок реализации, где сделать это наиболее просто. Анализ выражений (7), (8) показывает, что наиболее простой зависимость дисперсии СШ от времени получается при достаточно больших $\alpha_0 t$, когда справедливо выражение (8). Если это выражение умножить на t , то зависимость дисперсии от времени приобретает вид $e^{-2\alpha_0 t}$, и для определения коэффициента α_0 достаточно прологарифмировать эту зависимость.

Другой, более наглядный способ выбора рабочего участка реализации СШ состоит в следующем. Рассчитанные по формуле (7) значения дисперсии СШ умножим на t и разделим на $e^{-2\alpha_0 t}$. На рис. 2 приведен график получающейся при этом функции при ширине спектра сигнала в октаву, когда $\omega_1 = 2\omega_0$ и $m = 2$. Горизонтальная часть графика соответствует рабочему участку реализации СШ.

Представленную на рис. 2 функцию можно рассматривать как корректирующую функцию и использовать ее для уточнения искомого значения α_0 с помощью итерационного процесса. Для этого нужно значение α_0 , полученное на предыдущем этапе обработки реализации СШ, подставить в корректирующую функцию (в данном случае она имеет вид $1 - e^{-2\alpha_0 t}$), затем разделить на корректирующую функцию полученный экспериментально закон изменения дисперсии СШ во времени. В результате рабочая область реализации СШ существенно расширится в сторону меньших значений времени t , что позволит повысить точность определения коэффициента α_0 .

Такой подход можно применить в общем случае, когда показатель степени n отличается от 1 и когда форма спектра зондирующего сигнала отличается от прямоугольной.

Если спектр зондирующего сигнала имеет прямоугольную форму, то при $n \neq 1$ характер временной зависимости дисперсии СШ получается примерно такой же,

как при $n = 1$. Как показывают расчеты, при $1 < n < 1,2$ можно пользоваться корректирующей функцией $1 - e^{-2\alpha_0 t}$, такой же, как при $n = 1$. При $n > 1,2$ процедура обработки реализации СШ для определения коэффициента α_0 такая же, как при $n = 1$, но для определения рабочей области реализации СШ и для нахождения корректирующей функции нужно в каждом конкретном случае проводить дополнительные расчеты. Для этого нужно с помощью численных методов вычислить значения интеграла (4), вычисленные значения умножить на t и разделить на $e^{-2\alpha_0 t}$, т. е. нужно рассчитать и построить функцию, которая при прямоугольной форме спектра зондирующего сигнала имеет следующий вид:

$$f(t) = te^{2\alpha_0 t} \int_1^{\omega/\omega_0} e^{-2\alpha_0 t \omega^n} d\omega. \quad (9)$$

Горизонтальная часть графика функции $f(t)$ соответствует рабочему участку реализации СШ, а сама эта функция может использоваться как корректирующая функция при организации итерационного процесса для определения значения коэффициента α_0 , но для этого нужно подобрать аппроксимирующее выражение для функции $f(t)$, которое должно быть справедливо во всем возможном диапазоне значений коэффициента α_0 .

Такой анализ был проведен, например для $n = 1,5$. График корректирующей функции имеет такой же характер, как на рис. 2. Для него подобрано аппроксимирующее выражение

$$f(t) = 1 - 0,7e^{-5\alpha_0 t} - \frac{0,11}{\alpha_0 t}. \quad (10)$$

Это выражение достаточно точно описывает корректирующую функцию в диапазоне значений коэффициента затухания δ_0 от 30 до 150 дБ/м.

Сигнал с идеальным прямоугольным спектром невозможно реализовать на практике. Среди реальных сигналов наиболее близкий к прямоугольному спектр

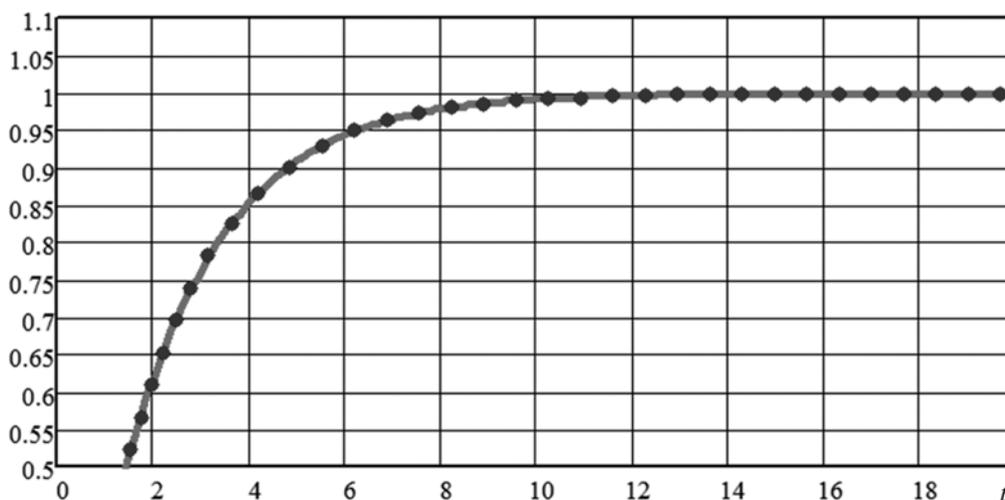


Рис. 2. Корректирующая функция при использовании малоапертурных преобразователей и зондирующего сигнала с прямоугольным спектром и $n = 1$ (● — аппроксимация)

имеет импульсы с ЛЧМ с большой базой. В качестве примера на рис. 3, *а* представлен график энергетического спектра ЛЧМ-импульса с базой 500 и граничными значениями частоты 100 и 200 кГц, а на рис. 3, *б* — энергетический спектр того же импульса, прошедшего через среду с сильным частотно-зависимым затуханием.

Важной особенностью спектра ЛЧМ-импульса является его локализация в полосе частот от ω_0 до ω_1 (в данном случае от 100 до 200 кГц), которая сохраняется при прохождении сигнала через среду с сильным частотно-зависимым затуханием (см. рис. 3, *б*). Этим ЛЧМ-импульс выгодно отличается от коротких радиоимпульсов, спектр которых после прохождения через среду с частотно-зависимым затуханием сильно смещается в сторону низких частот, что затрудняет обработку реализаций СШ с целью определения коэффициента затухания УЗ-волн.

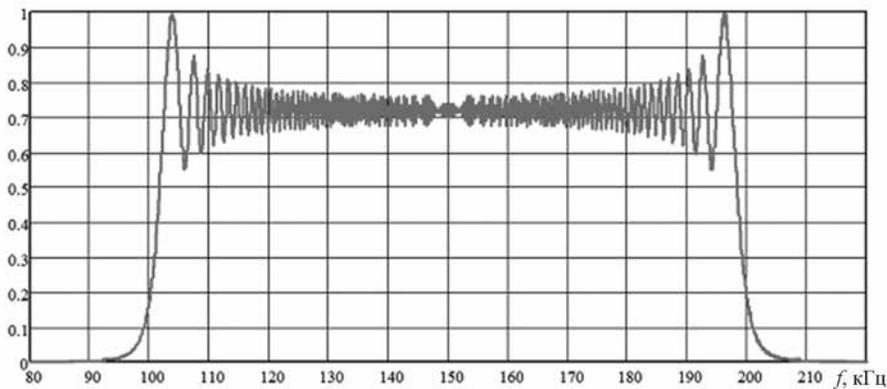
Для рассматриваемого ЛЧМ-импульса была рассчитана корректирующая функция с помощью изложенной выше методики. График корректирующей функции не отличается от приведенного на рис. 2. Она хорошо аппроксимируется выражением

$$f(t) = 1 - e^{-2\alpha_0 t}, \quad (11)$$

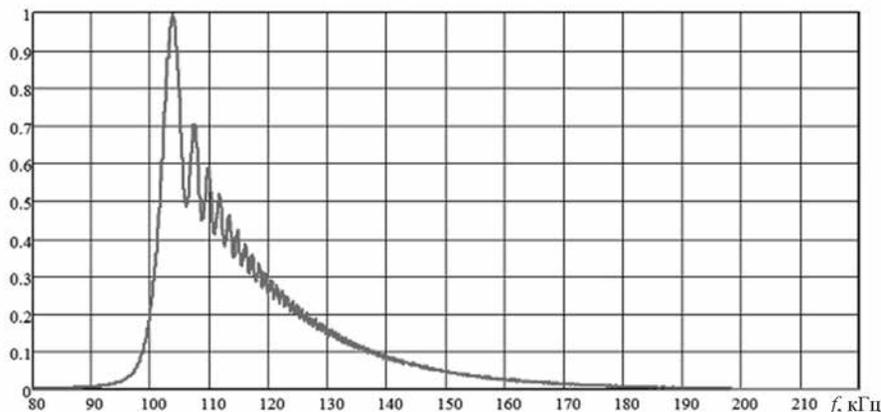
которое совпадает с соответствующим выражением для сигнала с прямоугольной формой спектра. Отсюда следует вывод о том, что ЛЧМ-импульс подходит для решения задачи определения коэффициента затухания УЗ-волн с помощью структурного шума, а также о том, что при практических расчетах спектр ЛЧМ-импульса с большой базой можно аппроксимировать прямоугольной функцией.

Особенности реализации метода при использовании апертурных преобразователей

При описании метода измерения коэффициента затухания УЗ-волн с помощью СШ предполагалось, что излучение и приём УЗ-волн проводится с помощью малоапертурных преобразователей продольных акустических волн, у которых диаграмма направленности описывается выражением $F(\theta) = \cos\theta$ и не зависит от частоты. Однако малоапертурные преобразователи из-за малой площади контакта с изделием имеют невысокий коэффициент передачи, в результате снижается интенсивность СШ, увеличивается влияние белого шума, уменьшается ширина рабочей области реализации СШ. Поэтому более целесообразно использовать преобразователи с сравнительно большой апертурой. ДН



а



б

Рис. 3. Энергетический спектр ЛЧМ-импульса с базой 500 (*а*); энергетический спектр того же импульса после прохождения через среду с сильным частотно-зависимым затуханием (*б*)

преобразователей продольных волн с круглой апертурой согласно [2] описывается выражением

$$F(\theta) = \Lambda_1 \left(\frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta \right) \cos \theta, \quad (12)$$

где $\Lambda_1(x) = \frac{2J_1(x)}{x}$ — лямбда-функция; D — диаметр апертуры преобразователя; угол θ отсчитывается от нормали к поверхности объекта.

Знание ДН преобразователей необходимо для определения характера убывания дисперсии СШ при отсутствии затухания УЗ-волн в среде. Методика определения этой зависимости изложена в работе [1]. Для решения задачи вводится эллипсоидальная система координат с фокусами в местах расположения излучающего и приёмного преобразователей. В этой системе координат нужно записать выражение для составляющей дисперсии СШ, вызванной отражениями от элементарной площадки, расположенной на расстоянии r_1 от излучающего и r_2 от приёмного преобразователя:

$$\sigma_{\Delta s}^2 = A^2 \Delta s \frac{1}{r_1^2} \frac{1}{r_2^2} F_1^2(\theta_1) F_2^2(\theta_2), \quad (13)$$

где $F_1(\theta_1)$, $F_2(\theta_2)$ — ДН излучающего и приёмного преобразователей соответственно; Δs — элемент площади в эллипсоидальной системе координат, которая, как показано в [3], описывается выражением

$$\Delta s = a^2 \cos u \operatorname{sh} v \sqrt{ch^2 v - \sin^2 u} \, dud\varphi. \quad (14)$$

Далее нужно (14) и (12) подставить в (13), все величины выразить через координаты эллипсоидальной системы u , v , φ и проинтегрировать по φ и по u . В результате после ряда математических преобразований получаем следующее выражение, физический смысл которого показан далее:

$$S = A^2 \int_{u=-\pi/2}^{\pi/2} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \times \frac{\cos^5 u \operatorname{sh}^5 v \cos^4 \varphi \Lambda_1^2 \left(\frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta_1 \right) \Lambda_1^2 \left(\frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta_2 \right) dud\varphi}{a^2 (ch^2 v - \sin^2 u)^{7/2}}, \quad (15)$$

где

$$\sin \theta_1 = \sqrt{1 - \frac{\cos^2 u \operatorname{sh}^2 v \cos^2 \varphi}{(chv + \sin u)^2}};$$

$$\sin \theta_2 = \sqrt{1 - \frac{\cos^2 u \operatorname{sh}^2 v \cos^2 \varphi}{(chv - \sin u)^2}}.$$

Интегрирование проводится численными методами при фиксированных значениях координаты v и отношения D/λ . Результат интегрирования является функцией нормированного времени $t' = t/t_0 = chv$ и частоты, так

как длина волны λ зависит от частоты. Поэтому выражение (15) можно рассматривать как составную часть мгновенного энергетического спектра СШ. Переходя к нормированному времени t' , запишем это выражение в виде

$$S(\omega, t') = A^2 \int_{u=-\pi/2}^{\pi/2} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \times \frac{\cos^5 u (1-t'^2)^{5/2} \cos^4 \varphi \Lambda_1^2 \left(\frac{\pi d \omega}{\omega_0} \sin \theta_1 \right) \Lambda_1^2 \left(\frac{\pi d \omega}{\omega_0} \sin \theta_2 \right) dud\varphi}{a^2 (t'^2 - \sin^2 u)^{7/2}}, \quad (16)$$

где

$$\sin \theta_1 = \sqrt{1 - \frac{\cos^2 u (1-t'^2) \cos^2 \varphi}{(t' + \sin u)^2}};$$

$$\sin \theta_2 = \sqrt{1 - \frac{\cos^2 u (1-t'^2) \cos^2 \varphi}{(t' - \sin u)^2}};$$

d — отношение D/λ на частоте ω_0 .

Чтобы найти полный мгновенный энергетический спектр СШ, нужно (16) умножить на энергетический спектр зондирующего сигнала, квадрат частотной характеристики излучающего и приёмного преобразователей и на коэффициент направленного действия (КНД) каждого преобразователя, который тоже зависит от частоты:

$$W_{\text{СШ}}(\omega, t) = S(\omega, t) W_0(\omega) |K_{\text{ип}}(\omega)|^2 \times |K_{\text{ип}}(\omega)|^2 K D_{\text{ип}}(\omega) K D_{\text{ип}}(\omega), \quad (17)$$

где $K_{\text{ип}}(\omega)$, $K_{\text{ип}}(\omega)$ — коэффициенты передачи излучающего и приёмного преобразователей; $K D_{\text{ип}}(\omega)$, $K D_{\text{ип}}(\omega)$ — КНД излучающего и приёмного преобразователей соответственно.

Чтобы найти закон изменения дисперсии СШ во времени без учета частотно-зависимого затухания, нужно выражение (17) проинтегрировать по частоте:

$$\sigma_0^2(t') = \int_{\omega_0}^{\omega_1} W_{\text{СШ}}(\omega, t') d\omega. \quad (18)$$

В качестве примера на рис. 4 (кривая 1) приведен график зависимости $\sigma_0^2(t')$, рассчитанной при $d = 0,8$ и использовании в качестве зондирующего сигнала ЛЧМ-импульса с базой $B = 500$ и шириной спектра от 100 до 200 кГц. Характер этой зависимости похож на тот, который получается при использовании малоапертурных преобразователей продольных волн (см. рис. 1), только максимум смещен в сторону больших значений t' .

Для учета частотно-зависимого затухания нужно формулу (17) умножить на множитель $e^{-2\alpha_0 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^n}$, опи-

сывающий частотно-зависимое затухание в исследуемом материале и потом проинтегрировать по ω в соответствии с (18). На рис. 4 (кривая 2) приведен график зависимости дисперсии СШ от времени при коэффициенте затухания 26 дБ/м на частоте 100 кГц и коэффициенте $n=1,2$.

Порядок дальнейших действий не отличается от рассмотренного выше. Используя априорную информацию о коэффициенте затухания УЗ-волн и характере зависимости его от частоты (показателе степени n), вычисляем корректирующую функцию. Однако этот процесс получается довольно трудоёмким из-за сложности вычисления интегралов (16) и (18).

На рис. 5 приведен график корректирующей функции для ситуации, соответствующей рис. 4, и подобрано аппроксимирующее выражение (линия, показанная точками на рис. 5):

$$f(t) = 0,85 + \frac{3,1}{t} - 4,1e^{-0,46t}. \quad (19)$$

Эта аппроксимация достаточно хорошо описывает корректирующую функцию при $t > 2$. Характер корректирующей функции несколько отличается от полученного при использовании малоапертурных преобразователей (см. рис. 2). Это объясняется тем, что диаграмма направленности и КНД преобразователей с большой апертурой зависят от частоты.

Процедура обработки реализаций структурного шума для определения коэффициента затухания ультразвуковой волны

Процедура обработки реализаций СШ состоит из нескольких этапов. Сначала, как предлагалось в [1], для каждой реализации СШ $x(t)$ проводится интегрирование в «скользящем» интервале $(t_0 - \Delta t, t_0 + \Delta t)$ и определяется зависимость дисперсии от времени t_0 :

$$\sigma^2(t_0) \approx \frac{1}{2\Delta t} \int_{t_0 - \Delta t}^{t_0 + \Delta t} x^2(t) dt. \quad (20)$$

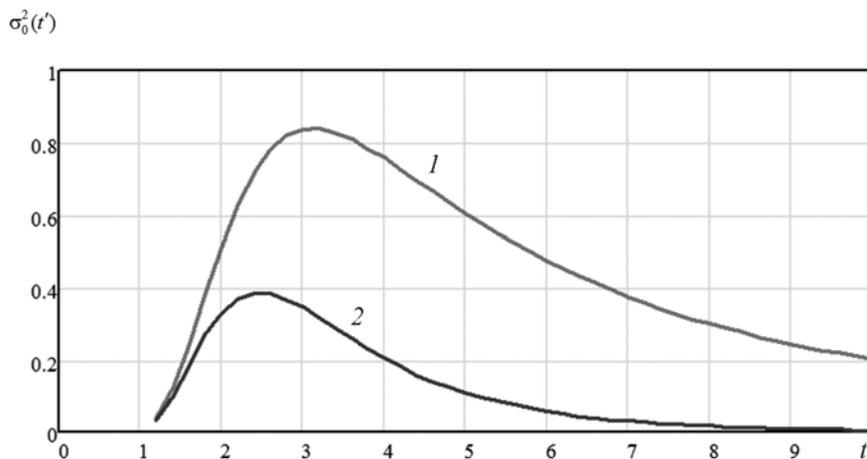


Рис. 4. Зависимость дисперсии СШ от времени при использовании преобразователей с круглой апертурой диаметром 0,8λ на низшей частоте сигнала:

1 — без учёта затухания в среде; 2 — с учётом частотно-зависимого затухания

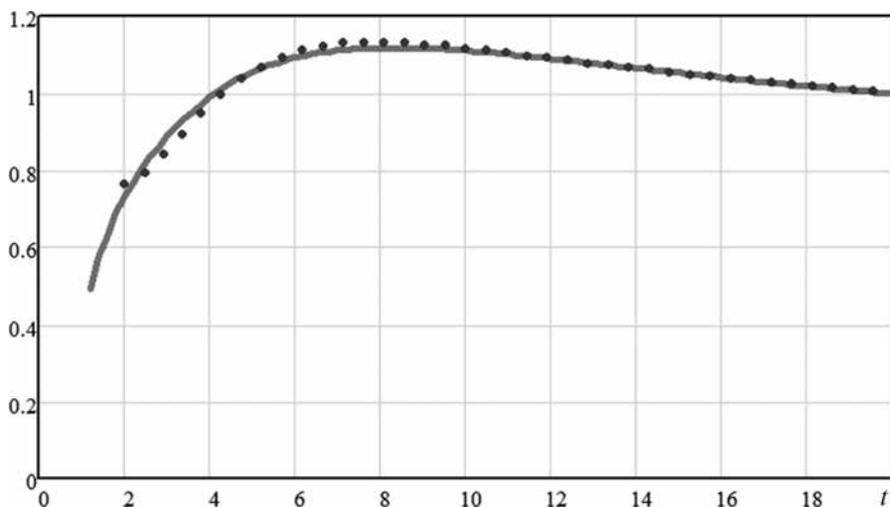


Рис. 5. Корректирующая функция при использовании преобразователей диаметром 0,8λ

Чем шире область интегрирования $2\Delta t$, тем лучше сглаживаются флуктуации случайного процесса, при этом уменьшается случайная погрешность измерений, однако в результате сглаживания постепенно утрачивается информация о характере изменения дисперсии во времени. Поэтому ширина интервала интегрирования выбирается из компромиссных соображений.

При наличии нескольких реализаций СШ, полученных в одинаковых условиях, следует произвести усреднение дисперсии СШ по этим реализациям. В результате такого усреднения уменьшится уровень флуктуаций дисперсии СШ и повысится точность определения коэффициента затухания УЗ-волны. В результате выполнения представленных операций получаем функцию, описывающую закон изменения дисперсии во времени. Характерный вид этой функции, полученный в результате моделирования, приведен на рис. 6.

Дальнейшая обработка полученной зависимости дисперсии СШ от времени состоит в том, чтобы исключить влияние побочных факторов и выделить участок, где среднее значение дисперсии убывает по экспоненте, показатель которой однозначно связан с искомым коэффициентом затухания УЗ-волны. Для этого нужно

функцию, описывающую зависимость дисперсии СШ от времени (которая была получена на предыдущем этапе обработки реализации СШ) поделить на функцию, рассчитанную по формуле (18), и умножить на t . Для этого нужно иметь априорную информацию о величине коэффициента затухания α и характере его зависимости от частоты.

Далее нужно исключить из дальнейшей обработки начальный нерабочий участок, где находятся электроакустические наводки, и конец реализации, где заметный вклад в дисперсию вносит белый шум. Чтобы определить границу нерабочей области реализации СШ, нужно до начала зондирования измерить уровень собственного шума аппаратуры (белого шума), и за границу нерабочего участка принять момент времени, где белый шум не оказывает существенного влияния на уровень дисперсии суммарного шума.

Рабочую часть графика зависимости дисперсии СШ от времени нужно прологарифмировать и полученную функцию аппроксимировать прямой $a + bt$ (рис. 7), используя процедуру линейной регрессии. Вычисленное таким образом значение коэффициента b в 2 раза превышает искомое значение коэффициента α_0 .

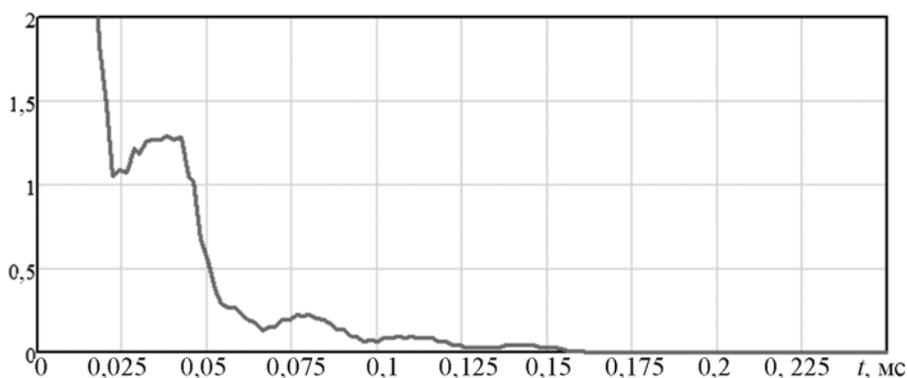


Рис. 6. Характер изменения дисперсии СШ во времени (моделирование)

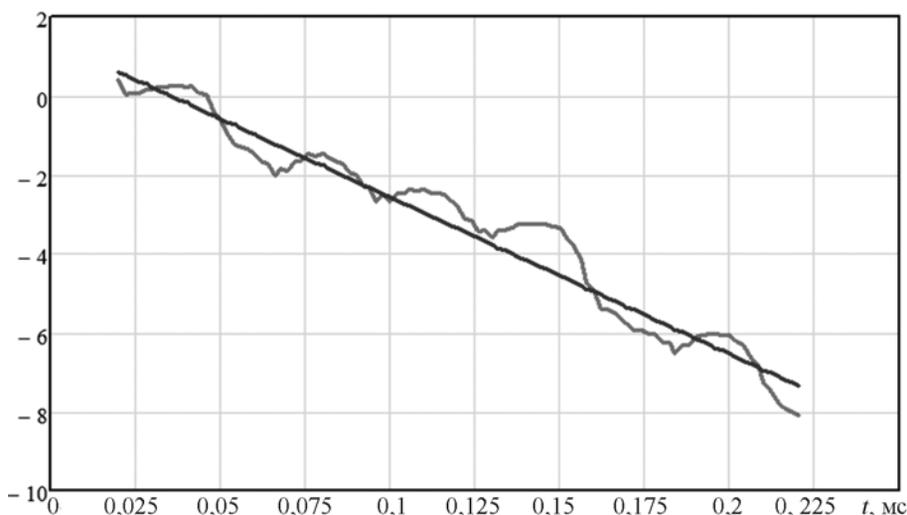


Рис. 7. Завершающий этап обработки реализации СШ: логарифмирование и аппроксимация линейной функцией

Точность определения коэффициента α_0 может оказаться невысокой из-за ограниченности рабочей области реализации СШ. Для повышения точности можно применить итерационный процесс. Для этого нужно, используя вычисленное значение α_0 , найти корректирующую функцию, подобрать для нее аппроксимацию и разделить график зависимости дисперсии СШ от времени на корректирующую функцию. В результате рабочая область обрабатываемой реализации СШ расширится в сторону меньших значений t . После этого скорректированный график зависимости дисперсии СШ от времени нужно прологарифмировать и с помощью процедуры линейной регрессии найти уточненное значение коэффициента α_0 .

Экспериментальная проверка метода измерения коэффициента затухания ультразвуковой волны посредством обработки реализаций структурного шума

Для проверки работоспособности представленного метода было проведено измерение коэффициента затухания в специально изготовленном бетонном блоке размером $600 \times 600 \times 350$ мм³. Измерения проводились как классическим теневым методом, так и с помощью разработанного метода посредством обработки реализаций СШ. Измерения проводились многократно в выбранные дни в процессе затвердевания бетона (3-й, 7-й, 9-й, 11-й, 16-й, 22-й и 28-й дни после заливки бетона).

Для излучения и приёма УЗ-сигналов использовались преобразователи типа S0208 фирмы АКС с апертурой 25 мм и широкой полосой пропускания (на уровне 0,7) от 60 до 140 кГц. Для измерения коэффициента затухания теневым методом использовался зондирующий сигнал в виде знакопеременного прямоугольного импульса большой амплитуды длительностью 10 мкс. Вследствие частотно-зависимого затухания спектр

сигнала сильно сужается и смещается в сторону низких частот; центральная частота спектра сигнала составляет при этом около 45 кГц.

Для снятия реализаций СШ был изготовлен датчик, состоящий из двух преобразователей типа S0208 (излучающего и приёмного). Расстояние между центрами преобразователей составляло 29 мм. Датчик мог перемещаться по поверхности блока с шагом, равным половине диаметра апертуры преобразователя. Такой шаг является оптимальным, так как реализации СШ, полученные в соседних положениях датчика, оказываются некоррелированными.

В качестве зондирующего сигнала использовался ЛЧМ-импульс длительностью 120 мкс, с центральной частотой 100 кГц и девиацией частоты от 60 до 140 кГц. При прохождении сигнала через преобразователи и среду с сильным частотно-зависимым затуханием спектр сигнала сильно искажался, сужался и смещался в сторону низких частот. Средняя частота спектра искаженного таким образом сигнала составляла около 60 кГц.

Для измерения коэффициента затухания по структурному шуму в каждый выбранный день снималось 10...12 реализаций СШ в соседних положениях датчика; каждая реализация обрабатывалась в соответствии с изложенной выше методикой, после этого производилось вычисление среднего значения коэффициента затухания УЗ-волн. Результаты этих измерений приведены на рис. 8.

Характер изменения коэффициента затухания в процессе затвердевания бетона получился такой же, как измеренный теневым методом, только полученные значения коэффициента затухания оказались на 25...30 % больше измеренных теневым методом. Это объясняется тем, что центральная частота спектра СШ примерно на 30 % выше, чем у сигнала при измерении теневым методом, а коэффициент затухания УЗ-волн

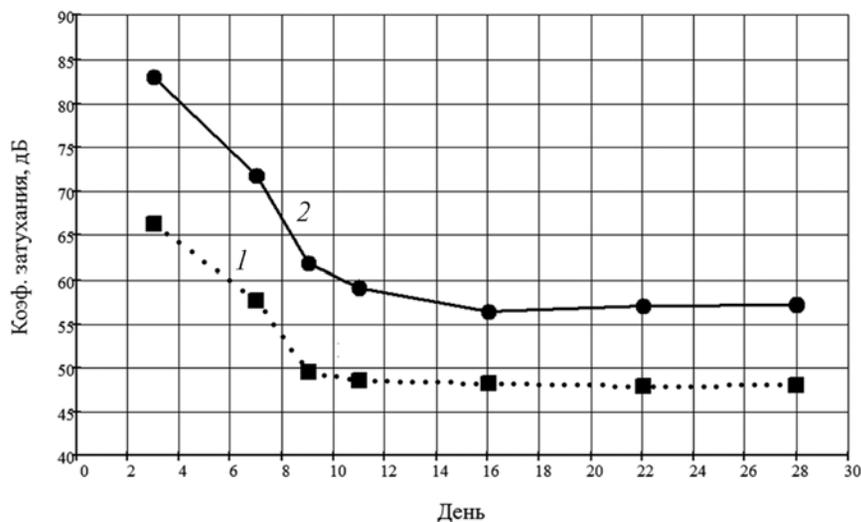


Рис. 8. Результаты измерения коэффициента затухания УЗ-волны в бетонном блоке теневым способом (1) и с помощью предлагаемого метода (2)

в бетоне растет приблизительно пропорционально частоте. Следовательно, предлагаемый метод позволяет адекватно оценивать величину коэффициента затухания УЗ-волн в неоднородном материале.

Заключение

Предложен новый метод измерения коэффициента затухания УЗ-волн в неоднородных материалах при одностороннем доступе посредством обработки реализаций СШ. Этот метод позволит осуществлять мониторинг состояния крупногабаритных объектов, к которым возможен только односторонний доступ. Разработаны теоретические основы метода, его работоспособность подтверждена экспериментом.

Однако для практического применения метода предстоит провести его доработку: оптимизацию параметров зондирующего сигнала, параметров преобразователей и алгоритма обработки принимаемых реализаций СШ.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 15-19-00096).

Литература

1. **Карташев В.Г.** Измерение коэффициента ослабления ультразвука в материале с неоднородной структурой при одностороннем доступе // Вестник МЭИ. 2013. № 4. С. 110—114.
2. **Марков Г.Т., Сазонов Д.М.** Антенны. М.: Энергия, 1975.
3. **Маделунг Э.** Математический аппарат физики. М.: Физматгиз, 1960.

References

1. **Kartashev V.G.** Izmerenie Koeffitsienta Oslableniya Ul'trazvuka v Materiale s Neodnorodnoy Strukturoy pri

Odnostoronnem Dostupe. MPEI Vestnik. 2013;4:110—114. (in Russian).

2. **Markov G.T., Sazonov D.M.** Antenny. M.: Energiya, 1975. (in Russian).

3. **Madelung E.** Matematicheskiy Apparat Fiziki. M.: Fizmatgiz, 1960. (in Russian).

Сведения об авторах

Карташев Владимир Герасимович — доктор технических наук, профессор кафедры основ радиотехники НИУ «МЭИ», e-mail: KartashevVG@mpei.ru

Фадин Алексей Сергеевич — аспирант кафедры основ радиотехники НИУ «МЭИ», e-mail: Alerksei-fadin@yandex.ru

Трунов Эдуард Игоревич — студент (магистрант) НИУ «МЭИ», e-mail: ediktrunov@mail.ru

Али Зайд Салех Салем — кандидат технических наук, ассистент кафедры основ радиотехники НИУ «МЭИ», e-mail: zaido_a@mail.ru

Information about authors

Kartashev Vladimir G. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Fundamentals of Radio Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: KartashevVG@mpei.ru

Fadin Aleksey S. — Ph.D.-student of Fundamentals of Radio Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: Alerksei-fadin@yandex.ru

Trunov Eduard I. — Student (Undergraduate) of NRU MPEI, e-mail: ediktrunov@mail.ru

Ali Zayed Saleh Salem — Ph.D. (Techn.), Assistant of Fundamentals of Radio Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: zaido_a@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29.12.2016