

Оценка потенциальной точности измерений толщины объектов из сложноструктурных материалов с частотно-зависимым затуханием ультразвука

В. Г. КАРТАШЕВ, В. К. КАЧАНОВ, Е. В. ШАЛИМОВА

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, Россия, e-mail: kachanovvk@mail.ru, shalimovayv@mail.ru

С помощью математического моделирования проведена оценка погрешности измерений толщины изделий из неоднородных материалов ультразвуковым эхо-методом с учётом структурного шума и частотно-зависимого затухания ультразвука. Получены эмпирические формулы для оценки минимальной погрешности измерений.

Ключевые слова: ультразвук, измерение толщины, оценка погрешности, математическое моделирование, структурный шум, частотно-зависимое затухание, эмпирические формулы.

In this work we use computer simulation in order to obtain estimates of thickness measurement errors in objects with inhomogeneous structure. Empiric formulas for estimation of minimum measurement error were deduced.

Key words: ultrasound, thickness measurement, error estimate, mathematical modeling, structural noise, frequency-dependent attenuation, empiric formulas.

Необходимость измерения толщины объектов ультразвуковым эхо-методом возникает в случае, когда доступ к изделию возможен только с одной стороны. Эту задачу можно решить при зондировании объектов из конструкционных металлов с однородной структурой, когда затухание ультразвука невелико, донный сигнал отчетливо виден и определение его положения не вызывает затруднений. Значительно сложнее дело обстоит при зондировании протяжённых объектов из материалов с высоким частотно-зависимым затуханием ультразвуковых волн и неоднородной структурой, таких как бетон, чугун, полимерные композиционные материалы. При измерениях толщины таких изделий с помощью ультразвукового эхо-метода возникают следующие проблемы. Сильное затухание ультразвука приводит к значительному ослаблению сигнала, который может оказаться ниже уровня собственного шума усилительной аппаратуры (белого шума). Чтобы облегчить выделение принимаемого сигнала на фоне белого шума, используют широкополосные сложномодулированные сигналы с большой базой B ($B = t_c \Delta f_c$, где t_c — длительность сигнала, Δf_c — ширина спектра сигнала), подвергающиеся согласованной фильтрации. Кроме того, отношение сигнал—шум можно увеличить при повторном зондировании объекта из той же позиции и за счёт суммирования (накопления) принимаемых сигналов. С помощью этих приёмов влияние белого шума можно уменьшить до приемлемого уровня.

Серьёзным вопросом является выделение сигнала на фоне структурного шума (СШ). Структурный шум возникает в результате отражения зондирующего сигнала от многочисленных неоднородностей объекта. Этот шум имеет такой же энергетический спектр, как и полезный сигнал, поэтому никакие частотные фильтры не способны увеличить отношение сигнал—СШ. Ни согласованная фильтрация, ни накопление сигналов не могут уменьшить уровень СШ, поэтому он

оказывается основной помехой, влияющей на погрешность измерений временного положения сигнала.

Ещё одна проблема связана с сильной зависимостью от частоты затухания ультразвука в большинстве материалов. Как правило, коэффициент затухания ультразвуковых волн возрастает приблизительно пропорционально частоте зондирующего сигнала. При этом спектр принимаемого полезного эхо-сигнала искажается, и возникает вопрос о правильности организации обработки принимаемого сигнала.

Задачи оценки погрешности измерений толщины изделий ультразвуковым эхо-методом изделий, имеющих значительную толщину, рассмотрены в [1, 2]. В указанных работах использованы различные методы определения временного положения сигнала: по переднему фронту, по первому нулю, по его максимуму. Однако наиболее высокая точность измерений обеспечивается при определении временной задержки сигнала по положению максимума его огибающей [3, 4].

Пути решения задач оценки временного положения сигнала. Анализ задачи оценки параметров сигнала при существовании помех описан в [3, 4]. Если помехой является белый шум, то минимальную погрешность определения задержки σ_{t_0} можно получить из неравенства Крамера—Рао [3]:

$$\sigma_{t_0}^2 = (\mu_0 S_{\text{СК}}^2)^{-1}, \quad (1)$$

где μ_0 — энергетическое отношение сигнал—помеха; $S_{\text{СК}}^2$ — средняя квадратическая ширина спектра огибающей сигнала.

ла $\dot{S}(\omega)$, которая определяется выражением

$$S_{\text{СК}}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 |\dot{S}(\omega)|^2 d\omega / \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{S}(\omega)|^2 d\omega, \quad (2)$$

где ω — циклическая частота.

В этом случае

$$\mu_0 = E_c / W_0, \quad (3)$$

где E_c — энергия сигнала; W_0 — энергетический спектр белого шума.

Структурный шум — коррелированная помеха, поэтому выражения (1)–(3) для оценки минимальной погрешности измерений использовать нельзя. Временное положение сигнала при коррелированной помехе и вопросы, связанные с его оценкой, рассмотрены в монографиях [4, 5]. Первый, более простой, путь основан на применении выбеливающих фильтров. Этот вариант вряд ли пригоден для решения рассматриваемой задачи, потому что частотная характеристика выбеливающего фильтра будет стремиться к бесконечности при крайних значениях частоты спектра зондирующего сигнала. Второй путь приводит к необходимости решения довольно сложных интегральных уравнений [5]. Этот процесс весьма трудоёмок, и его нельзя считать оптимальным.

Наиболее перспективен, по мнению авторов, третий способ решения проблемы, основанный на математическом моделировании. Его преимущество в том, что он позволяет получать достоверные результаты с учётом применяемого метода обработки сигнала. Проанализировав и обобщив результаты математического моделирования, можно получить эмпирические соотношения, позволяющие оценить погрешности измерений для конкретных исходных данных. Решению этой задачи и посвящена настоящая работа.

Характеристики сигнала, прошедшего через среду с частотно-зависимым затуханием. Пусть зондирующий сигнал — широкополосный импульс с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) с большой базой $B \gg 1$, т. е. ЛЧМ-импульс. Спектр такого сигнала имеет форму, близкую к прямоугольной. При прохождении через среду с частотно-зависимым затуханием ультразвука спектр сигнала искажается, верхние частоты ослабевают (рис. 1). Если коэффициент затухания ультразвуковой волны в среде возрастает пропорционально частоте, то модуль спектральной плотности сигнала $|\dot{S}(\omega)|$, прошедшего через поглощающую среду, может быть аппроксимирован выражением

$$|\dot{S}(\omega)| = S_0 e^{-\beta(\omega - \omega_1)}, \quad \omega_1 \leq \omega \leq \omega_2, \quad (4)$$

где S_0 — спектральная плотность на частоте ω_1 ; β — коэффициент затухания спектральной плотности.

Принимаемый сигнал подвергается согласованной фильтрации, в результате которой фаза спектра компенсируется, и спектр становится вещественным. Форма амплитудно-частотной характеристики согласованного фильтра соответствует модулю спектральной плотности зондирующего сигнала, т. е. практически постоянна в полосе частот ω_1, ω_2 . Поэтому спектральную плотность сигнала, прошедшего через поглощающую среду и согласованную фильтрацию, можно описать выражением, аналогичным с (4):

$$\dot{S}(\omega) = S_0 e^{-\beta(\omega - \omega_1)}, \quad \omega_1 \leq \omega \leq \omega_2. \quad (5)$$

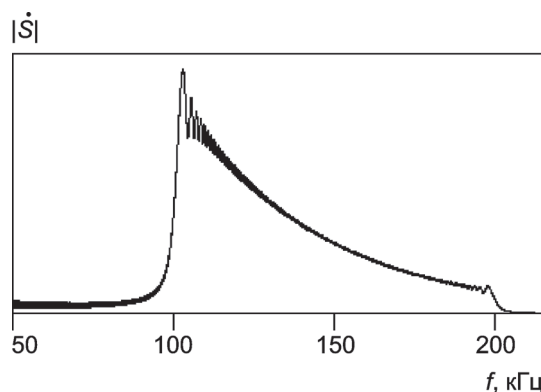


Рис. 1. Спектр ЛЧМ-импульса, прошедшего через среду с линейной зависимостью затухания ультразвука от частоты (20 дБ при $f=100$ кГц; 40 дБ — при $f=200$ кГц)

Применяя к выражению (5) обратное преобразование Фурье, найдём временную зависимость сигнала:

$$u(t) = \frac{S_0}{\pi} \left[\frac{\beta \cos(\omega_1 t) - t \sin(\omega_1 t)}{\beta^2 + t^2} + e^{-\beta(\omega_2 - \omega_1)} \frac{t \sin(\omega_2 t) - \beta \cos(\omega_2 t)}{\beta^2 + t^2} \right], \quad (6)$$

где t — время.

При сильном затухании, когда спектральная плотность сигнала на частоте ω_2 практически равна нулю, а $e^{-\beta(\omega_2 - \omega_1)} \ll 1$, можно записать:

$$u(t) \approx [S_0 / \pi] \left\{ [\beta \cos(\omega_1 t) - t \sin(\omega_1 t)] / (\beta^2 + t^2) \right\}.$$

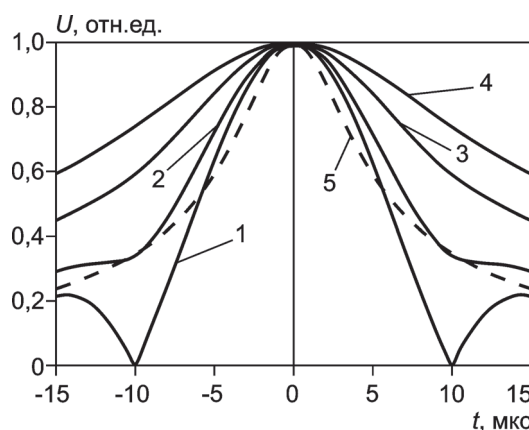


Рис. 2. Графики нормированной физической огибающей сигнала со спектрами 100–200 кГц (кривые 1–4) и со спектром 100–400 кГц (кривая 5) при разных значениях коэффициента затухания:

1 — при отсутствии частотно-зависимого затухания; 2, 5 — $\beta = 3,66 \cdot 10^{-6}$ с; 3 — $\beta = 7,32 \cdot 10^{-6}$ с; 4 — $\beta = 10,98 \cdot 10^{-6}$ с

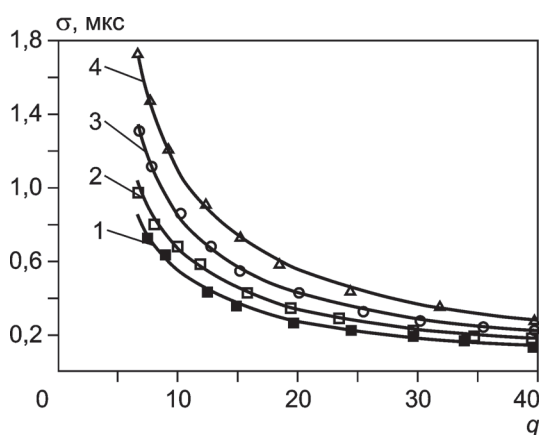


Рис. 3. Зависимость средней квадратической погрешности измерений задержки сигнала от отношения сигнал—структурный шум при разных β :

1, 2, 3, 4 — $\beta = 3,66 \cdot 10^{-6}$; $7,32 \cdot 10^{-6}$; $10,98 \cdot 10^{-6}$; $14,64 \cdot 10^{-6}$ с, соответственно

Определим физическую огибающую сигнала (6) как модуль его комплексной огибающей:

$$U(t) = S_0 / \left[2\pi(\beta^2 + t^2)^{1/2} \right] \times \times \left[1 - 2e^{-\beta(\omega_2 - \omega_1)} \cos[(\omega_2 - \omega_1)t] + e^{-2\beta(\omega_2 - \omega_1)} \right]^{1/2}. \quad (7)$$

Выражение (7) справедливо при любом затухании. Если затухание очень велико и $e^{-\beta(\omega_2 - \omega_1)} \ll 1$, то его можно упростить:

$$U(t) \approx S_0 / \left[2\pi(\beta^2 + t^2)^{1/2} \right].$$

Графики нормированной физической огибающей при различных значениях коэффициента β приведены на рис. 2.

На практике физическую огибающую сигнала находят следующим образом. Предварительно оцифрованный сигнал подвергают преобразованию Гильберта. В результате такого преобразования получают сопряжённый сигнал. Огибающую находят как квадратный корень из суммы квадратов исходного и сопряжённого сигналов. Этот способ был реализован в настоящей работе при моделировании процесса измерений временной задержки сигналов.

Результаты моделирования. Чтобы оценить погрешность, возникающую при измерениях толщины объекта на фоне СШ, осуществили математическое моделирование процесса определения временного положения сигнала. Полез-

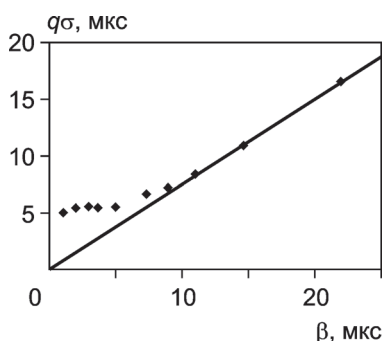


Рис. 4. Зависимость произведения средней квадратической погрешности и отношения сигнал—структурный шум от уровня частотно-зависимого затухания

ный сигнал соответствовал выражению (6). Структурный шум формировался как композиция большого числа сигналов такой же формы, но с низкой амплитудой и случайной задержкой. Уровень белого шума предполагался пренебрежимо малым, и при моделировании его не учитывали.

С помощью преобразования Гильберта формировали сопряжённый сигнал. Затем вычисляли огибающую суммы сигнала и СШ. После определяли положение максимума этой огибающей. Процесс моделирования повторяли несколько сотен раз для каждого значения коэффициента β и отношения сигнал—СШ, затем вычисляли среднее квадратическое отклонение положения максимума огибающей.

Результаты моделирования приведены на рис. 3, 4. Основные расчёты проводили для сигналов со спектром 100—200 кГц. На рис. 3 приведены зависимости средней квадратической погрешности временного положения максимума огибающей сигнала σ от отношения сигнал—СШ q . Значение $\beta = 3,66 \cdot 10^{-6}$ с (кривая 1) соответствует затуханию сигналов 20 дБ на частоте 100 кГц и 40 дБ — на частоте 200 кГц; значение $\beta = 7,32 \cdot 10^{-6}$ с (кривая 2) — затуханию сигналов 40 дБ на частоте 100 кГц и 80 дБ на частоте 200 кГц. Кривые 3, 4 отражают ситуацию, когда затухания составляют 60 и 80 дБ на частоте 100 кГц, 120 и 160 дБ на частоте 200 кГц, соответственно. На рис. 3 показаны результаты моделирования и аппроксимирующие их функции. Средняя квадратическая погрешность σ обратно пропорциональна отношению сигнал—СШ, так что для каждого значения β произведение $q\sigma$ — константа.

На рис. 4 показана зависимость произведения $q\sigma$ от параметра β . При $\beta = 0$, когда спектр сигнала и энергетический спектр СШ равномерны, $q\sigma = 5,512 \cdot 10^{-6}$ с. Сравним это значение с тем, которое следует из неравенства Крамера—

Рао (1). Для спектра прямоугольной формы $S_{\text{сш}}^2 = (\omega_2 - \omega_1)^2 / 12$. Энергетическое отношение сигнал—шум $\mu_0 = q^2$. Подставив эти значения в (1), запишем

$$\sigma_{t_0} = \sqrt{12} / [q(\omega_2 - \omega_1)]. \quad (8)$$

Предположив, что $\omega_1 = 2\pi \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$; $\omega_2 = 4\pi \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$, получим произведение $q\sigma = 5,513 \cdot 10^{-6}$ с. Этот результат практически совпадает со значением, найденным при математическом моделировании. Такое совпадение объясняется тем, что в пределах полосы частот $\omega_1 - \omega_2$ спектр СШ равномерный и не отличается от белого шума, а за её пределами спектры сигнала и СШ равны нулю.

При $\beta(\omega_2 - \omega_1) < 3$ значение $q\sigma$ оказывается практически таким же, как при $\beta = 0$. Этот результат выглядит неожиданным, так как при $\beta > 0$ спектр сигнала заметно искажается и его средняя ширина уменьшается. Точность определения временного положения сигнала зависит от ширины главного лепестка сигнала (см. рис. 2). Из рис. 2 следует, что при $\beta(\omega_2 - \omega_1) < 3$ форма вершины практически не зависит от параметра β (кривые 1, 2). Форма вершины определяется высокочастотными составляющими спектра сигнала, которые при $\beta(\omega_2 - \omega_1) < 3$ имеют достаточную амплитуду, чтобы обеспечить высокую точность измерений временного положения сигнала.

Вторая причина описанного явления обусловлена тем, что энергетический спектр СШ пропорционален квадрату амплитудного спектра сигнала, поэтому убывает с ростом частоты быстрее, чем спектр сигнала. Например, при $\beta = 3,66 \cdot 10^{-6}$ с

амплитудный спектр сигнала на частоте 200 кГц в 10 раз меньше, чем на частоте 100 кГц, а соответствующие значения энергетического спектра СШ различаются в 100 раз. Это приводит к уменьшению влияния СШ на погрешность измерений.

При больших значениях β высокочастотные составляющие спектра сигнала ослабляются настолько сильно, что не могут сформировать узкий главный максимум. При этом сигнал расширяется (см. рис. 2, *кривые 3, 4*), погрешность измерений временного положения максимума сигнала увеличивается. При дальнейшем увеличении параметра β величина $q\sigma$ асимптотически стремится к $0,75\beta$ (см. рис. 4).

Чтобы выяснить, насколько допустима замена реального спектра ЛЧМ-импульса спектром прямоугольной формы, провели подобное моделирование процесса обработки сигналов с реальным ЛЧМ-импульсом, имеющим такую же ширину спектра и базу $B = 1000$ при отсутствии частотно-зависимого затухания. Результаты отличались от полученных для модели с прямоугольным спектром на 0,9 %, что меньше статистической погрешности моделирования. Следовательно, замену реального спектра ЛЧМ-импульса прямоугольной функцией можно считать допустимой.

Дополнительно исследовали влияние ширины спектра сигнала на точность измерений с учётом частотно-зависимого затухания. Смоделировали процесс обработки сигналов, имеющих разную ширину спектра и одинаковый коэффициент $\beta = 3,66 \cdot 10^{-6}$ с. Такое значение β соответствовало ослаблению сигнала на 20 дБ на частоте 100 кГц, 40 дБ — на частоте 200 кГц и 60 дБ — на частоте 300 кГц. Результаты моделирования следующие: $q\sigma = 5,51$ мкс при ширине спектра $f = 100 \dots 200$ кГц, $q\sigma = 3,03$ мкс при $f = 100 \dots 300$ кГц, $q\sigma = 2,61$ мкс при $f = 100 \dots 400$ кГц.

Моделирование показало, что при расширении спектра вдвое погрешность измерений уменьшается почти в 2 раза, несмотря на то, что в области частот 200—300 кГц содержится лишь 1 % энергии сигнала. При дальнейшем расширении спектра погрешность дополнительно уменьшается, несмотря на незначительный уровень высокочастотных составляющих спектра сигнала.

Для объяснения этого феномена вновь обратимся к рис. 2, где пунктирной линией показана форма огибающей сигнала со спектром 100—400 кГц при $\beta = 3,66 \cdot 10^{-6}$ с. Из рис. 2 следует, что ширина центральной части сигнала значительно уже, чем при спектре 100—200 кГц и таком же значении β . У сигнала с несимметричным спектром вида (4) частота высокочастотного заполнения не постоянна; она максимальна в центральной части сигнала при $t = 0$ [6]. Это приводит к сужению формы огибающей сигнала и повышению точности измерений.

При измерениях толщины изделий в условиях структурного шума следует применять как можно более широкопо-

лосные сигналы, несмотря на то, что высокочастотные составляющие спектра ослабляются в результате частотно-зависимого затухания. Временную задержку сигнала следует оценивать по положению максимума огибающей. При этом для оценки минимальной погрешности измерений можно использовать формулу (8), если неравномерность спектра сигнала в рабочей полосе частот не превышает 27 дБ. При значительном частотно-зависимом затухании, когда неравномерность спектра сигнала превышает 50 дБ, для оценки погрешности измерений можно применять формулу $\sigma_{t_0} \approx 0,75\beta/q$. В промежуточной области значений неоднородности спектра сигнала точную оценку минимальной погрешности измерений определить не удаётся, но можно дать оценку минимальной погрешности сверху:

$$\sigma_{t_0 \text{ мин}}^2 < 12 / \left[q^2 (\omega_2 - \omega_1)^2 \right] + 0,75^2 \beta^2 / q^2. \quad (9)$$

Формула (9) справедлива при любом уровне частотно-зависимого затухания.

Закключение. Проведённый анализ позволяет оценить потенциальную (предельно достижимую) точность измерений временного положения сигнала с учётом структурного шума и частотно-зависимого затухания. Фактическая погрешность измерений всегда будет больше предельно возможной.

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

Л и т е р а т у р а

1. Залёткин А. В. Точность измерения временного положения ультразвукового эхо-сигнала при контроле протяжённых сложноструктурных изделий // Измерительная техника. 2006. № 10. С. 31—36.
2. Качанов В. К., Соколов И. В., Концов Р. В., Воронкова Л. В. Повышение точности измерения скорости акустических колебаний при ультразвуковой структуроскопии изделий из чугуна // Измерительная техника. 2011. № 11. С. 45—47.
3. Фалькович С. Е., Хомяков Э. Н. Статистическая теория измерительных радиосистем. М.: Радио и связь, 1981.
4. Тихонов В. И. Оптимальный приём сигналов. М.: Радио и связь, 1983.
5. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 1. М.: Советское радио, 1972.
6. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 2000.

Дата принятия: 13.01.2016.