УДК 534.6.08

**Применение автокорреляционной функции и вейвлет-преобразования для автоматической обработки акустических сигналов**

**Р. Э. Шарыпов, В. И. Римлянд**

*Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)*

*2017104939@pnu.edu.ru*

*Разработан алгоритм автоматической обработки акустических сигналов с помощью автокорреляционной функции и вейвлет-преобразования. Алгоритм протестирован осциллограммах, полученных на эталонной установке 1-го разряда. Получены значения скорости распространения и коэффициента затухания продольных ультразвуковых волн в эталонном образце.*

**automatic Acoustic signal processing using autocorrelation function and wavelet transform**

**R. E. Sharypov, V. I. Rimlyand,**

*Pacific National University (Khabarovsk)*

*2017104939@pnu.edu.ru*

*An algorithm for automatic processing of acoustic signals using the autocorrelation function and wavelet transform has been developed. The algorithm is tested using oscillograms obtained on a state primary standard setup. The values of the velocity the attenuation coefficient of ultrasonic longitudinal waves in a reference sample are obtained.*

Акустические измерения в твердых средах находят широкое применение. В физике твердого тела с их помощью изучают фундаментальные свойства твердых тел: ангармонизм межатомного взаимодействия, структуру и свойства различных дефектов решетки, фазовые переходы, сверхпроводимость, магнитоупругие и акустоэлектрические эффекты и многое другое [1]. В технических приложениях наиболее обширная область применения акустических измерений относится к неразрушающему контролю [2].

Методы измерения скорости звука и коэффициента разнообразны и зависят от вещества, диапазона частот. Из всех распространенных методов импульсный [2] является наиболее точным и универсальным. Он позволяет весьма точно определять как скорость ультразвуковых волн, так и коэффициент затухания. Суть метода состоит в том, что в образце перпендикулярно его плоскопараллельным граням вводится ультразвуковой импульс (УЗИ). Наблюдая многократные отражения этого импульса от параллельных торцов образца, можно судить, как быстро в зависимости от времени и пройденного расстояния последовательно отражающиеся импульсы затухают по амплитуде.

Установка ИЗУ [3], уставленная в Дальневосточном филиале ФГУП ВНИИФТРИ предназначена для прецизионных измерений скорости распространения и коэффициента затухания продольных ультразвуковых волн в твердых средах эхо-импульсным и резонансным методами. Установка является государственным первичным эталоном [4], предназначенным для хранения и передачи единицы скорости распространения продольных УЗ волн в твердых средах рабочим эталонам и средствам измерений.

Блок-схема установки при работе в эхо-импульсном режиме показана на рис. 1. Радиоимпульс, формируемый генератором радиоимпульсов, с помощью возбуждающего емкостного преобразователя преобразуется в акустические колебания среды — образца. Переотраженные в образце ультразвуковые импульсы регистрируются приемным емкостным преобразователем. Сигнал с приемного емкостного преобразователя через предусилитель и полосовой усилитель подается на вход цифрового запоминающего осциллографа (ЦЗО) — LeCroy WaveSurfer 422 [5]. На емкостные преобразователи подается постоянное поляризующее напряжение.



Рис. 1. Блок-схема установки ИЗУ

С помощью ЦЗО производится контроль амплитудно-временных параметров УЗИ и измерения временных интервалов между УЗ импульсами и отношения амплитуд импульсов . Запуск ждущей развертки ЦЗО синхронизован с выходным сигналом генератором радиоимпульсов. Переотражённые УЗ импульсы регистрируются в режиме работы ЦЗО «усреднение», которое существенно повышает отношение сигнал-шум.

При измерениях и с помощью осциллографа используется метод совмещения импульсов на экране ЦЗО, при этом, оператор установки вносит неконтролируемую погрешность в измерения, и поэтому такой метод сложно назвать объективным.

Скорость распространения продольных волн вычисляется по формуле

 (1)

где – толщина образца, – номера импульсов, – дифракционная поправка.

Коэффициент затухания продольных ультразвуковых волн с вычисляется так:

 (2)

где – ослабление импульсов с номерами и , – дифракционная поправка.

Для тестирования алгоритма было собрано 48 осциллограмм для одного образца из алюминиевого сплава Д16 на частотах заполнения радиоимпульса с частотой следования .

Типичная осциллограмма акустического сигнала приведена рис. 2. На ней представлен сигнал, полученный при частоте радиоимпульса . По вертикальной оси – напряжение в вольтах, по горизонтальной – время в секундах. Продолжительность сигнала – 50 мкс, время дискретизации аналого-цифрового преобразователя осциллографа – 0,5 нс.



Рис. 2. Осциллограмма при

Первый способ автоматизации измерений основывается на вычислении автокорреляционной функции. Считая экспериментальный сигнал , получаем аналитическую формулу для вычисления автокорреляционной функции сигнала [6]:

 (3)

Опираясь на математические свойства автокорреляционной функции, можно вычислить интервал между импульсами путем непосредственного анализа , откуда по формуле (1) вычисляется скорость звука. Однако для вычисления , и, следовательно, коэффициента затухания, необходима информация об амплитудах в исходном сигнале, которая теряется при интегрировании. Чтобы эту проблему обойти, исходный сигнал специальным образом «сопоставляется» с его автокорреляционной функцией.



Рис. 3. Автокорреляционная функция сигнала, изображенного на рис. 2

Второй способ автоматизации основывается на вейвлет-преобразовании [7] сигнала :

 (4)

где – весовая функция, – материнский вейвлет. В качестве материнского вейвлета был выбран вейвлет Морле [8], который задается следующей формулой

 (5)

где – пропускная способность, – центральная частота. Временной интервал между импульсами определяется путем анализа действительной части – локальный максимум вейвлет-преобразования соответствует положению импульса. Для получения ослабления также необходимо «сопоставить» исходный сигнал и его вейвлет-преобразование.

На основе разработанных алгоритмов создано на языке C++ программное обеспечение, позволяющее на основе цифровых осциллограмм рассчитывать и .

В таблице приведены результаты расчетов для обоих методов для различных частот , из которой видно, что методы дают схожие результаты. В качестве погрешности выступает стандартное отклонение при обработке пакета осциллограмм. Значения и при этом для обоих методов лежат в пределах погрешности.

**Сравнение методов расчета и**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Автокорреляционный метод | Метод вейвлет-преобразования |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2.5 | 6411.94 | 0.34 | 15.2 | 0.2 | 6412.21 | 0.23 | 15.1 | 0.2 |
| 5 | 6416.08 | 0.86 | 14.0 | 0.4 | 6416.08 | 0.88 | 14.0 | 0.5 |
| 10 | 6416.14 | 0.20 | 22.5 | 1.1 | 6416.03 | 0.30 | 22.9 | 1.1 |
| 16 | 6419.09 | 0.24 | 37.4 | 1.2 | 6418.10 | 0.95 | 37.6 | 1.1 |
| 20 | 6417.85 | 0.56 | 53.5 | 1.7 | 6415.21 | 2.22 | 51.0 | 2.6 |
| 32 | 6407.93 | 9.11 | 127.3 | 11.5 | 6406.59 | 4.08 | 109.1 | 9.3 |

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет находить и как при помощи автокорреляционного метода, так и при помощи вейвлет-преобразования. Оба предложенных метода дают близкие значения исследуемых величин с сопоставимыми величинами стандартного отклонения. Главным преимуществом такого подхода является объективность — зная внешние экспериментальные параметры, всегда можно получить скорость и коэффициент затухания по зафиксированному сигналу.

**л и т е р а т у р а**

1. Труэл Р. Ультразвуковые методы в физике твердого тела / Р. Труэл, Ч. Эльбаум, Б. Чик. – М. : Мир, 1978.

2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.

3. ВНИИФТРИ. Руководство по эксплуатации. Установка для измерения скорости распространения и коэффициента затухания продольных ультразвуковых волн в твердых средах ИЗУ-3. – Хабаровск. – 2017.

4. ГЭТ 189-2014. Государственный первичный эталон единиц скоростей распространения и коэффициента затухания ультразвуковых волн в твердых средах [Электронный ресурс]: сайт института ВНИИФТРИ. – Режим доступа: https://www.vniiftri.ru/standards/vibroakusticheskie-izmereniya-izmereniya-akusticheskikh-i-gidroakus ticheskikh-velichin/get-189-2014-gosudarstvennyy-pervichnyy-etalon-edinits-skorostey-rasprostraneniya-i-koeffitsienta-za (дата обращения: 20.05.2021).

5. LeCroy WaveSurfer Oscilloscope Operator’s Manual [Электронный ресурс]: руководство по эксплуатации. – Режим доступа: http://cdn.teledynelecroy.com/files/manuals/ws-om-e\_rev\_b.pdf (дата обращения: 20.05.2021).

6. Aussel J.-D. Precision laser-ultrasonic velocity measurement and elastic constant determination / J. -D Aussel, J. -P. Monchalin // Ultrasonics. – 1989. – V. 27(3). – р. 165-177.

7. Addison, P. S. The illustrated wavelet transform handbook: introductory theory and applications in science, engineering, medicine and finance / P. S. Addison // CRC press – 2017.

8. Kronland-Martinet, R. Analysis of sound patterns through wavelet transforms / R. Kronland-Martinet, J. Morlet, A. Grossmann // International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence – 1987, 01(02), p. 273–302.