

УДК 538.9

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГИСТРИРУЕМОГО ЭХО-СИГНАЛА УЛЬТРАЗВУКОВОГО  
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ С ПОМОЩЬЮ ФУРЬЕ И ВЕЙВЛЕТ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ  
И ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА**

И.Д. Балданова

Научный руководитель: доцент, к.т.н., Г.В. Гаранин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [ldb6@tpu.ru](mailto:ldb6@tpu.ru)

**INVESTIGATION OF THE REGISTERED ULTRASONIC NONDESTRUCTIVE TESTING  
ECHO SIGNAL USING FOURIER AND WAVELET TRANSFORMS AND FRACTAL ANALYSIS**

I.D. Baldanova

Scientific Supervisor: Assoc. Prof., PhD., G.V. Garanin

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str.,30, 634050

E-mail: [ldb6@tpu.ru](mailto:ldb6@tpu.ru)

***Abstract.** In some studies, processing methods for studying ultrasonic wave signal use different methods of transformation and analysis, such as Fourier transform, wavelet transform, fractal analysis [1-4]. The relevance of this study is to find additional parameters that can characterize the registered ultrasound signal to get more information, as well as to optimize the algorithm for processing the ultrasound signal. The purpose of this work is to study the A-scan of the registered ultrasound signal using Fourier and wavelet transforms and fractal analysis in the MATLAB software package.*

**Введение.** В некоторых работах, описывающих методы обработки ультразвукового сигнала неразрушающего контроля, используются различные способы преобразований и анализа, такие как Фурье преобразование, вейвлет-преобразование, фрактальный анализ [1-4]. Например, в работе [1] описан алгоритм обработки сигнала с помощью преобразования Фурье для выявления границы раздела между металлом и композитом. В работе [2] с помощью вейвлет-преобразования разработан метод фильтрации ультразвуковых сигналов, для выделения откликов плохо различаемых на уровне максимумов в А-скане, которые характеризуют дефекты в материале. В следующих исследованиях [3,4] вейвлет-преобразование представляется как математический аппарат, который хорошо подходит для изучения локальных масштабных свойств фрактальных объектов, что может быть полезно для изучения ультразвуковых спектров, полученных с помощью вейвлет-преобразования. Актуальность данного исследования заключается в нахождении дополнительных параметров, которые могут охарактеризовать регистрируемый сигнал ультразвука, для получения дополнительной информации об объекте контроля, а также в оптимизации алгоритмов обработки ультразвуковых сигналов.

Цель данной работы заключается в изучении А-скана регистрируемого ультразвукового сигнала с помощью Фурье и вейвлет преобразований и фрактального анализа в программном пакете MATLAB.

**Экспериментальная часть.** Имеется А-скан регистрируемого сигнала ультразвуковой волны, измеренный датчиком с номинальной частотой 10 МГц (рис.1б). Преобразование Фурье отображает сигнал, произведенный во времени к тому же сигналу, произведенному в частотной области. Преобразование Фурье задано для вектора  $x$  с  $n$  равномерно дискретизированными точками:  $y_{k+1} = j = 0n - 1 \omega / k x_{j+1}$ , где  $\omega = e^{-2\pi i/n}$  является одним из  $n$  комплексных корней, где  $i$  мнимая единица. Для непрерывного сигнала дискретное вейвлет-преобразование выглядит следующим образом:  $T_{m,n} = -\infty \int x(t) \psi_{m,n}^*(t) dt$ . Величины  $T_{m,n}$  также известны как вейвлет-коэффициенты.

В качестве критерия наличия у сигналов фрактальных свойств выступает выполнимость зависимостей, характеризующих поведение дельта дисперсии и структурной функции. В данном источнике [5] подробно описаны критерии наличия фрактальных признаков сигнала, обладающим гауссовским распределением, из которого выражение дельта-дисперсии включает себя параметр  $D = -\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\log N(\Delta t)}{\log \Delta t} = 2 - H$ . Показатель Херста в зависимости от своего значения характеризует персистентность ( $0.5 < H < 1$ ) или антиперсистентность ( $0 < H < 0.5$ ) текущей выборки. Когда ( $0.5 < H < 1$ ), мы наблюдаем процесс, сохраняющий, тенденцию роста или уменьшения мгновенных амплитуд в выборке, т. е. процесс с памятью. В случае, когда ( $0 < H < 0.5$ ), рост амплитуд огибающей сигнала в «прошлом» означает уменьшение в «будущем», и наоборот, т. е. процесс, более подверженный переменам, которые часто обозначают как «возврат к среднему» [6].

**Результаты.** На рисунке 1(а) изображен спектр амплитуды от частоты, полученный с помощью преобразование Фурье. Из графика можно понять, что для максимального значения амплитуды, равной 840 о.е., частота сигнала определена как 7,48 МГц.

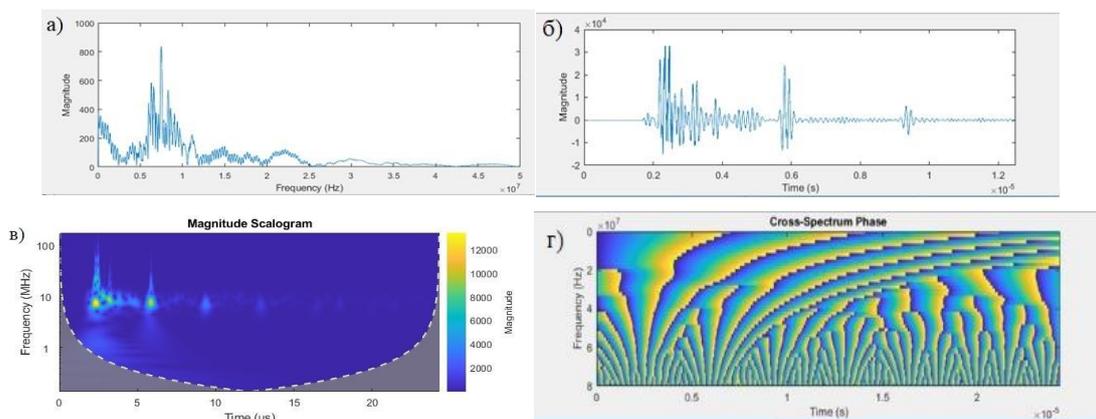


Рис.1. а) спектр амплитуды от частоты, полученный с помощью преобразования Фурье; б) А-скан регистрируемого сигнала ультразвуковой волны; в) спектр, полученный с помощью вейвлет-преобразования по амплитуде; г) спектр вейвлет-преобразования по фазе

Рассмотрим взаимосвязь между А-сканом и спектром вейвлет-преобразования по амплитуде (рис.1б, 1в). На частоте 10 МГц видно (рис. 1в), что значения амплитуды максимально, в целом значения амплитуды совпадают с А-сканом (рис. 1б), а также имеется визуальное сходство двух изображений. Рассмотрим взаимосвязь между А-сканом и спектром вейвлет-преобразования по фазе. Если посмотреть на А-скан (рис. 1б), то донные сигналы соответствуют участкам на рисунке 1(г), где ширина между

линиями значительно больше, чем в других участках. Также на рисунке 1(г) можно заметить повторяющиеся элементы. Можно ли сказать, что данный спектр имеет фрактальные признаки, пока не ясно. Однако мы можем рассмотреть регистрируемый сигнал А-скана со стороны фрактального анализа.

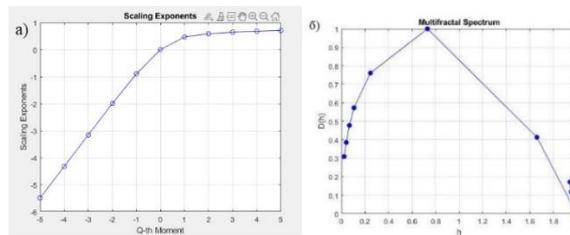


Рис. 2. а) график зависимости масштабирующей экспоненты параметра Херста от статистического момента (скейлинг); б) мультифрактальный спектр

Исходя из рисунка 2(а) сигнал является мультифрактальным, так как зависимость масштабирующей экспоненты параметра Херста от статического момента является нелинейным. Исходя из рисунка 2(б) мультифрактального спектра максимум кривой, напоминающий параболу, по значению параметра Херста совпадает с рассчитанным параметром ( $H = 0,7467$ ), отсюда следует, что мультифрактал является персистентным.

**Заключение.** Были получены спектры Фурье и вейвлет-преобразований и фрактального анализа А-скана регистрируемого сигнала ультразвуковой волны. Наибольший интерес к изучению вызывает фрактальный анализ. Было выяснено, что регистрируемый сигнал ультразвуковой волны является фрактальным, следовательно данный сигнал имеет фрактальные свойства. В дальнейшем предстоит изучение спектра вейвлет-преобразования по фазе, который также вызывает большой интерес. Данный спектр планируется изучить со стороны фрактального анализа. И как могут быть связаны фрактальные свойства сигнала со спектром вейвлет-преобразования по фазе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jasiūnienė E. et al. Ultrasonic non-destructive testing of complex titanium/carbon fibre composite joints // Ultrasonics. – 2019. – V. 95. – P. 13-21.
2. Wu H.C., Gupta N., Mylavarapu P.S. Blind multiridge detection for automatic nondestructive testing using ultrasonic signals //IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. – 2006. – V. 53., №. 10. – P. 1902-1911.
3. Arneodo A., Grasseau G., Holschneider M. Wavelet transform of multifractals //Physical review letters. – 1988. – V. 61., №. 20. –P. 2281-2284.
4. Kumar P., Foufoula-Georgiou E. Wavelet analysis for geophysical applications //Reviews of geophysics. – 1997. – V. 35., №. 4. – P. 385-412.
5. Короленко П.В., Маганова М.С., Меснянкин А.В. Новационные методы анализа стохастических процессов и структур в оптике – М.: Издательство Моск. ун-та, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. ДВ Скобельцына, 2004. – 81 с.
6. Потапов А.А. Фракталы, скейлинг и дробные операторы в радиотехнике и электронике: современное состояние и развитие // Журнал радиоэлектроники. – 2010. – №. 1. – С. 1–1.