

УДК 519.6 534.8 517.443

Дискретный спектральный анализ акустических импульсов при оптоакустических исследованиях полимеров и композитов

Чертищева С.А.¹, Судьенков Ю.В.¹, Кучмин А.Ю.²

Санкт-Петербургский государственный университет¹, Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН)²

Аннотация: В работе представлена разработанная методика дискретного спектрального анализа импульсных акустических сигналов. Приведены результаты спектрального анализа наносекундных акустических импульсов, регистрируемых при оптоакустической дефектоскопии образцов полимеров и композитов. Показаны преимущества представленной методики в сравнении со стандартной методикой быстрого Фурье-анализа.

Ключевые слова: оптоакустика, дискретный спектральный анализ, вейвлет-фильтрация.

Представлена методика дискретного спектрального анализа наносекундных оптоакустических импульсов в полимерах (оргстекло, стекло) и композитах (углепластик, стеклопластик). Целью работы является повышение точности расчета дисперсии скорости и затухания за счет автоматизации предобработки данных и подавления шумов регистрирующей системы при помощи вейвлет-фильтрации.

В работе использовался оптоакустический метод исследования [1], основанный на термоупругом эффекте. В ПВДФ-пленке ($h = 25$ мкм) лазерным импульсным излучением ($\lambda = 1.06$ мкм, $\tau \approx 2$ нс) осуществляется генерация акустических сигналов. Регистрация эхо-импульсов проводилась пьезодатчиком, сигнал с которого записывался осциллографом с частотой дискретизации 2 ГГц. Рабочий диапазон частот составил от 1 МГц до 70 МГц.

Традиционный анализ быстрого преобразования Фурье (БПФ) в OriginLab оказался неэффективен для композитных материалов из-за большого затухания и высокого уровня шума регистрирующей системы, а также из-за невозможности пакетной обработки серии импульсов. Поэтому была предложена методика предобработки сигнала в среде MATLAB, основанная на задаче об идентификации нестационарного динамического объекта [2]. Алгоритм работы программы состоит из трех основных этапов:

1. Фильтрация сигнала осуществлялась с использованием вейвлет-разложения для удаления аппаратного шума с сохранением фазовой структуры.
2. Моделирование временного профиля каждого импульса суммой гауссовых функций с последующей оптимизацией параметров методом наименьших квадратов.
3. Расчет спектра от аналитической суммы гауссиан вместо численного БПФ и вычисление дисперсии скорости и затухания с высоким разрешением по частоте.

Для исследуемых образцов стандартными методами дефектоскопии были получены следующие значения скорости звука c_0 и затухания α : стекло 6047 м/с и 0.36 см^{-1} , оргстекло 2700 м/с и 0.35 см^{-1} , углепластик 3020 м/с и 1.39 см^{-1} , стеклопластик 2741 м/с и 1.92 см^{-1} .

Для стекла получено минимальное значение дисперсии скорости. Оргстекло демонстрирует вязкоупругое поведение, наблюдается практически линейный рост затухания и выраженная дисперсия скорости. Высокое затухание в композитах (углепластик, стеклопластик) обусловлено рассеянием на волокнах и пористостью материала [3]. Дисперсия скорости стеклопластика указывает на его вязкоупругую природу, как и для оргстекла.

Предложенный алгоритм в MATLAB позволил снизить погрешность моделирования формы импульса менее, чем до 0.1% и получить гладкие спектральные кривые без скачков фазы, что невозможно при использовании стандартных оконных функций быстрого преобразования Фурье. Также был выявлен основной недостаток метода – это проявление эффекта Гиббса на высоких частотах, требующее дополнительного сглаживания моделей полиномом.

Таким образом, предлагаемый дискретный спектральный анализ позволил автоматизировать процесс выделения окна нестационарных акустических сигналов и их обработки от шума измерительной системы, что обеспечивает надежную оценку дисперсии и затухания (особенно в сильно поглощающих материалах), превосходя традиционные подходы по точности и скорости обработки массивов данных.

Литература

1. Судьенков Ю.В. Исследование термомеханических и ударно-волновых процессов в твёрдых телах при наносекундных длительностях возмущений: автореферат дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.02.04. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 2014. 265 с.
2. Кучмин А.Ю. Проблемы идентификации нестационарных динамических объектов // Информационно-управляющие системы. 2018. № 2 (93). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-identifikatsii-nestatsionarnyh-dinamicheskikh-obektov>. Дата обращения: 25.09.2023.
3. Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Исследование частотных зависимостей фазовой скорости продольных акустических волн в пористых углепластиках с использованием широкополосной акустической спектроскопии с лазерным источником ультразвука // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85, № 1. С. 127-133. DOI: 10.31857/S0367676521010282.

MSC 65T50, 42C40, 94A12

Discrete spectral analysis of acoustic pulses in optoacoustic investigations of polymers and composites

S.A. Chertishcheva¹, Yu.V. Sudenkov¹, A.Yu. Kuchmin²

Saint Petersburg State University¹, Institute for Problems
in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences²

Abstract: The paper presents a developed methodology for discrete spectral analysis of pulsed acoustic signals. The results of the spectral analysis of nanosecond acoustic pulses recorded during optoacoustic defectoscopy of polymer and composite samples are presented. The advantages of the proposed technique over the standard Fast Fourier Transform (FFT) method are demonstrated.

Keywords: optoacoustics, discrete spectral analysis, wavelet filtering.