

Вейвлет-анализ в виброакустическом методе контроля



Михаил КВАШНИН
Mikhail Ya. KVASHNIN

Николай КВАШНИН
Nikolai M. KVASHNIN



Иван БОНДАРЬ
Ivan S. BONDAR

Квашнин Михаил Яковлевич – кандидат технических наук, доцент Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева, Алматы, Казахстан.
Квашнин Николай Михайлович – кандидат технических наук, начальник отдела ООО «Эксперт», Москва, Россия.
Бондарь Иван Сергеевич – соискатель Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

В статье показано преимущество непрерывного вейвлет-анализа в сравнении с быстрым преобразованием Фурье при виброакустическом контроле многослойных строительных конструкций. Доказательства получены, в частности, в лабораторных условиях на модели в виде мраморной плиты и опорных мраморных кубов. Вейвлет-спектр дает возможность подробно рассмотреть все высокочастотные составляющие, которые располагаются в начале временной шкалы и быстро затухают, а амплитуда колебаний пластины на основной моде значительно уменьшается.

Ключевые слова: транспортное строительство, многослойные конструкции, виброакустический контроль, Фурье-спектр, преобразование Фурье, вейвлет-преобразование, вейвлет-анализ.

Виброакустический метод неразрушающего контроля нашел широкое применение при обнаружении дефектов связи покрытий и плит как в горном деле, так и транспортном строительстве. Он основан на ударном точечном возбуждении свободной поверхности объекта исследования и спектральном анализе виброакустического отклика объекта на ударное воздействие.

Традиционно при обработке данных виброакустического метода использовалось преобразование Фурье. Однако в некоторых случаях для оценки состояния объекта контроля недостаточно одного только Фурье-спектра. Это связано с тем, что преобразование дает представление о доле спектральных составляющих на всей протяженности сигнала, не раскрывая особенности их поведения во времени. Следовательно, оно в традиционном виде не приспособлено для анализа нестационарных сигналов, в том числе локализованных на некотором временном интервале. Поэтому спектральный анализ реальных сигналов необходимо осуществлять как по частоте, так и времени. Преимущества такого способа очевидны.

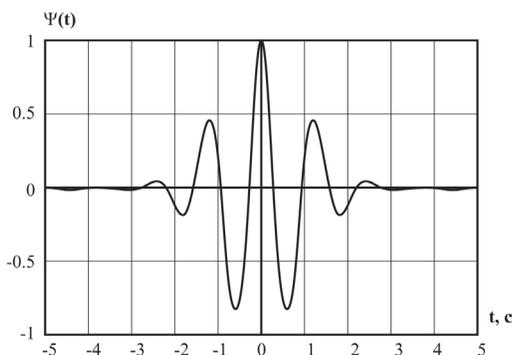


Рис. 1. График функции «вейвлет Морле».

Существует инструмент, позволяющий получить частотно-временное представление сигнала. Задача решается в рамках вейвлет-анализа.

Преобразование Фурье представляет исследуемый сигнал в виде линейной комбинации тригонометрических функций, которые ограничены по частоте, но не ограничены во времени. Вейвлет-преобразование использует функции (вейвлеты), локализованные как в частотной области, так и временной, и таким образом обеспечивает двумерное представление исследуемого сигнала в плоскости частота-положение. Это позволяет разделить крупные и мелкие детали сигналов, одновременно локализуя их на временной шкале.

В вейвлет-анализе можно выделить два направления: непрерывный и ортогональный. Непрерывный вейвлет-анализ по сравнению с ортогональным является избыточным с точки зрения реконструкции сигнала и требует больших вычислительных мощностей, но вместе с тем и дает более детальную информацию о сигнале.

Современные ЭВМ обладают достаточной производительностью для быстрого проведения непрерывного вейвлет-преобразования (НВП), поэтому именно его целесообразно использовать при анализе данных, полученных в ходе проведения неразрушающего контроля.

При осуществлении НВП сигнал перемножается с функцией (вейвлетом), после чего берется интеграл по времени от их произведения. Эти операции повторяются для различных значений масштаба вейвлета и его сдвига. Под масштабом понимается коэффициент, определяющий, во сколько раз данный вейвлет растянут во времени относительно исходного (материнского), сдвиг

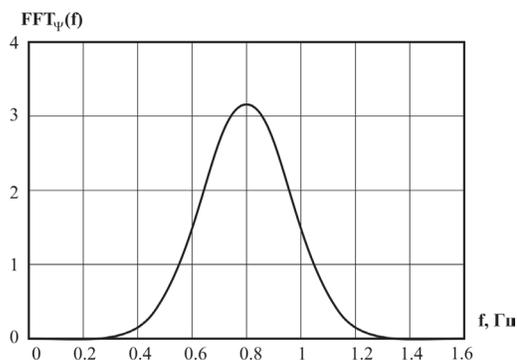


Рис. 2. Спектр функции «вейвлет Морле».

задает его положение относительно начала отсчета времени. Математически НВП находится следующим образом [1]:

$$CWT(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \int x(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt, \quad (1)$$

где s — масштаб; t — время; τ — сдвиг вейвлета относительно начала отсчета; функция $\Psi(t)$ — материнский вейвлет; член $(1/\sqrt{s})$ введен для нормализации — чтобы сигнал, представленный в различных масштабах, имел постоянную энергию.

Масштаб еще можно назвать аналогом частоты в преобразовании Фурье, но с тем отличием, что чем меньше масштаб, тем больше частота. Материнский вейвлет — это функция, являющаяся прообразом для функций, используемых в преобразовании. Все вейвлеты образуются путем изменения масштаба и сдвига материнского вейвлета.

Существует несколько функций, применяющихся в качестве материнских вейвлетов. Для анализа данных виброакустического метода контроля был выбран вейвлет Морле [2] с частотой 5. Аналитическое выражение функции:

$$\Psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} \cdot \cos(5 \cdot t). \quad (2)$$

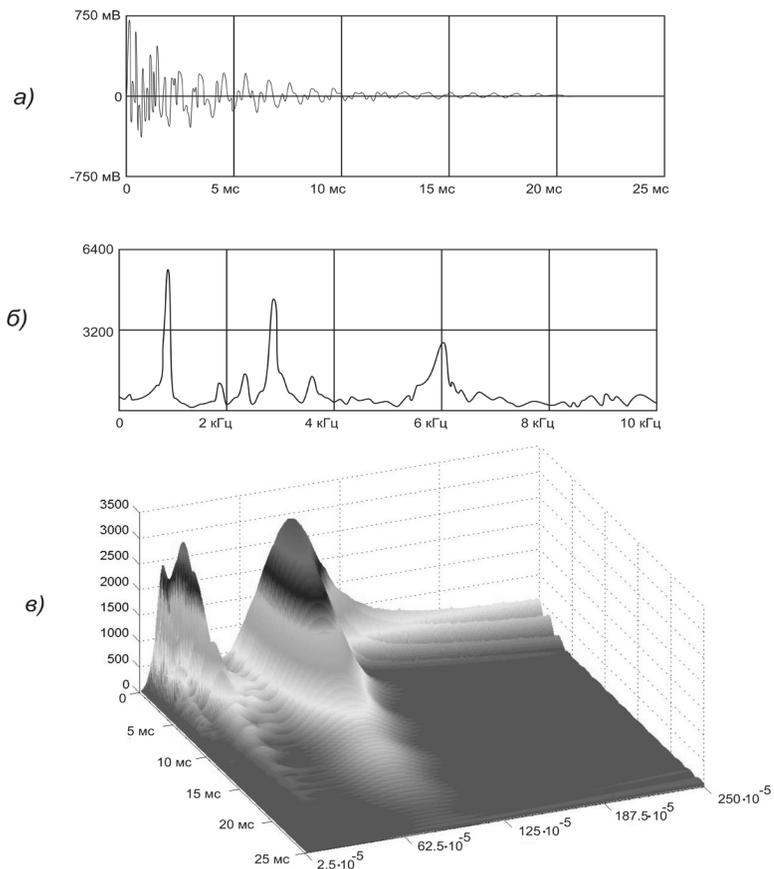
График этой функции представлен на рис. 1, а Фурье-спектр — на рис. 2.

Как видно из графика, функция представляет собой затухающую косинусоиду, основная доля энергии которой сосредоточена на интервале времени от -4 до 4 секунд. Спектр функции тоже локализован, это единственный пик, максимум которого приходится на частоту $0,8$ Гц. Отсюда можно найти связь между масштабом вейвлета и частотой максимума его спектра:

$$f = \frac{0,8}{s}. \quad (3)$$



Рис. 3. Результаты обработки данных виброимпульса, полученных над дефектом.
а – осциллограмма;
б – спектр Фурье;
в – вейвлет-спектр.



Из (3) следует, что масштабы и частоты связаны нелинейно. Этот факт говорит о том, что при проведении вейвлет-преобразования на больших масштабах обеспечивается хорошее разрешение по частоте, но будет уменьшаться, согласно принципу Гейзенберга, разрешение по времени.

С целью определения эффективности применения вейвлет-преобразования при анализе данных виброакустического контроля был проведен ряд измерений в лабораторных условиях.

Измерения проводились на модели, используемой для оптимизации виброакустического метода контроля [3]. Модель представляет собой мраморную плиту $680 \times 330 \times 50$ мм, жестко связанную по краям с двумя сплошными мраморными кубами $253 \times 253 \times 253$ мм так, что в центре плиты имел место дефект связи в виде полости с горизонтальными размерами 253×315 мм. Регистрация виброимпульса производилась пьезоаксельрометром КД-32 (собственная частота 10 кГц, толщинные колебания пьезокерамики).

Одна из точек установки датчика располагалась непосредственно над дефектом, а вторая – над одним из кубов. Поверхность плиты возбуждалась ударным воздействием и с выводов преобразователя снимался сигнал, который оцифровывался посредством платы АЦП, установленной на пользовательском компьютере. Данные конвертировались в удобный для проведения расчетов формат и сохранялись на жестком диске. В каждой точке установки датчика выполнялось десять идентичных ударов.

Расчеты проводились в среде MATLAB. Для проведения непрерывного вейвлет-анализа использовалась встроенная в систему функция «CWT». Масштабы брались от $2,5 \cdot 10^{-5}$ до $2,5 \cdot 10^{-3}$ с шагом $2,5 \cdot 10^{-5}$, таким образом охватывая диапазон частот от 320 Гц до 32 кГц. Вычислялись абсолютные значения всех элементов получившегося массива. После чего по этим значениям строился поверхностный график. Помимо непрерывного вейвлет-преобразования осуществлялось быстрое преобразование Фурье (БПФ) исходного сигнала, результат

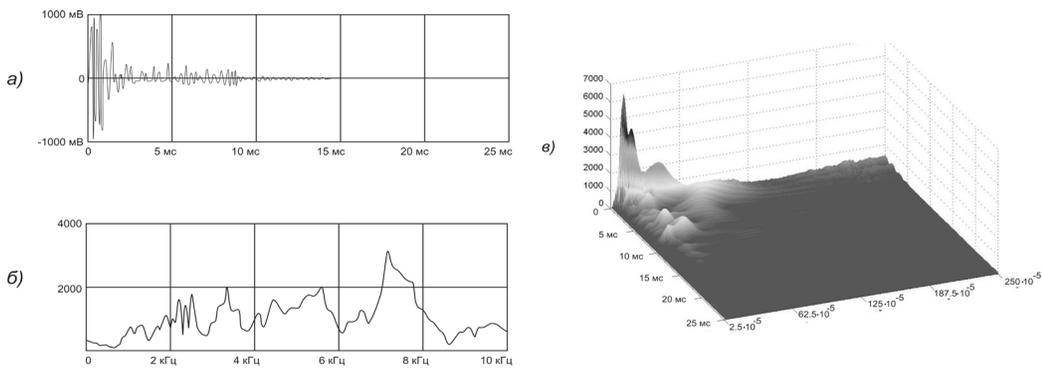


Рис. 4. Результаты обработки данных виброимпульса, полученных вне дефекта. а – осциллограмма; б – спектр Фурье; в – вейвлет-спектр.

которого впоследствии тоже визуализировался.

Внешний вид виброимпульсов, зарегистрированных над дефектом и вне дефекта, а также результаты их вейвлет-преобразования и преобразования Фурье показаны на рис. 3 и 4.

На графике спектра Фурье, полученного над дефектом, можно четко выделить три локальных максимума (950 Гц, 2700 Гц, 6000 Гц), соответствующие трем изгибным модам пластины. На графике вейвлет-спектра – три образования, максимумы которых находятся в масштабах $8,4 \cdot 10^{-4}$, $3 \cdot 10^{-4}$, $1,3 \cdot 10^{-4}$, что соответствует частотам 952 Гц, 2666 Гц, 6153 Гц. Причем их начальные амплитуды примерно одинаковы, но с увеличением частоты колебаний увеличивается коэффициент затухания, что проявляется в спектре Фурье в виде различной высоты спектральных выбросов.

В случае измерений, проводимых вне дефекта, как и ожидалось, на Фурье-спектре не прослеживаются такие четкие максимумы, как при измерениях над дефектом, и наблюдается смещение спектра в высокочастотную область. Однако остается невыясненным происхождение оставшихся спектральных выбросов. На вейвлет-спектре можно увидеть, что все высокочастотные составляющие располагаются в начале временной шкалы и быстро затухают, а амплитуда колебаний пластины на основной моде значительно уменьшилась (приблизительно в 10 раз).

ВЫВОДЫ

Из приведенных материалов видно, что вейвлет-преобразование, во-первых, более наглядно описывает физические процессы

при виброакустическом методе контроля и, во-вторых, при вейвлет-преобразовании более четко проявляются спектральные выбросы в низкочастотной области, что наиболее характерно для виброакустического метода контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 174 с.
2. Новиков Л. В. Основы вейвлет-анализа сигналов. – М.: ИАНП, 1999. – 356 с.
3. Квашнин М. Я., Квашнин Н. М. Исследование изгибных колебаний упругих пластин с целью оптимизации виброакустического метода контроля // Вестник КазАТК. – 2009. – № 3. – С. 5–12.
4. Дьяконов В., Абраменкова И. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. – СПб: Издательский дом «Питер», 2002. – С. 608.
5. Douka E., Loutridis S., Trochidis A. Crack identification in beams using wavelet analysis. International Journal of Solids and Structures, 2003, Vol. 40, No. 13–14, pp.3557–3569.
6. Hou Z., Noori M., Amand R. St. Wavelet-Based Approach for Structural Damage Detection. Journal of Engineering Mechanics, 2000, Vol. 126, No. 7, pp. 677–683.
7. Messina, Arcangelo. Refinements of damage detection methods based on wavelet analysis of dynamical shapes. International Journal of Solids and Structures, 2008, Vol. 45, No.14–15, pp. 4068–4097.
8. Картопольцев В. М., Бочкарев Н. Н., Селиванова Т. В. Метод коррекционной обработки виброграмм для определения частотных характеристик пролетных строений автодорожных мостов // Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации фундаментов, мостов и автомобильных дорог. Механизация строительства. Охрана окружающей среды: материалы Рос. науч. – техн. конф. – Пермь: ПГТУ, 2004. – 320 с. – С. 176–179.
9. Донец Н. А. Применение вейвлет-анализа в содержании пролетных строений мостов // Материалы IX научно-технической конференции студентов и аспирантов «Наука и молодежь XXI века» (г. Новосибирск, 16–17 ноября 2010 года), часть I – «Технические науки». – Новосибирск: СГУПС, 2011. – 132 с. – С. 41–43.
10. Kim, Hansang; Melhem, Hani G. Damage detection of structures by wavelet analysis. Engineering Structures, 2004, Vol. 26, No. 3, pp.347–362.

