

УДК 621.317

А.С. Стукалова

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В СРЕДЕ

Рассматривается возможность детального анализа геофизических сигналов и определения частотно-зависимой скорости распространения акустических волн в среде. Предложены алгоритмы оценки локальных особенностей сигналов и определения скорости распространения волн на основе дискретного вейвлет-преобразования. Показана целесообразность использования вейвлет-анализа сейсмоакустических сигналов для увеличения информативности и повышения эффективности обработки и интерпретации геофизических данных.

1. Введение. Мониторинг технического состояния любого здания или сооружения, особенно эксплуатируемого в условиях идущего рядом строительства, является залогом своевременного обнаружения и предупреждения возможных деформаций и изменения несущей способности конструкции и является основой безопасной эксплуатации. В условиях городской застройки особенно актуален мониторинг конструкций и подстилающих грунтов на основе неразрушающих методов контроля.

2. Физико-математические модели. Одним из неразрушающих методов мониторинга грунтов является метод сейсмоакустического зондирования, основанный на изучении особенностей распространения упругих (сейсмических) волн. Схема измерений представляет собой пару приемников, источник сейсмического возбуждения и регистрирующее устройство. Источником сейсмического возбуждения создают вертикальный импульс, генерируя группу поверхностных волн, имеющих различные частоты и скорости распространения. На некотором расстоянии от источника располагается пара датчиков, фиксирующих вертикальный компонент распространения релеевской волны. В полевой практике необходимые длина и частота волн обеспечиваются различными источниками импульсов нагружения. Скорость распространения релеевской волны выражается следующим соотношением:

$$V_R = fL_R,$$

где f - частота колебания, L_R - длина волны.

Согласно теории распространения волн в упругих полупространствах, релеевская волна распространяется с постоянной фазовой скоростью, не зависящей от частоты, если полупространство представляет собой однородную сре-

ду. При рассмотрении многослойной системы фазовая скорость зависит от частоты или длины волны. Влияние нижнего слоя становится более существенным по мере увеличения длины волны. При наличии сложной слоистой толщи с резко отличающимися по акустическим характеристикам грунтами обобщенная модель распространения сейсмических сигналов может быть представлена в виде суперпозиции волноводов [1]. То есть среда представляется как многозвенный контур, каждый из которых обладает своими характеристиками. При распространении сигнала происходит его отражение от неоднородностей. При этом меняется фазовая скорость. Дисперсия скорости звука зависит от геометрии слоев, неоднородностей внутри слоя и описывается спектрально-временными пространственными характеристиками отраженных сигналов. Эту особенность можно использовать для определения упругих свойств и структуры каждого слоя путем измерения скорости релеевской волны.

В настоящее время наиболее перспективным сейсмоакустическим методом является метод спектрального анализа поверхностных волн (*SAWS*), заключающийся в анализе распространения волн релеевского типа по поверхности грунта [2].

Метод *SAWS* на стадии обработки опирается на алгоритм быстрого преобразования Фурье, соответственно, помимо достоинств, ему присущи и все его ограничения (подробно рассмотрено в [3, 4, 6]). Применение математического аппарата вейвлет-анализа обеспечивает получение качественно новой информации о спектрально-пространственных характеристиках сигнала, позволяет максимизировать информативность результатов обработки и разделить спектр отра-

женного сигнала на отдельные колебательные контуры, соответствующие литологическим слоям. В отличие от традиционного Фурье-преобразования вейвлет-преобразование обеспечивает двумерную развертку исследуемого одномерного сигнала, при этом частота и координата рассматриваются как независимые переменные. В результате появляется возможность анализировать свойства сигнала одновременно в физическом (время, координата) и в частотном пространствах. Также вейвлет-преобразование, обладая подвижным частотно-временным окном, одинаково хорошо выявляет и низкочастотные, и высокочастотные характеристики сигналов [3].

3. Схема измерений и схема обработки.

В данной статье приведены результаты применения вейвлет-анализа при обработке и интерпретации отраженных сейсмоакустических сигналов и их сравнение. Для исследования были разработаны алгоритмы фильтрации и оценки локальных особенностей акустических сигналов на базе вейвлет-преобразования.

При выборе анализирующего вейвлета для разложения конкретного геоакустического сигнала критерием являлось максимальное приближение к классу функций, описывающих сигнал, т.е. желательно, чтобы форма вейвлета отражала поведение сигнала или его составляющих. Анализом эффекта от применения ряда различных материнских вейвлетов для оценки геофизических характеристик грунта выяснено, что для повышения информативности необходимо выбирать вейвлеты с центральной частотой порядка 0.2-0.7 для глубинных исследований (порядка 30-100 м) и 0.7-1.5 для мелкоглубинных исследований грунта и железобетонных твердых конструкций. На основе проведенных исследований и анализа работ других авторов сделан вывод о преимуществе использования для анализа сейсмоакустических сигналов материнских вейвлетов Гауссова семейства.

Для построения частотно-зависимой дисперсионной кривой (на основе дисперсионной кривой анализируется глубина и реальная скорость сдвиговой волны в каждом слое грунта и строится геологический разрез) на базе вейвлет-разложения был разработан алгоритм определения скорости распространения волн. Скорость вычисляется путем вычисления взаимокорреляционной функции сигналов двух каналов в отдельных частотных диапазонах. Данный алгоритм основан на фильтрующих свойствах вейвлет-преобразования и хорошо использует его свойства адаптивного разрешения по частоте. Однако в данном случае при выборе базисной функции следует руководствоваться критерием

минимума нулевых коэффициентов разложения (для определения взаимокорреляционной функции во всем частотном диапазоне).

Для исследования эффективности разработанных алгоритмов были проведены полевые исследования на участке с априорно известной геологией (изыскания проводились на территории строящегося в г. Санкт-Петербурге Орловского тоннеля).

Аппаратная часть измерительного комплекса включала в себя:

- сейсмодатчики КД-12, КД-24;
- усилитель «Bruel&Kjaer» 2651 (Дания);
- АЦП – аудиокарта AudioTrack Maya44;
- регистратор – notebook.

Обработка принятых акустических сигналов производилась на персональном компьютере при использовании универсального пакета MATLAB 7.0 и специально разработанного программного обеспечения. Данный программный продукт позволяет с помощью интерпретатора определять обобщенный геологический разрез грунта.

Отраженные акустические сигналы двух каналов, полученные в полевых условиях, поступают на вход АЦП, частота дискретизации которого составляет 44100 Гц. Далее, при плохом отношении сигнал-помеха следует этап шумоподавления и выделения низкочастотной информативной части спектра с помощью низкочастотного вейвлет-фильтра.

Построение вейвлет-спектра дает частотное представление о контурах и границах литологических слоев. Вейвлет-спектр одномерного сигнала представляет собой поверхность в трехмерном пространстве. Способы визуализации этой информации могут быть различными. Это могут быть и линии уровня, представляющие собой проекцию на плоскость частота-время, позволяющие проследить изменение интенсивности амплитуд на разных масштабах и во времени [4].

На рисунке 1 представлен вейвлет-спектр принятого сейсмоакустического сигнала в трехмерном пространстве в системе координат амплитуда-частота-время. При этом частота соответствует глубине литологических слоев, а амплитуда характеризует прочностные характеристики. Затухание амплитуды во времени до 5 % от максимального значения соответствует коэффициенту сцепления и углу внутреннего трения, изменение частоты резонанса соответствует изменению геометрии литологических слоев (склон, волнистость и т.д.), либо изменению прочностных характеристик по пространству и глубине. В низкочастотной области 1-10 Гц амплитудно-фазочастотные характеристики оги-

бающей нестационарного процесса образуют интерференционные (дифракционные) картины, которые дают информацию о геометрических характеристиках слоев и об изменении по глубине прочностных характеристик грунта.

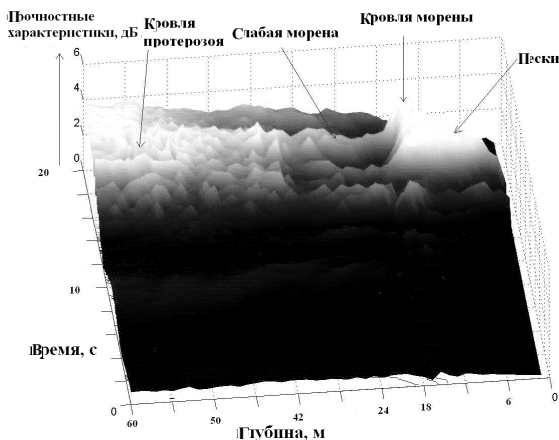


Рисунок 1 – Вейвлет-спектр отраженного сигнала

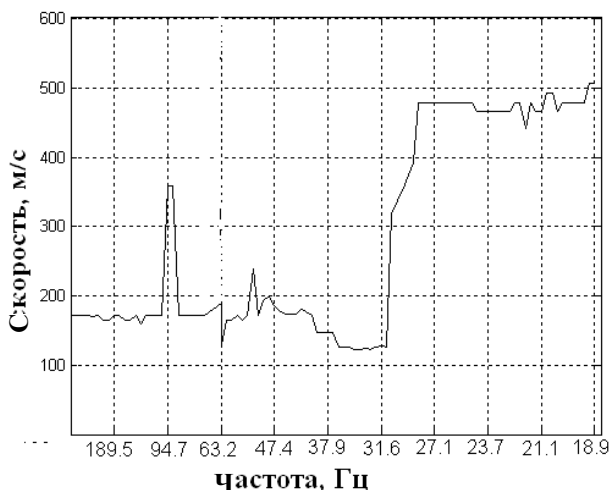


Рисунок 2 – Дисперсионная кривая скорости

Указанные характеристики также сопоставлялись с геологическими данными. Оценка показала, что коэффициент корреляции между геофизическими наблюдениями с последующей вейвлет-обработкой и данными геологии составляет не менее 0,8 [5]. По сравнению с методом *SAWS* было выявлено на 20 % больше геологических характерных пластов. Эффективность определения неоднородностей структуры (камни, вкрапления участков нехарактерных пород) составила 40 %. Однако данный показатель сильно

зависит от количества измерений, производимых *SAWS*-методом.

Построение частотно-зависимой дисперсионной кривой (рисунок 2) позволяет определить коэффициент Пуассона и другие геофизические параметры. (Данный метод позволяет определить скорость волны в слое с погрешностью, не превышающей 5 %.)

4. Выводы. Исходя из проведенных исследований можно сформулировать достоинства вейвлет-обработки сейсмоакустических сигналов по сравнению с *SAWS*-методом.

- Возможность изучения массива с разной степенью детальности, т.е. сверхвысокое разрешение, в том числе на высоких частотах (возможность регистрировать тонкие слои).

- Возможность минимизации количества измерений (достигается за счет двумерной развертки вейвлет-преобразований), уменьшение стоимости проведения исследований.

- Практически неограниченная глубинность исследований и независимость от занятости поверхности над точкой исследования.

Таким образом, применение вейвлет-обработки сигналов, полученных сейсмоакустическими методами, в совокупности с традиционными геологическими методами позволяет повысить надежность принятия геотехнических решений, а также снизить стоимость и трудоемкость геотехнических работ.

Библиографический список

1. Гурвич И.И., Смоленцев Г.Н. Сейсмическая разведка: учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. – М.: Недра, 1980. 551 с.
2. Ишихара К. Поведение грунтов при землетрясениях. Пер. с англ. / под ред. А.Б. Фадеева, М.Б. Лисюка / НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект» - СПб., 2006.-384 с.: ил.
3. Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук. 2001. Т.171. №5 С. 465-501.
4. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. - М.: ДМК Пресс, 2005.-304 с., ил.
5. Татаркин С.А., Стукалова А.С. Определение признаков тектонических явлений в грунте волновыми сейсмическими методами // Развитие городов и геотехническое строительство. 2007. №11. С. 191-197.
6. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т.166, № 11. С. 1146-1170.