

Специальные дискретные вейвлеты для обработки сейсмических данных

К.А. Дунаева, О.М. Сагайдачная, ФГУП Сибирский НИИ геологии, геофизики и минерального сырья, г. Новосибирск

Введение

Вейвлеты являются относительно новым математическим инструментом, активно используемым при обработке информации, в том числе в известных программных пакетах Corel Draw, MATLAB, Mathcad и Mathematica [1]. Широкий набор базовых функций вейвлетов позволяет адаптировать их к решению различных задач обработки сигналов: декомпозиции, реставрации и идентификации сигналов, удаления шумовой компоненты, сжатия файлов данных и т.д.

В основе алгоритма дискретного вейвлет-преобразования лежит использование двух связанных между собой цифровых фильтров, один из которых является сглаживающим, а второй - детализирующим, т.е. настроенным на особенности сигнала, размеры которых согласуются с эффективной шириной фильтра. Последовательное применение нескольких итераций вейвлет-преобразования позволяет получить однозначное либо "избыточное" вейвлет-разложение (вейвлет-спектрограмму) сигнала.

Вейвлет-спектрограммы в целом достаточно информативны и, в отличие от Фурье-спектрограмм, позволяют уверенно выявлять локальные особенности функций, обеспечивая их привязку по координатам n -мерного пространства.

В сейсморазведке при анализе волнового поля в качестве порождающего вейвлета обычно используется Морле-вейвлет [2]. Наши исследования были направлены на решение задач обработки сейсмических и вибросейсмических данных с использованием специально построенных классов вейвлетов на основе сейсмических импульсов.

Основы дискретного ортогонального вейвлет-преобразования

Подобно быстрому преобразованию Фурье (БПФ, FFT), дискретное вейвлет (wavelet)-преобразование (DWT) - быстрое линейное преобразование, которое оперирует вектором данных, преобразовывая его в цифровой форме в вектор той же длины [3]. Длина вектора данных (N) должна нацело делиться на некоторую степень числа 2, иначе вектор данных дополняется нулями до необходимой длины. В случае использования ортогонального вейвлета, дискретное вейвлет-преобразование легко обратимо, матрица обратного вейвлет-преобразования вычисляется путем транспонирования матрицы прямого вейвлет-преобразования. Вычисление как прямого, так и обратного вейвлет-преобразований занимает $O(N)$ операций, что меньше, чем для быстрого преобразования Фурье, для которого число операций равно $O(N \cdot \log(N))$.

Матрица прямого однозначного дискретного вейвлет-преобразования (рис. 1) конструируется в виде двух связанных между собой цифровых фильтров, один из которых является сглаживающим, а второй - детализирующим, т.е. настроенным на особенности сигнала, размеры которых согласуются с эффективной шириной фильтра. Вейвлет-преобразование, по существу, представляет собой аналог оптимальной согласованной фильтрации, для реализации которой задается сигнал известной формы. Вектор преобразованных данных разделяется на "глад-

кую" и "детализирующую" составляющие, каждая из которых состоит из $N/2$ отсчетов. В последующем "гладкая" часть может быть также разделена на гладкую ("гладкость 2 порядка") и детализирующую (2 порядка) части, и т.д. При проведении каждого следующего вейвлет-преобразования детализирующие части, полученные ранее, сохраняются неизменными. Такое последовательное применение нескольких итераций вейвлет-преобразований позволяет получить однозначное вейвлет-разложение (вейвлет-спектрограмму) сигнала, которое в дальнейшем может использоваться для фильтрации и сжатия данных (рис. 2). Для получения "избыточного" вейвлет-разложения на каждой итерации вейвлет-преобразования получают по N отсчетов как "гладких", так и "детализирующих" коэффициентов.

Основа алгоритма сжатия заключается в проведении нескольких итераций прямых вейвлет-преобразований и в последующем разделении данных. Если предположить, что самые мелкие детали связаны с некоторой помехой

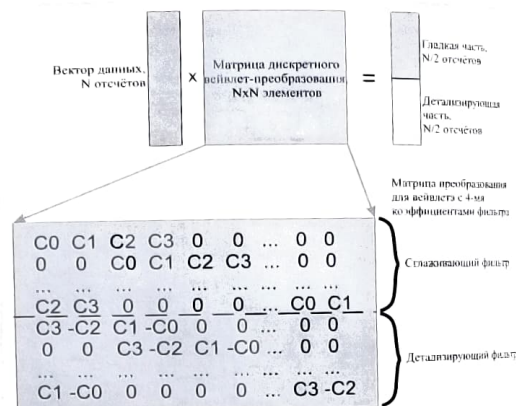


Рис. 1. Вычислительная схема одной итерации дискретного вейвлет-преобразования

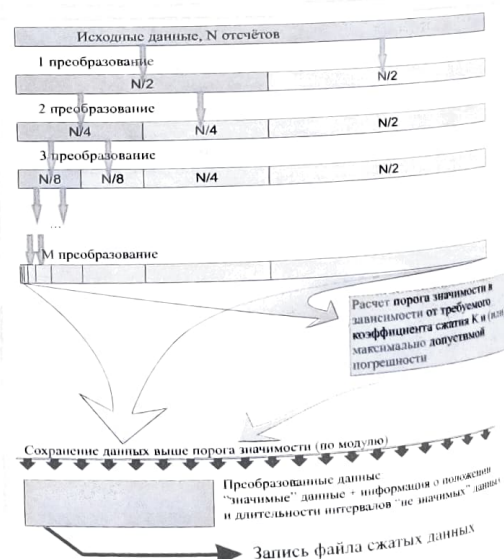


Рис. 2. Схема дискретного вейвлет-сжатия

(шумом), то, полагая коэффициенты из соответствующей детализирующей части первого уровня равными нулю, при восстановлении сигнала мы, с одной стороны, можем хранить вместо исходного вектора длины N вдвое меньший объем чисел ($N/2$ вейвлет-коэффициентов), а с другой стороны, уменьшим шумовую компоненту сигнала. Аналогично, если положить равными нулю коэффициенты детализирующей части второго уровня, то можно исходную информацию уменьшить в 4 раза и хранить лишь $N/4$ вейвлет-коэффициентов для последующего восстановления сигнала.

Но подход к уменьшению объема данных, основанный на исключении коэффициентов заданного уровня, не является наилучшим.

Коэффициенты детализирующих частей разных уровней могут описывать как детализацию помех, так и локальные изменения полезного сигнала. Поэтому целесообразнее применить алгоритм сжатия, при котором исключаются данные, меньшие некоторого порога значимости, который определяется из требований допустимой погрешности восстановления данных и (или) заданного коэффициента сжатия. В результате в векторе данных сжатого сигнала сохраняются все данные выше порога значимости (по модулю).

Апробация на математических моделях и полевых сейсмограммах широко известных классов дискретных ортогональных вейвлетов, таких как Daubechies, Coiflet, Symlet, показала практическую применимость их для выделения сейсмических сигналов и подавления помех, а также для сжатия данных в 2-3 раза. При сжатии в 8-10 раз искажения сейсмического сигнала существенны. Более допустимое увеличение коэффициента сжатия стало возможным с использованием специализированных классов вейвлетов, построенных на сейсмических импульсах.

Алгоритм построения дискретных ортогональных вейвлетов

Класс вейвлетов на основе сейсмических импульсов был разработан с использованием оригинального алгоритма итерационного построения дискретных ортогональных вейвлетов, суть которого в следующем. Дискретный ортонормированный вейвлет из L коэффициентов (L - четное) по построению должен удовлетворять условию нормировки и условиям независимости, всего $L/2$ условий:

$$\sum_{i=0}^{L-1} C_i^2 = 1 \text{ - условие нормировки,}$$

$$\sum_{i=0}^{L-2j-1} C_i \cdot C_{i+2^j} = 0, 0 < j \leq L/2-1$$

условие независимости функций базиса ($L/2-1$ уравнений).

Для однозначного решения этой системы из $L/2$ уравнений для L неизвестных, ее необходимо доопределить недостающими условиями. Это можно сделать разными способами. При построении вейвлета, похожего на волновой импульс $K(t)$, предлагается, например, приравнять часть коэффициентов значениям $K(t)$ в дискретных точках:

$$C_i = K(i \cdot \Delta t + \delta) \cdot \lambda, \quad i=0, L/2, (L/2+1 \text{ уравнений}),$$

где Δt - интервал дискретизации, δ - параметр сдвига дискретизации. Вспомогательный параметр λ вводится, чтобы разрешить условие нормировки вне зависимости от размера явно

заданных коэффициентов дискретизированного импульса $K(t)$.

Далее ищется решение системы из $L+1$ уравнений для $L+1$ неизвестных (L неизвестных - коэффициенты дискретного вейвлета и одна неизвестная - λ). Необходимо отметить, что эта система не является линейной в общем случае и может быть аналитически решена лишь для ограниченного числа значений L .

Найденный набор коэффициентов по построению удовлетворяет всем необходимым требованиям и формально является дискретным ортогональным вейвлетом. Однако, он может оказаться практически неприменимым для обработки сейсмических (вибросейсмических) данных, и это должно быть проверено.

В общем случае, большинство вейвлетов, получаемых на этом шаге, оказывается непригодно к использованию (т.к. при жестком задании первых $L/2 + 1$ коэффициентов, остальные могут "разбежаться" при удовлетворении условий ортонормированности, и получаемый вейвлет может потерять гладкость). Гладкие свойства вейвлета исправляются итерационным методом с использованием, в частности, вариации параметра сдвига дискретизации δ . Также необходимым условием "удовлетворительной гладкости" вейвлета можно считать требование, чтобы средняя амплитуда исходно жестко заданных коэффициентов превышала таковую для коэффициентов, вычисленных из предложенной выше системы уравнений:

$$\frac{1}{L/2+1} \sum_{i=0}^{L/2} |C_i| > \frac{1}{L/2-1} \sum_{i=L/2+1}^{L-1} |C_i|$$

Построение дискретных ортогональных вейвлетов на основе сейсмического импульса Клаудера

Построение специального дискретного вейвлета Kid реализовано на основе волнового импульса Клаудера $K(t)$, который описывает в области главного максимума автокорреляционную функцию вибросейсмического свип-сигнала [4]:

$$K(t) = \frac{\sin(\pi \cdot \Delta F \cdot t)}{\pi \cdot \Delta F \cdot t} \cdot \cos(2\pi \cdot f_{sr} \cdot t)$$

, где ΔF - полоса частот управляющего сигнала,

$$f_{sr} = \frac{f_{+} + f_{-}}{2} \text{ - средняя частота управляющего}$$

$$\text{сигнала, } -\frac{1}{f_{sr}} \leq t \leq \frac{1}{f_{sr}}$$

Общая схема построения специального дискретного вейвлета Kid приведена на рис. 3.

Оценка гладкости построенного вейвлета Kid ($L=10$, при начальных параметрах: полоса частот 7,519 - 11,035 Гц, частота дискретизации исходных вибrogramм 62,5 Гц) может быть проведена, в частности, на основе сравнений относительных погрешностей сжатия - восстановления (для разных коэффициентов сжатия), которые приведены на рис. 4. На рис. 4а показана относительная погрешность восстановления (D) для разных коэффициентов сжатия (k) и для разных значений параметра сдвига дискретизации (δ). Наилучшие результаты при обработке реальных коррелограмм были получены с вейвлетом Kid ($L=10$) при сдвиге $\delta = 2,7784$.



ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТОНКОСТИ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ

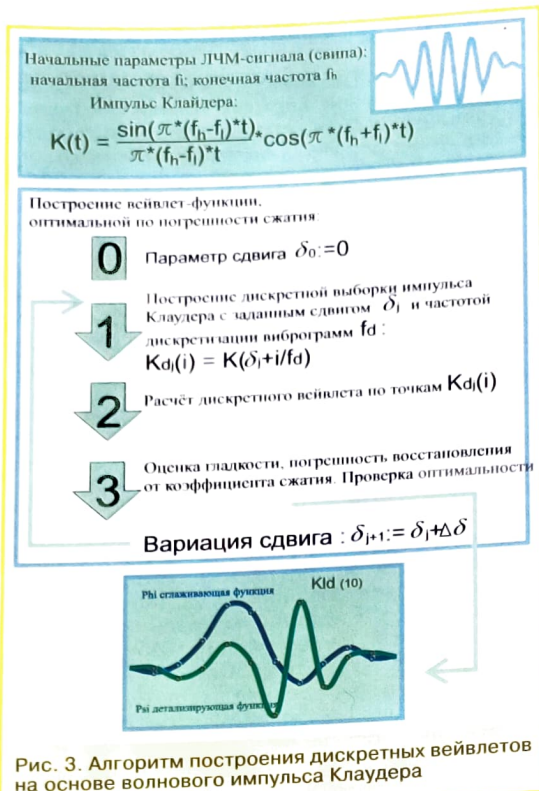


Рис. 3. Алгоритм построения дискретных вейвлетов на основе волнового импульса Клаудера

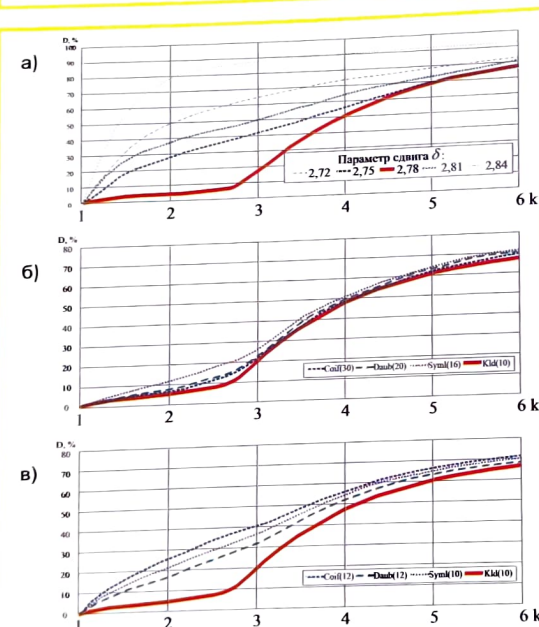


Рис. 4. Вычисленная погрешность (D) вейвлет-сжатия восстановления реальных данных: а) вейвлет Kld для различных сдвигов δ ; б) вейвлеты Kld (L=10, $\delta=2,7784$), Daubechies (L=20), Coiflet (L=30), Symlet (L=16); в) вейвлеты Kld (L=10, $\delta=2,7784$), Daubechies (L=12), Coiflet (L=12), Symlet (L=10)

Оценить эффективность применения специализированного вейвлета Kld для сжатия восстановления коррелограмм можно в сравнении с аналогичным применением известных вейвлетов из классов Daubechies, Coi et, Symlet (рис. 4б). Вейвлет Kld уже при 10 коэффициентах дает результаты заметно лучше, чем любые вейвлеты из известных ранее классов с 20 и даже 30 коэффициентами, реализация которых требует

значительно больше времени для обработки [5].

Результаты применения дискретных вейвлетов

На математических моделях реальных материалов показана практическая возможность использования специальных вейвлетов, построенных на основе волновых импульсов.

Разработанный программно-алгоритмический аппарат вейвлет-преобразования был опробован на сейсмических записях, полученных на удалении до 300 км с использованием мощного 40-тонного вибратора ЦВП-40 по методике глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) на опорном геофизическом профиле 2-ДВ (Магаданская обл.). Вибратор генерировал свип-сигнал в диапазоне частот от 6 Гц до 12 Гц. Длительность вибросейсмического сванса составляла около одного часа.

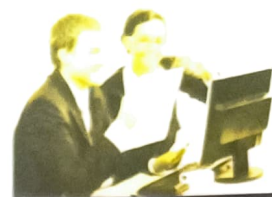
Для сжатия коррелограмм использовались вейвлеты с наибольшим числом коэффициентов (лучшей гладкостью). При сжатии с небольшими коэффициентами (до 2-3) происходит частичная фильтрация высокочастотной шумовой составляющей. В интервалах прослеживания целевых волн, которые имеют относительно высокую интенсивность, информация передается практически без искажений и при значительных коэффициентах сжатия. Для записей с высоким соотношением сигнал/шум при использовании специализированного вейвлета Kld можно сжимать коррелограммы в десятки раз, не искажая при этом характеристики доминирующих по интенсивности волн, например, в первых вступлениях (рис. 5).

Однозначное вейвлет-разложение содержит на каждом уровне детализации объем данных вдвое меньший, чем на предыдущем уровне. Суммарный объем коэффициентов вейвлет-разложения (сглаженный+детализирующие уровни) всегда равен исходному объему обрабатываемых данных. Такое разложение используется для фильтрации и сжатия сейсмических записей, дает наглядное представление о том, какая информация будет исключена в первую очередь при вейвлет-сжатии данных, что позволяет визуально оценить и подобрать оптимальный уровень сжатия с сохранением значимой информации, а так же выбрать наилучший вейвлет.

Избыточные вейвлет-спектрограммы на каждом уровне детализации содержат одно и то же число отсчетов, равное числу отсчетов в исходных данных, предоставляют возможность точнее локализовать их особенности, например, времени вступления целевых волн (рис. 6). При рассмотрении вейвлет-спектрограмм сейсмических сигналов, использование специальных "сейсмических" дискретных вейвлетов дает более четкую картину, чем использование известных вейвлетов из классов Daubechies, Coi et, Symlet.

Заключение

Эффективность вейвлет-преобразования и возможности обработки и интерпретации сейсмических данных существенно зависят от выбора вейвлета. Применение специальных дискретных вейвлетов, построенных на основе сейсмических импульсов, увеличивает качество обработки данных. Последовательное применение нескольких итераций вейвлет-преобразований позволяет получить однозначное либрационное вейвлет-разложение (вейвлет-спектрограмму) сигнала. Вейвлет-спектрограмма обеспечивает достаточно точную локализацию особенностей сигнала в вейвлет-частотной и временной области, и, в отличие от Фурье-спектрограмм, позволяют уверенно выявлять локальные особенности функций, обеспечивая их привязку по координатам n-мерного пространства.



ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

ТОНКОСТИ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ

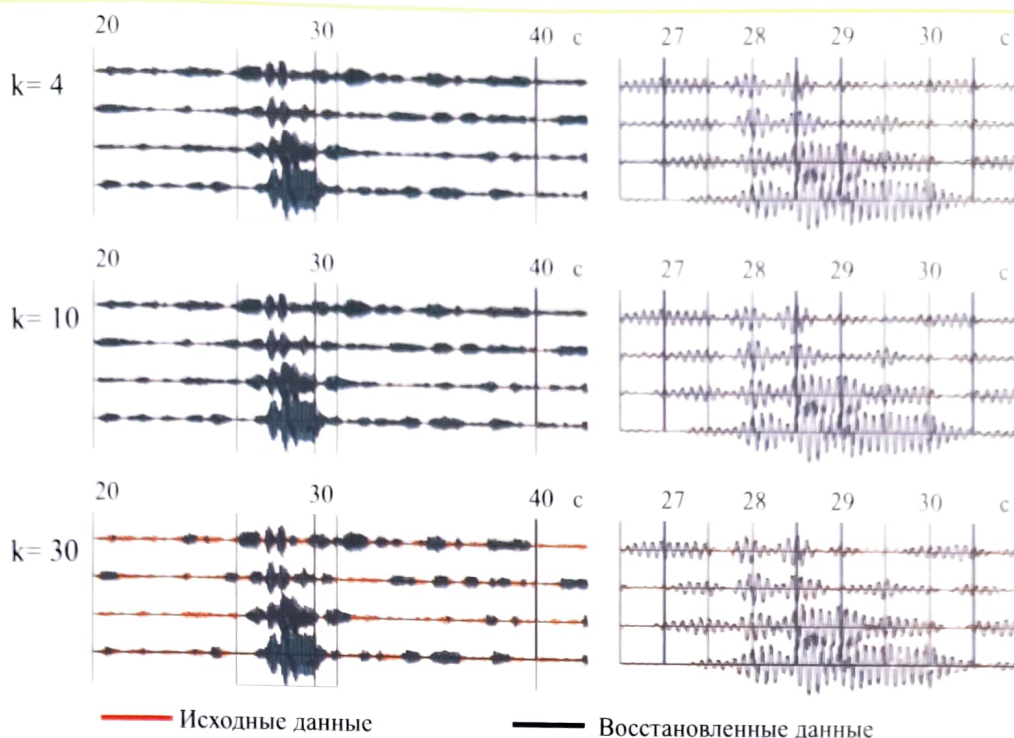


Рис. 5. Исходная и восстановленные коррелограммы, при разных коэффициентах сжатия с использованием вейвлета Kld ($L=10$)

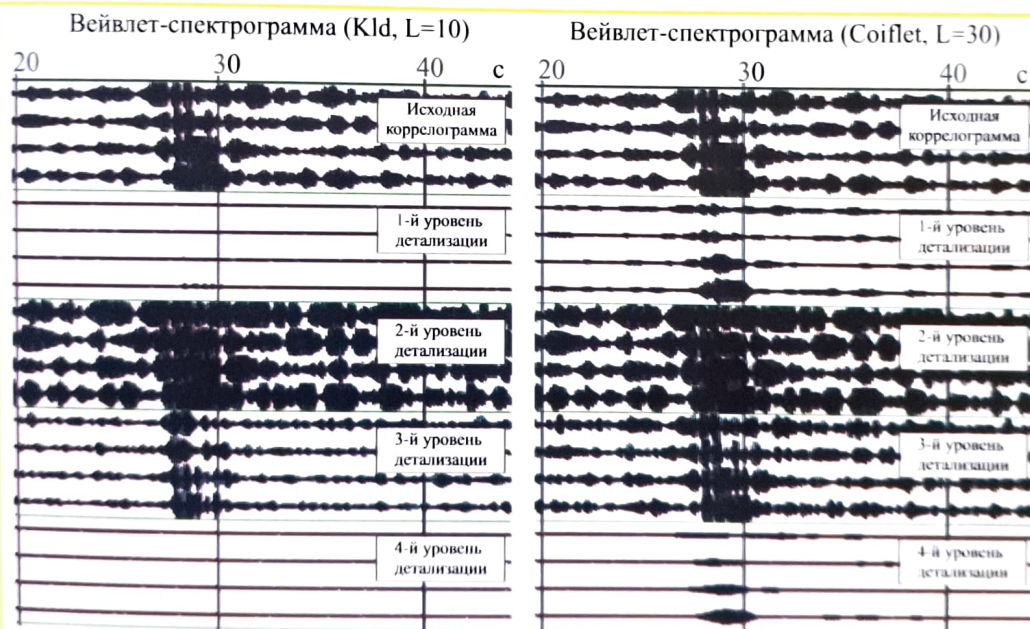


Рис. 6. Избыточные вейвлет-спектрограммы сейсмической записи

транста.

Реализованный аппарат дискретного вейвлет-преобразования и основанный на нем многократно-разрешающий анализ обеспечивают возможность сжатия (до 10 раз) сейсмической информации с сохранением динамических характеристик волн. При сравнении вейвлетов из разных классов, построенный вейвлет Kld уже при 10 коэффициентах дает лучшие результаты, чем известные вейвлеты с 20 и 30 коэффициентами из классов Daubechies, Coiflet, Symlet.

Литература:

1. Дьяконов В.А. Вейвлеты. От теории к прак-

- тике // М. СОЛОН-Пресс, 2004. – 400 с.
- Никитин А.А. Новые приемы обработки геофизических данных и их известные аналоги // Геофизика, 2006, 4, с. 11-15.
- Добещи И. Десять лекций по вейвлетам // Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. – 464 с.
- Вибрационная сейсморазведка / М.Б. Шнейерсон, О.А. Потапов, В.А. Гродзенский и др. Под ред. М.Б. Шнейерсона. М.: Недра, 1990. – 240 с.
- Dunaeva K.A., Sagaydachnaya O.M. The processing of seismic data with help of building special discrete wavelets // Extended Abstracts, International Conference & Exhibition (Saint