С.С. Крайниковский

ВЕЙВЛЕТ-ОБРАБОТКА ДАННЫХ В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ СКВАЖИН

ВВЕДЕНИЕ

В процессе разработки и исследования нефтегазовых месторождений широко применяются методы геофизических исследований скважин (ГИС). Эти методы представляют собой каротажные зондирования, когда в скважину опускается прибор и измеряет характеристики на разных глубинах, и последующую обработку полученных данных. Одними из широко используемых методов остаются метод высокочастотных индукционных каротажных изопараметрических зондирований (ВИКИЗ) и метод бокового каротажного зондирования (БКЗ). В лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН разработан прибор ВИКИЗ [1,2], а также многочисленные алгоритмы интерпретации полученных данных. Часть из них реализована в программных системах, таких как МФС ВИКИЗ и разрабатываемая система EMF Pro. Общая схема интерпретации, используемая в этих системах, такова: на первом этапе каротажная кривая анализируется, происходит обработка данных и выделяются пласты — участки с однородными характеристиками сигнала. Затем в полученных пластах строятся осесимметричные n-слойные модели, указывающие на распределение зон проникновения фильтрационного раствора и значение электрического сопротивления. Эти модели затем визуализируются в графическом интерфейсе и служат информативным признаком для специалиста, работающего с данными.

Для обеспечения правильного построения моделей и приемлемой скорости вычислений очень важной является задача первоначальной обработки, так как в результатах измерений часто присутствует аппаратурный и геологический шум, усложняющий анализ данных. Этот шум представляют собой высокочастотные колебания сигнала, которые чаще всего стремятся сгладить фильтрационными преобразованиями кривой. В этот же класс задач входит и корректная расстановка геологических пластов. Корректность определяется геоэлектрической теорией, а также эмпирически накопленным опытом специалистов-геофизиков, которые часто производят расстановку границ пластов вручную, исходя из изображения кривых на диаграмме.

1. ЗАДАЧА ВЫДЕЛЕНИЯ ПЛАСТОВ

Рассмотрим процесс построения алгоритма обработки данных. Для того, чтобы понять, какой же результат мы стремимся получить, необходимо построить математическую модель обработки. Так как источником информации, как было сказано выше, являются не только теоретические модели среды, но и эмпирический опыт специалистов, то необходимо разработать ряд критериев, по которым обработка данных считалась бы успешной. В результате совместной работы со специалистами — геофизиками в задаче разбиения на пласты были получены следующие критерии:

Пусть вещественная непрерывная функция $f(z)$ представляет значения сигнала от глубины.

1. Пластом считается участок постоянства сигнала с заданной точностью.
2. Граница пластов пролегает там, где изменение сигнала с глубиной наибольшее, то есть где достигается максимум модуля производной.
3. Так как реальные сигналы не бывают строго постоянными, то постоянство в данном случае принимается с определённой степенью точности δ и оценивается на интервале глубины: если $\forall z \in (a,b) \, | f(z) - c | \leq \delta$, где $f(z)$ — анализируемый сигнал, с — среднее значение на интервале, равное $\frac{1}{b-a}\int_a^b f(z)dz$, $a < b$, то $f(z)$ полагается *относительно постоянной* на интервале (a,b). Разрешение δ определяется опытным путём и зависит только от того, насколько мелкие детали геологического разреза необходимо выделить в конкретной задаче. Оно зависит от конкретных свойств разреза и задачи специалиста на данный момент.
4. Используется дополнительный критерий осреднения по глубине, когда высокочастотные детали (шум) не учитываются, а выделяются лишь главные особенности сигнала. При этом также возможно выделить эмпирический порог ε как размер интервала глубины, в пределах которого значения осредняются. ε определяется по тем же принципам, что и δ.

Опишем математическую постановку задачи расстановки границ пластов. Пусть $f:[a,b] \to R$, где $0 < a < b$ — непрерывная функция сигнала и $c:[0...N] \subset N \to R$ — её дискретный вариант, который определяется так: $c(0) = a$, $c(i) = f(a+ih)$, где $h \in (0,\infty)$ — шаг дискретизации, $a + Nh < b$, $a+(N+1)h \geq b$. Обозначим $x_i = c(i)$. *Разбиением* интервала глубины назовём множество точек $a = r_0 < r_1 < ... < r_k = b$, которое удовлетворяет некоторым из вышеописанных критериев. Существующие алгоритмы расстановки границ в МФС ВИКИЗ, описанные в [3], основаны на критерии 2) и работают с функцией вертикального разрешения, которая является производной значений зондов, предварительно обработанных с учётом специфики геофизического прибора. Границам r_i соответствуют локальные максимумы этой функции. В практической реализации алгоритм работает с дискретными значениями сигнала; вычисляются разностные производные.

Использование данного подхода сопряжено с трудностями и ограничениями, основными из которых является большая зашумлённость данных, характеризующаяся высокочастотными колебаниями сигнала. Кроме того, не учитывается критерии 3) и 4), когда алгоритм не может отличать низкоамплитудные колебания от больших скачков, а также отсеивать мелкие частоты.

В результате работы алгоритма на зашумлённых данных мощность пласта близка к шагу дискретизации кривой, пласт содержит порядка 1–2 точек, что неприемлемо с точки зрения интерпретационных алгоритмов и не отражает свойств геологического разреза.

На данный момент используется фильтрация данных, которая перед применением алгоритма позволяет сглаживать значения и избавляться от мелких несущественных деталей.

Фильтрация представляет собой функцию f: $[x_1...x_n] \to [y_1...y_n]$, которая определяется так: $y_i = \mathrm{f}(\mathrm{x}_i) = \sum_{j=-k}^{k} a_j x_{i+j}$, где $a_j \in \mathrm{R}$, $[x_1...x_n]$ — вектор значений каротажной кривой. Обычно вектор коэффициентов $[a_{-k} \dots a_k]$ симметричен относительно a_0, и a_0 больше по модулю остальных значений, $a_i > 0$, $\sum_{i=-k}^{k} a_i = 1$. Данное преобразование представляет собой осреднение с весовыми коэффициентами и в какой-то мере решает задачу фильтрации по глубине и использования критерия 4), так как сглаживает детали сигнала с характерным размером по глубине менее 2k. Однако сравнение работы алгоритмов расстановки границ экспертами-геофизиками при использовании фильтрации и без неё показывает, что существенного улучшения качества разбиения геологического разреза не происходит.

В постановке задачи разбиения разреза на пласты, основанной на критериях 1) и 3) для любого интервала $\left(r_i, r_{i+1}\right)$ из разбиения выполнены условия относительного постоянства f с погрешностью ε. Для того, чтобы разработать алгоритм, наиболее полно учитывающий все критерии, было решено исследовать сигналы с помощью вейвлет-преобразований, которые могут дать информацию как об амплитудной, так и о частотной составляющей геофизического сигнала, а также позволяют гибко решать задачи осреднения данных.

2. ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ К ЗАДАЧЕ ВЫДЕЛЕНИЯ ПЛАСТОВ

Идея вейвлет-преобразования сигнала в общем случае заключается в том, чтобы представить функцию из некоторого класса в виде разложения её по базисным функциям, подробнее об этих преобразованиях и их приложениях можно узнать из [4].

В технологических задачах обработки сигналов часто используется кратномасштабный вейвлет-анализ, описанный ниже. Исследуемая функция представляет собой конечный набор вещественных значений, что позволяет представить её как ступенчатую функцию с одинаковой длиной ступенек: $f_0(t) = c_i$ на интервале $[ih,(i+1)h[, i = 0...2^N - 1, h \in]0,\infty[$. Все функции такого вида, определённые на конечном полуинтервале, обозначим как пространство V_0. Аналогично можно рассмотреть пространство V_1 функций, определённых на том же полуинтервале, но ступеньки будут в 2 раза шире: $d_{k,i}$' Таким образом, можно получить последовательность вложенных пространств $V_m \subset V_{m-1} \subset ... \subset V_0$, где $m \le n$. Легко установить, что функции вида $\phi_{m,i} = \chi_{\left[i*2^m,(i+1)*2^m\right[}$, где $i = 0...2^{N-m}$, $\chi_{[a,b[}$ — характеристическая функция полуинтервала $\left[a,b\right[$, составляют базис соответствующего пространства V_m. Вводятся также дополнительные функции $\psi_{m,i}(x) = 1$, если

$x \in \left[i*2^m, (i+1)*2^m/2 \right[$ и $\psi_{m,i}(x) = -1$, если $x \in \left[(i+1)*2^m/2, (i+1)*2^m \right[$, и равные нулю в остальных случаях. Основным утверждением, используемым в обработке дискретных сигналов, является существование разложения сигнала по базисным функциям разных уровней:

$$f_0(x) = \sum_{i=0}^{N/2^m} c_{m,i}\phi_i(x) + \sum_{i=0}^{N/2^m} d_{m,i}\psi_{mi} + \sum_{i=0}^{N/2^{m-1}} d_{m-1,i}\psi_{m-1,i} + \ldots + \sum_{i=0}^{N/2} d_{1,i}\psi_{1,i}$$

С учётом этого сигнал можно расценивать как сумму функций, каждая из которых отражает вклад различных частотных составляющих. Суммы, соответствующие функциям $\psi_{k,i}$ отражают «вклад» частот характерным размером длины 2^k.

Рассмотрим процедуру преобразования сигнала с помощью методов трешолдинга коэффициентов, подробное описание которого можно найти в [5]. Преобразование представляет собой функцию $tr_c : R^+ \to R^+$, определяемую так: $tr_c(x) = x$, если $x \ge c$ и $tr_c(x) = 0$ иначе; $\mathrm{c} \ge 0$. Функция tr_c применяется к коэффициентам $d_{k,i}$, участвующим в разложении сигнала на подпространства, в результате получаются новые коэффициенты, которые будем обозначать как $d_{k,i}'$.

Рассмотрим функцию f_0', которая получается из аналогичной формулы разложения по подпространствам, но с помощью изменённых коэффициентов:

$$f_0'(x) = \sum_{i=0}^{N/2^m} c_{m,i}\phi_i(x) + \sum_{i=0}^{N/2^m} d_{m,i}'\psi_{m,i} + \sum_{i=0}^{N/2^{m-1}} d_{m-1,i}'\psi_{m-1,i} + \ldots + \sum_{i=0}^{N/2} d_{1,i}'\psi_{1,i}\ .$$

Отметим некоторые свойства f_0':

1) f_0' является ступенчатой функцией как линейная комбинация ступенчатых базисных функций.

2) Рассмотрим норму $\|f\|_\infty = \max\limits_{x \in dom(f)} |f(x)|$. Тогда $\|f_0 - f_0'\| \le cm$, где m — количество уровней разложения.

3) На любом постоянном полуинтервале значение с функции f_0' является средним значением f_0 на этом же полуинтервале.

Полученные свойства дают основания для использования данных видов преобразований в задаче разбиения геологического разреза.

- Решение 1: Пусть f_0 — функция геофизического сигнала, f_0' — преобразование, полученное с помощью трешолдинга коэффициентов. Значения границ пластов r_i положим равными границам «ступенек», то есть точкам f_0', соседние значения которых различны. Это решение обеспечивает выполнение критериев 1) и 3). Для заданной точности ε $c \le \frac{\varepsilon}{m}$ согласно свойству 2).
- Решение 2: Подвергнем коэффициенты $d_{k,i}'$ дополнительному преобразованию, которое зануляет все коэффициенты с индексами k меньше фиксированного значения l. В таком случае происходит удаление всех деталей, характерный размер которых менее $\delta = 2^{l-1}$, что позволяет утверждать о выполнении критерия 4).

На основе этих решений были проведены эксперименты с различными параметрами c и уровнями l, реализованные с помощью пакета MathLab, часть из которых была оценена экспертами — геофизиками.

На рисунках, приведённых ниже, изображены результаты работы алгоритма со следующими параметрами: зануление коэффициентов уровня 1, трешолдинг коэффициентов со значениями c =5, 15; m = 7. На горизонтальной оси отображается глубина в метрах, на вертикальной — показания приборов в виде разности фаз, в градусах. Анализ графиков показывает, что при меньших значениях коэффициента c пласты разбиваются более мелко, но приближают с хорошей точностью, в то время как при больших значениях коэффициента c выделяются всё более крупные пласты, но теряются мелкие особенности сигнала.

Другой эксперимент заключался в вариации уровня зануления l = 1 и l = 4 (что соответствует осреднению деталей характерной длиной 2 и 16 точек соответственно). На диаграммах, приведённых ниже, это соответствует 0.2 и 1.6 м.

Очевидно, что во втором случае теряются высокочастотные детали, представляющие единичные всплески и выбросы. При этом c = 5, как и прежде.

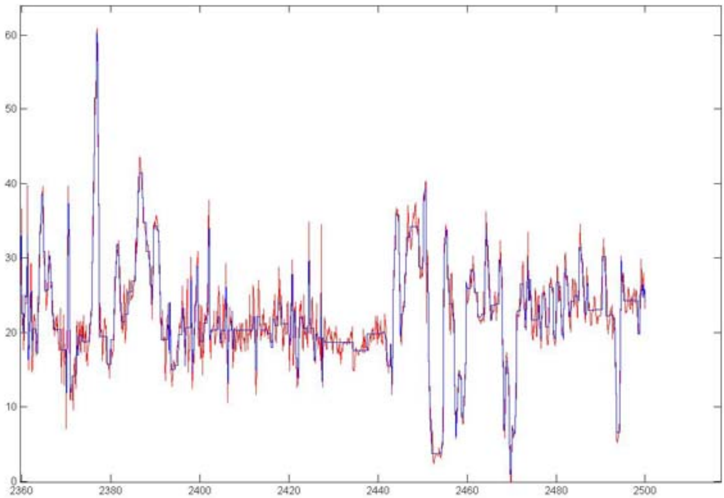

Рис. 1. Применение вейвлет-преобразования Хаара к каротажным данным. Коэффициент c = 5

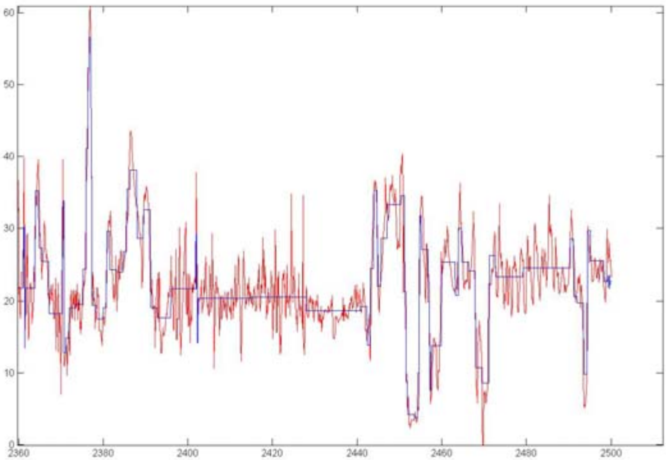

Рис. 2. Применение вейвлет-преобразования Хаара к каротажным данным. Коэффициент c = 15.

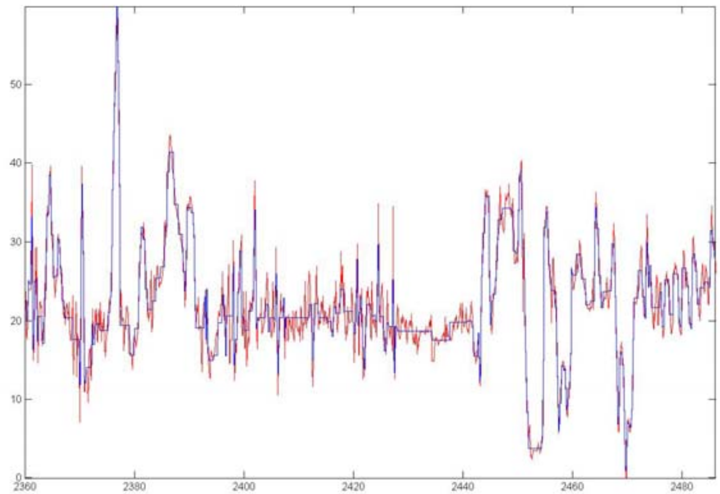

Рис. 3. Применение преобразования Хаара с удалением деталей уровня 1

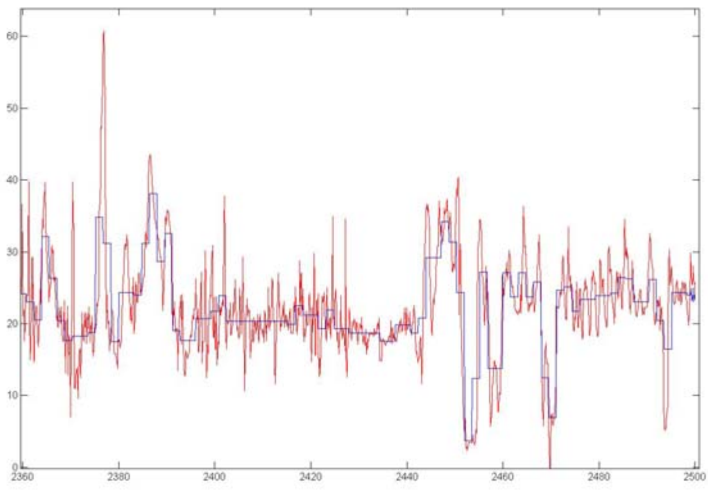

Рис. 4. Применение преобразования Хаара с удалением деталей уровня 4

3.ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Надо заметить, что оценка реальной эффективности работы алгоритмов в наибольшей степени формируется его использованием специалистами в геофизической практике, поэтому полученные результаты показывались специалистам-геофизикам, в результате чего были сделаны следующие замечания:

1) использование вейвлет-преобразований Хаара в большинстве случаев даёт более достоверную картину, чем прежний алгоритм, описанный в [3];
2) алгоритм, основанный на вейвлет-преобразованиях позволяет более гибко настраивать параметры обработки кривых;
3) недостатком может являться то, что длина пласта всегда есть число, кратное $2^k h$, что вносит некоторую «машинную составляющую» в картину разреза. Однако для работы алгоритмов интерпретации этот фактор не является существенным, либо может быть устранён при доработке алгоритма.

Перспективой развития данного подхода является разработка программных модулей, позволяющих настраивать параметры преобразований в пользовательском интерфейсе, а также усовершенствование самого алгоритма. Также важно установить, как будет формироваться исследуемая функция из показаний различных зондов прибора ВИКИЗ и провести более детальные оценки эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов Ю.Н., Жмаев С.С., Большаков В.И., Кисилев В.В., Мышлявцев А.В. Устройство для каротажного электромагнитного зондирования. Авторское свидетельство №1004940 (СССР). Бюл. изобр. № 10, 1983 г.
2. Снопков В.П., Антонов Ю.Н., Жмаев С.С., Киселев В.В. Устройство для электромагнитного каротажного зондирования. Патент РФ № 2092875. Бюл. изобр. № 28, 1997 г., 6 G 01 V 3/28, 3/18, 3/30.
3. Технология исследований нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ. Методическое руководство / Под ред. Эпов М. И, Антонов Ю. Н. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 2000. — 121 с.
4. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. — С.-Пб.: Изд-во Военного университета связи, 1999.
5. Алексеев К.А. Теория и практика шумоподавления в задаче обработки сейсмоакустических сигналов, материалы сайта http://matlab.exponenta.ru/