

Адаптивная фильтрация данных наземной сейсмической разведки методами нелинейной физики (вейвлетное преобразование, метод экспертных мод)

- Руннова А.Е., к.ф.-м.н., Храмов А.Е., д.ф.-м.н., СГТУ, г. Саратов,
- Павлов А.Н., д.ф.-м.н., СГУ, г. Саратов

Аннотация. В работе приведён краткий обзор современного применения вейвлетного анализа в сфере обработки и интерпретации геофизических сейсмических данных, а также представлены результаты разработки и применения методов дискретного, в частности, многомасштабного вейвлетного анализа для фильтрации характерных компонент сейсмической записи цифровых данных наземной сейсморазведки. Предложены методы построения фильтров для фильтрации локальных особенностей сигналов. Приведены результаты обработки экспериментальных данных.

В последние десятилетия плавно растет интерес к использованию различных аспектов вейвлет-анализа, одного из базовых математических инструментов нелинейной динамики, в прикладных областях науки и техники. Публикуемая работа посвящена разработкам методов изучения, диагностики и фильтрации различных волновых компонент сейсмических данных в области камеральных работ разведочной геофизики. На сегодняшний день большинство работ, результаты которых внедряются в практику сейсморазведки, в основном связаны с применением быстрого дискретного вейвлет-преобразования для сжатия данных и кратномасштабного анализа в задачах очистки сигналов от высокочастотных шумов [1]. Тем не менее, очевидно, что возможности вейвлетного анализа отнюдь не ограничиваются решением только подобных вспомогательных задач. Вейвлетный анализ может быть также успешно использован для цифровой обработки сигналов разведочной сейсмической геофизики в рамках инструментальной базы анализа и фильтрации различных компонент зарегистрированных колебаний, например, разделения полезной отраженной волны и паразитных звуковых, поверхностных или частично- и

полнократных волн [2]. В частности, вейвлет-анализ может эффективно применяться для распознавания близких по форме, интенсивности и частотным характеристикам сигналов на фоне шума. Кроме того, большие возможности вейвлетного преобразования для анализа конкретных особенностей экспериментальных цифровых сигналов позволяют осуществлять простую и эффективную фильтрацию диагностируемых паразитных компонент зарегистрированных данных. Публикации результатов многочисленных исследований, проводимых в различных областях естествознания [3, 4], неопровержимо доказывают, что вейвлет-анализ представляет собой мощный инструмент исследования, применимый к коротким, зашумлённым, многокомпонентным и нестационарным процессам, и развитие новых, базирующихся на вейвлет-преобразовании методов обработки и анализа сигналов сейсмической разведки, является актуальной задачей современной геофизики [4].

В настоящее время в рамках современного использования вейвлетного анализа в геофизике можно выделить две обширные сферы применения. Во-первых, весьма успешно решаются задачи применения вейвлетного преоб-

разования для изучения суммарных временных разрезов. Эта обширная и весьма перспективная область применения вейвлетного анализа в геофизике связана с последними этапами обработки и дополнительными инструментами геофизической интерпретации данных — расчётом и анализом атрибутов сейсмических записей. С самого начала интенсивного промышленного использования трёхмерной сейсморазведки возникла потребность в быстром анализе больших объёмов сейсмических данных и сокращении “ручной” интерпретации данных в рамках камеральных работ геофизических сейсморабот. Наиболее известными подобными инструментами и являются атрибутные методы интерпретации, позволяющие провести быструю идентификацию любых “особенностей” временных разрезов, например, геологических зон разломов. Во-вторых, выделим ряд задач, связанных с повышением соотношения сигнал/шум, весьма актуальные сегодня как один из примеров задач повышения качества данных [2]. В частности, одной из таких задач является проблема фильтрации регистрируемого конуса звуковых и поверхностных волн на сейсмограммах современной наземной разведки. В настоящей статье авторами предложена методика фильтрации данного типа волн на базе многомасштабного вейвлетного анализа. На сегодняшний день дискретный вейвлетный анализ является одним из лидирующих инструментов в цифровой обработке для решения задач сжатия и фильтрации данных [1, 5 – 8]. Несмотря на уже существующие и используемые в геофизической практике подходы, методы фильтрации на базе дискретного вейвлетного преобразования на настоящий момент отнюдь не совершенны и не позволяют в желаемой степени автоматизировать

процесс фильтрации и добиться уровня сохранения формы сейсмоимпульса, столь важного для подходов динамической обработки.

Рассмотрим возможность создания вейвлетных фильтров и повышения быстродействия процедур при обработке данных сейсморазведки. С этой целью может быть применен подход, основанный на процедуре дискретного вейвлет-преобразования с быстрым (пирамидальным) алгоритмом разложения. Дискретное преобразование имеет следующие преимущества по сравнению с непрерывным преобразованием:

1. Применение ортогональных базисных функций в рамках дискретного преобразования позволяет ограничиться меньшим числом коэффициентов разложения. При этом отсутствуют сильно коррелированные компоненты, что упрощает процедуру идентификации коэффициентов, ответственных за различные особенности формы анализируемого сигнала.

2. Использование пирамидального алгоритма разложения, использующего идеологию субполосной фильтрации [9], обеспечивает возможность проведения расчетов в режиме реального (или почти реального) времени. Именно это обстоятельство привело к широкому применению дискретного вейвлет-преобразования в различных областях современной техники.

Напомним, что среди особенностей дискретного преобразования выделяется отсутствие аналитической формы записи для применяемых базисных функций — если при непрерывном преобразовании существуют формулы, задающие вейвлет, то в рамках дискретного преобразования известны только таблицы коэффициентов [10]. Формально эти коэффициенты могут быть вычислены

путем решения некоторых алгебраических уравнений, но традиционно на практике исследователи работают с матрицами чисел, соответствующих выбору того или иного семейства функций разложения сигнала. Чаще всего это семейство образует ортонормированный базис, вследствие чего разложение по вейвлетам в рамках дискретного преобразования не является избыточным. Избыточные преобразования могут применяться в задачах, связанных с передачей и обработкой информации, но при этом важно отметить, что использование ортонормированных функций обеспечивает более точное представление сигнала. В частности, при выборе ортонормированного базиса упрощается процедура обратного преобразования (восстановления сигнала по коэффициентам разложения).

Итак, рассмотрим возможность создания вейвлетных фильтров и повышения быстродействия процедур при обработке сейсмоданных. С этой целью может быть применен подход, основанный на процедуре дискретного вейвлет-преобразования с быстрым (пирамидальным) алгоритмом разложения. В рамках концепции многомасштабного анализа нами будет использована идеология аппроксимации сигнала на разных уровнях разрешения и последующего анализа отклонений от аппроксимирующих функций. Применительно к рассматриваемым вопросам обработки данных сейсмической разведки ограничимся кратким изложением основных принципов разложения по вейвлетам с использованием пирамидального алгоритма. Исходный сигнал представим в виде дискретизованной функции времени $x(n) = x(n\Delta t)$ и поместим на вход квадратурных зеркальных фильтров нижних и верхних частот [8]. Сигнал на выходе

фильтра нижних частот с частотной характеристикой $g(n)$ представляет собой свёртку:

$$y[n] = (x \cdot g)[n] = \sum_{(-\infty < k < \infty)} (x[k]) (g[n-k]). \quad (1)$$

Одновременно сигнал $x(n)$ проходит через фильтр верхних частот (ВЧ), являющийся взаимосвязанным с фильтром нижних частот (НЧ)

$$g[n] = (-1)^n h[2M - n - 1], \quad (2)$$

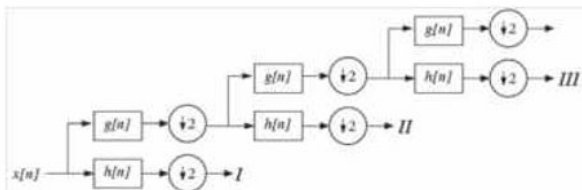
где M — длина области задания вейвлета.

Далее два временных ряда, полученных на выходе фильтров, прореживают, оставляя только чётные или нечётные отсчёты. В результате на выходе фильтров будут получены две последовательности отсчётов

$$y_{нч}[n] = \sum_{(-\infty < k < \infty)} x[k] g[2n - k], \quad (3)$$

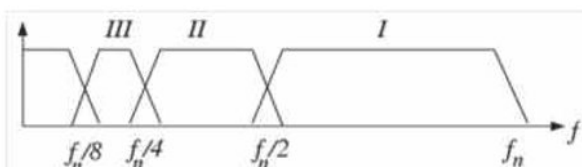
$$y_{вч}[n] = \sum_{(-\infty < k < \infty)} x[k] h[2n - k], \quad (4)$$

Вследствие прореживания в два раза ухудшается разрешение по времени каждой последовательности, но одновременное наличие обеих последовательностей позволяет восстановить исходный сигнал. Отметим, что каждый процесс (3), (4) характеризуется только половинной шириной полосы частот по сравнению с исходным сигналом $x(n)$. Процедуру фильтрации и прореживания можно продолжить, что приведет к последующему уменьшению вдвое ширины полосы частот выходного процесса после каждого этапа фильтрации. Вследствие этого изначально число отсчётов дискретизованного сигнала $x(n)$ должно составлять 2^m . Схематично многоступенчатая процедура фильтрации изображена на рис. 1 а, где I, II, III обозначают 3 уровня разложения, каждый из которых приводит к уменьшению вдвое частотного диапазона исходного процесса. Максимальное число таких уровней определяется длительностью сигнала — показателем степени m .



▲ Рис. 1А. Схема дискретного вейвлет-преобразования с помощью банка НЧ и ВЧ фильтров.

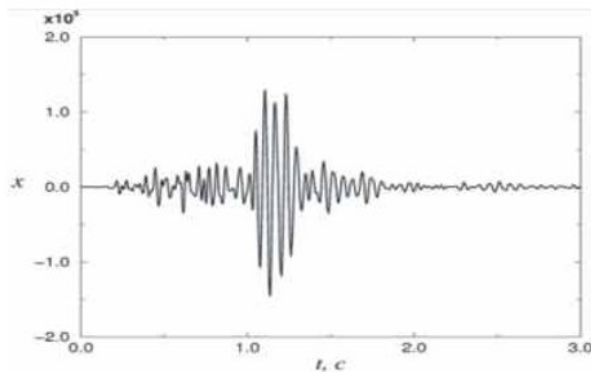
На рис. 1 б показано изменение частотного диапазона на разных уровнях разрешения. Представленная пирамидальная процедура разложения сигнала позволяет решать задачи фильтрации путём отбрасывания (или корректировки) коэффициентов разложения на разных масштабах (разных уровнях). Например, для фильтрации высокочастотного шума из экспериментальных данных можно приравнять нулю коэффициенты, характеризующие мелкомасштабную структуру, после чего провести процедуру обратного преобразования, позволяющую восстановить сигнал по вычисленным коэффициентам разложения.



▲ Рис. 1Б. Иллюстрация изменений частотного диапазона на разных уровнях разрешения при использовании пирамидального алгоритма разложения.

Обратимся теперь к анализу экспериментальных данных. Начнём рассмотрение с одноканального сигнала – данных одной из трасс сейсмограммы общего пункта возбуждения, изображенной на рис. 2 а.

Данная трасса помимо полезного сигнала содержит помехи (поверхностные и звуковые волны), имеющие большую амплитуду и локализованные в диапазоне [1.0, 1.3] с. Так как данные помехи превосходят по мощности сейсмический сигнал, проведение его детального анализа в их присутствии

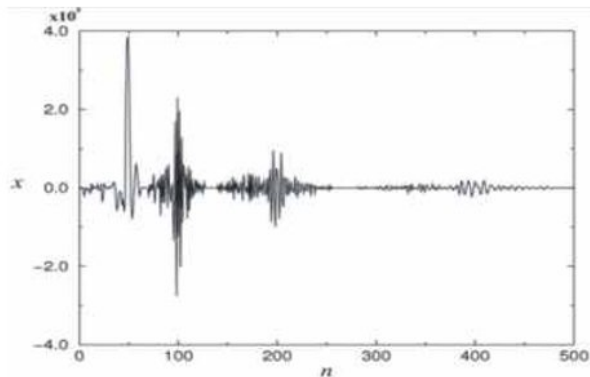


▲ Рис. 2А. А Вид временной реализации трассы № 19 полевого материала, Б Коэффициенты дискретного преобразования, соответствующие разложению сигнала (см. вверху, нарис. 2 а) в базисе вейвлетов Добеши D^8

представляется достаточно сложной задачей, и для адекватной расшифровки информации, содержащейся в сейсмических данных, необходимо вначале осуществить фильтрацию волн-помех. Такая фильтрация должна, с одной стороны, быть узкополосной (так как частотные диапазоны полезного сигнала и помехи являются пересекающимися). С другой стороны, фильтрацию нужно проводить только в пределах ограниченного по времени фрагмента экспериментальных данных.

Применение фильтров на основе Фурье-анализа неэффективно для устранения локализованных особенностей исследуемого процесса. Однако, применение вейвлетной фильтрации оказывается более удобным. При этом можно воспользоваться методом пороговой сортировки (амплитудным критерием) для идентификации коэффициентов вейвлет-преобразования, которые соответствуют помеховым волнам.

На рис. 2 б изображены значения коэффициентов дискретного преобразования, соответствующие разложению сигнала (трассы сейсмограммы общего пункта возбуждения, представленной на рис. 2 а) в базисе вейвлетов Добеши $D8$ [8]. По оси абсцисс отложен номер коэффициента (вначале для коэффициентов

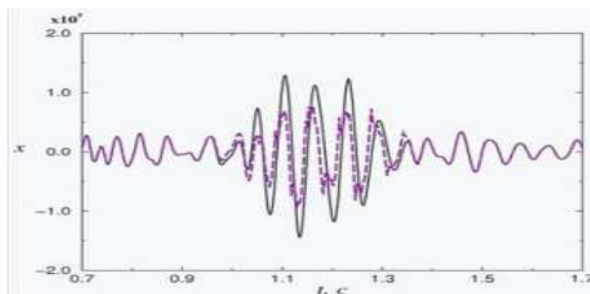


▲ Рис. 2Б. Коэффициенты дискретного преобразования, соответствующие разложению сигнала (см. вверху, нарис. 2 а) в базисе вейвлетов Добеши D^8 .

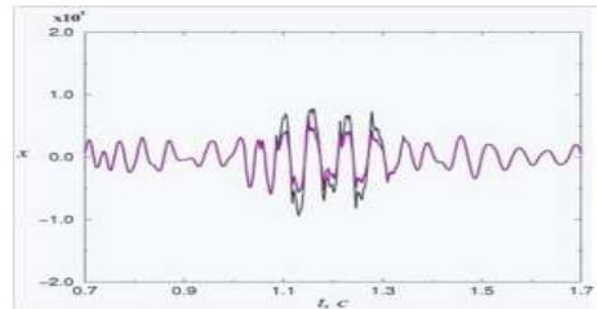
аппроксимации НЧ-фильтра, затем — для детализирующих коэффициентов ВЧ-фильтра). Анализ данных коэффициентов позволяет установить, что ритмическая активность, связанная с наличием помеховых волн, характеризуется преимущественно большими значениям вейвлет-коэффициентов (превышающими уровень $2 \cdot 10^{-5}$), которые расположены вблизи $n=50$.

Выбирая порог для амплитудного детектирования, исследователь получает возможность влиять на качество фильтрации помех. В частности, если приравнять нулю значения коэффициентов в диапазоне $n=[35, 65]$, то это приведет к снижению уровня помехи в сигнале (рис. 3 а).

Отметим, что на рис. 3 а обеспечивает



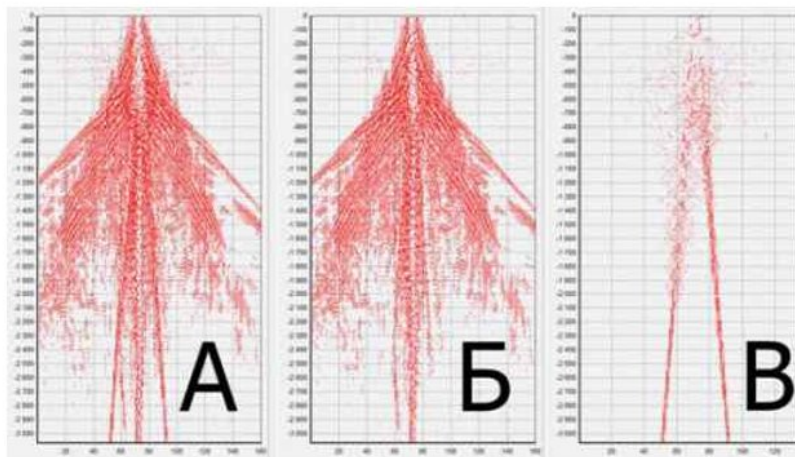
▲ Рис. 3А. Фильтрация помеховых волн путём амплитудного детектирования вейвлет-коэффициентов. Сплошная линия соответствует исходному сигналу, пунктиром показан результат проведённой фильтрации.



▲ Рис. 3А. Улучшение качества фильтрации (улучшение отношения сигнал/шум) путём уменьшения амплитуд вейвлет-коэффициентов, находящихся вне диапазона $n=[35, 65]$, и соответствующих участку присутствия помехи: чёрная линия демонстрирует результат простой фильтрации помеховых волн путём амплитудного детектирования вейвлет-коэффициентов, а сиреневая соответствует описанному методу улучшенной фильтрации.

ся локализованная фильтрация помеховых волн, при которой фрагменты сигнала, не содержащие помех, остаются неискаженными. Это обстоятельство принципиальным образом отличает фильтры на основе вейвлетов и классического преобразования Фурье (позволяющего осуществлять полосовую фильтрацию путём проведения прямого и обратного преобразований с обнулением коэффициентов, характеризующих искажения сигнала). При реализации вейвлет-преобразования частотная фильтрация сигнала сочетается с временной избирательностью фильтра.

Для осуществления более качественной фильтрации помеховых волн наряду с методом пороговой сортировки с эмпирически подобранным амплитудным критерием дополнительно был проведен анализ коэффициентов, находящихся за пределами диапазона $n=[35, 65]$. С этой целью была реализована процедура пирамидального разложения сигнала в базисе вейвлетов Добеши только для участка, содержащего помехи, что позволило идентифицировать



▲ Рис. 4. Сейсмограммы общего пункта возбуждения первичного полевого материала. А – полевой материал до проведения фильтрации, Б – полевой материал после проведения фильтрации, В – отфильтрованная помеха. По оси абсцисс отложен номер трассы N , по оси ординат – время t .

коэффициенты, характеризующие помеховые волны, в общей последовательности коэффициентов разложения сигнала (см. рис. 2 б). Уменьшение амплитуды соответствующих коэффициентов обеспечивает улучшение отношения сигнал/шум.

Данная ситуация проиллюстрирована на рис. 3 б, где показано, что путём корректировки коэффициентов, соответствующих помеховым волнам, происходит уменьшение амплитуды данных волн и повышается эффективность вейвлетной фильтрации.

На рис. 4 представлены результаты фильтрации целой сейсмограммы общего пункта возбуждения предлагаемой улучшенной методикой на базе многомасштабного дискретного вейвлета. Несомненным достоинством процедуры фильтрации на основе дискретного вейвлет-преобразования является быстрое действие алгоритма и простота реализации процедуры обратного восстановления сигнала по его коэффициентам разложения.

Итак, в работе подробно рассмотрены возможности использования вейвлет-фильтров при обработке сигналов сейсморазведки. Для осуществления быстрого алгоритма предварительной очистки экспериментально регистрируемых процессов от случайных искажений (включая помеховые волны поверхностного и звукового типов, например,

регистрируемые волны Рэлея и Лява [2]), применяется подход, основанный на дискретном вейвлет-преобразовании [6]. Этот подход имеет ряд преимуществ по сравнению с непрерывным преобразованием. Во-первых, применение ортогональных базисных функций позволяет ограничиться меньшим числом коэффициентов разложения. Во-вторых, применение пирамидального алгоритма разложения, использующего идеологию субполосной фильтрации, обеспечивает возможность проведения расчетов в режиме реального (или почти реального) времени. Именно это обстоятельство привело к широкому применению дискретного вейвлет-преобразования в различных областях техники.

На основе дискретного вейвлет-преобразования в работе был проведен анализ экспериментальных данных, в качестве которых были выбраны трассы сейсмограмм общего пункта возбуждения из первичного полевого материала. Анализируемые данные помимо полезного сигнала содержали локализованные помехи (поверхностные и звуковые волны), имеющие большую амплитуду. Так как данные помехи превосходили по мощности сейсмический сигнал, проведение его детального анализа в их присутствии представлялось достаточно сложной задачей, и для адекватной расшифровки информации, содержащейся в сейсмических данных, необходимо было

вначале осуществить фильтрацию волн-помех. Такая фильтрация должна, с одной стороны, быть узкополосной (так как частотные диапазоны полезного сигнала и помехи являются близкими). С другой стороны, фильтрацию нужно проводить только в пределах ограниченного по времени фрагмента экспериментальных данных. Применение фильтров на основе Фурье-анализа неэффективно для устранения локализованных особенностей исследуемого процесса. В данной ситуации целесообразнее применять вейвлет-фильтрацию. При этом можно воспользоваться простым амплитудным критерием для идентификации коэффициентов вейвлет-преобразования, которые соответствуют помеховым волнам. В работе продемонстрирована эффективность решения данной задачи с использованием вейвлетов Добеши. Применение фильтров на основе дискретного вейвлет-преобразования позволяет многократно повысить скорость вычисления по сравнению с непрерывным вейвлет-преобразованием, что является актуальным для анализа волновых полей сейсмограммы, содержащих большое количество трасс.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Государственного задания высшим учебным заведениям на 2015 год и плановый период 2016 года в части проведения научно-исследовательских работ (СГТУ-141), а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 14-05-31171 мол_а.

Литература

1. Пискун П.В. Программно-алгоритмическое обеспечение непрерывного вейвлетного преобразования при обработке и интерпретации геофизических полей. М.: МГУ, 2006.
2. Yilmaz O. Seismic Data Analysis. V. I, II. USA: Tulsa, Society of Exploration Geo-physicists, 2001.
3. Короновский А.А., Храмов А.Е. Непре-

рывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: Физматлит, 2003.

4. Руннова А.Е. и др. Вейвлеты в геофизике: обработка сигналов в сейсморазведке. М.: Университетская книга, 2013.
5. Naveau P., Oh H. // IEEE Transactions On Image Processing. — 2004. — Vol. 13, no. 6. P. 35.
6. Meyer Y. Wavelets: Algorithms and applications. Philadelphia: S.I.A.M., 1993.
7. Филатова А.Е. и др. Успехи и перспективы применения вейвлетных преобразований для анализа нестационарных нелинейных данных в современной геофизике // Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика 2010. Т. 18 (3) С. 3.
8. Abbate A., DeCusatis C., Das P. K. Wavelets and subbands. Fundamentals and applications. Boston: Birkhäuser, 2002.
9. Vetterli M., Kovacevic J. Wavelets and subband coding. NY: Prentice Hall, 1995.
10. Daubechies I. Ten lectures on wavelets. SIAM, Philadelphia, 1992

Подробнее об авторах



Руннова А.Е.
К.ф.-м.н., СГТУ им.
Гагарина Ю.А.,
старший научный сотрудник
Научно-Образовательного
Центра «Нелинейная
динамика сложных
систем»



Павлов А.Н.

Д.ф.-м.н., профессор,
СГУ имени
Н.Г. Чернышевского,
профессор,
старший
научный сотрудник



Храмов А.Е.
д.ф.-м.н., профессор,
СГТУ им. Гагарина Ю.А.,
заведующий кафедрой
«Автоматизация,
управление,
мехатроника»