

УДК 553.9; 51-74; 550.8.05

ФИЛЬТРАЦИЯ ЗВУКОВЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН-ПОМЕХ НА ДАННЫХ СЕЙСМИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ МЕТОДАМИ МНОГОМАСШТАБНОГО ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТНОГО АНАЛИЗА

© А.Е. Руннова, А.Н. Павлов, А.Е. Артемьев,
М.В. Храмова, А.Е. Храмов

Ключевые слова: дискретный вейвлетный анализ; сейсморазведка; звуковые и поверхностные волны.

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.

Для камеральных работ сейсмической разведки являются актуальными задачи повышения качества данных, и, в частности, проблемы фильтрации и повышения уровня «сигнал/шум» сейсмоданных до сих пор не являются полностью решенными [1–2]. В частности, одной из таких задач является проблема фильтрации регистрируемого конуса звуковых и поверхностных волн на сейсмограммах современной сейсмической 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 [3–5]. Сегодня в геофизической отрасли естественных наук различные модификации вейвлетного анализа уже используются, в частности, разработаны и внедрены некоторые атрибуты на базе вейвлетных преобразований [6–8]. Однако 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 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 [9]. Сигнал на выходе фильтра нижних частот с частотной характеристикой $g(n)$ представляет собой свертку

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

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

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

где M – длина области задания вейвлета.

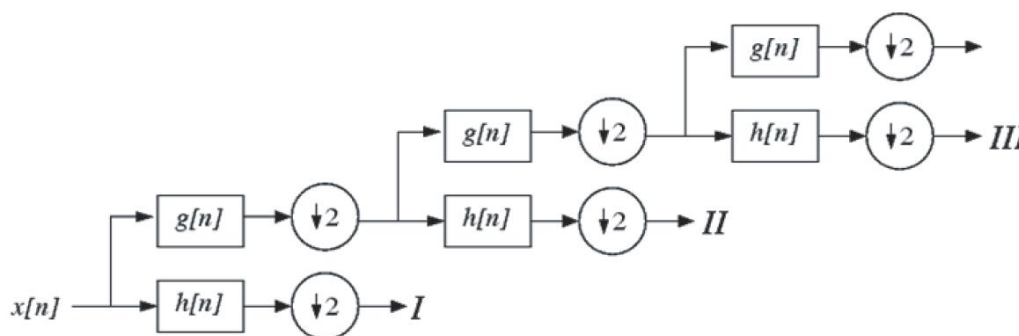


Рис. 1. Схема дискретного вейвлет-преобразования с помощью банка НЧ и ВЧ фильтров

Далее два временных ряда, полученных на выходе фильтров, прореживают, оставляя только четные или нечетные отсчеты. В результате на выходе фильтров будут получены две последовательности отсчетов:

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

$$y_{оч}[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]h[2n-k]. \quad (4)$$

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 отсчетов дискретизованного сигнала $x(n)$ должно составлять $2m$. Схематично многоступенчатая процедура фильтрации изображена на рис. 1, 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 .

На рис. 2 показано изменение частотного диапазона на разных уровнях разрешения. Представленная пирамидальная процедура разложения сигнала позволяет решать задачи фильтрации путем отбрасывания (или корректировки) коэффициентов разложения на разных

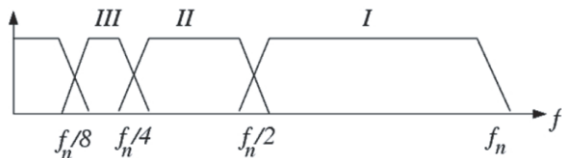


Рис. 2. Иллюстрация изменений частотного диапазона на разных уровнях разрешения при использовании пирамидального алгоритма разложения

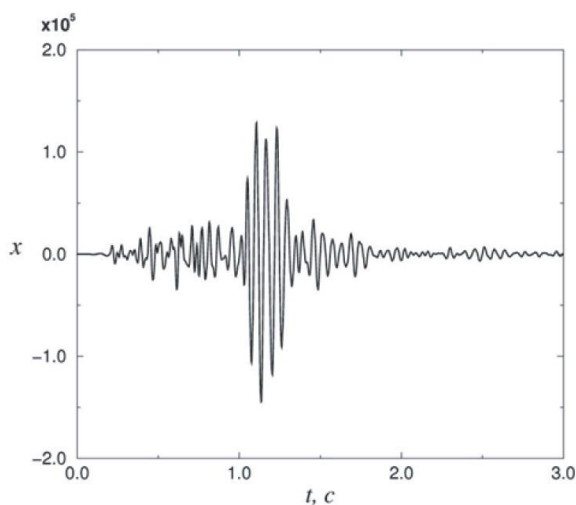


Рис. 3. Вид временной реализации трассы № 19 полевого материала

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.

Обратимся теперь к анализу экспериментальных данных. Начнем рассмотрение с трассы сейсмограммы общего пункта возбуждения, изображенной на рис. 3. 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 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 (т. к. 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 вейвлет-фильтрации оказывается более удобным. При этом можно воспользоваться методом пороговой сортировки (амплитудным критерием) для идентификации коэффициентов вейвлет-преобразования, которые соответствуют помеховым волнам. На рис. 4 изображены значения коэффициентов дискретного преобразования, соответствующие разложению сигнала (трассы сейсмограммы общего пункта возбуждения, представленной на рис. 3) в базисе вейвлетов Добеши D8 [10]. По оси абсцисс отложен номер коэффициента (вначале для коэффициентов аппроксимации НЧ-фильтра, затем – для детализирующих коэффициентов ВЧ-фильтра). Анализ данных коэффициентов позволяет установить, что ритмическая активность, связанная с наличием помеховых волн, характеризуется преимущественно

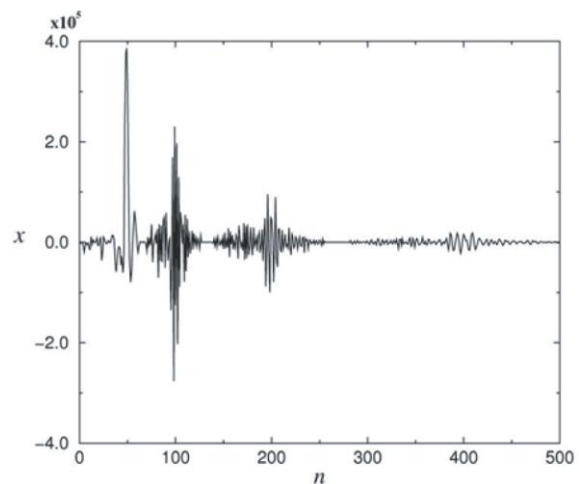


Рис. 4. Коэффициенты дискретного преобразования, соответствующие разложению сигнала (см. рис. 3) в базисе вейвлетов Добеши D8

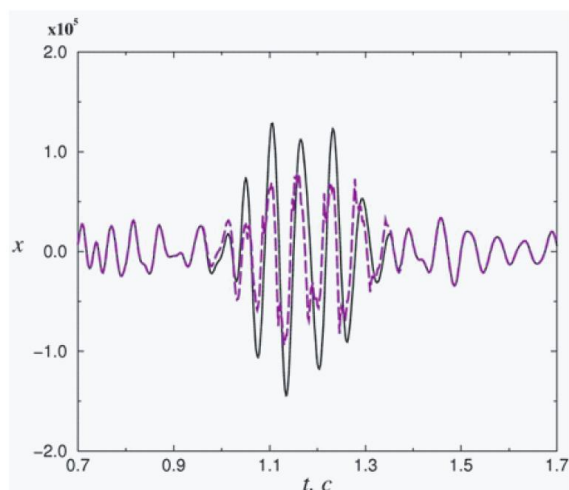


Рис. 5. Фильтрация помеховых волн путем амплитудного детектирования вейвлет-коэффициентов. Сплошная линия соответствует исходному сигналу, пунктиром показан результат проведенной фильтрации

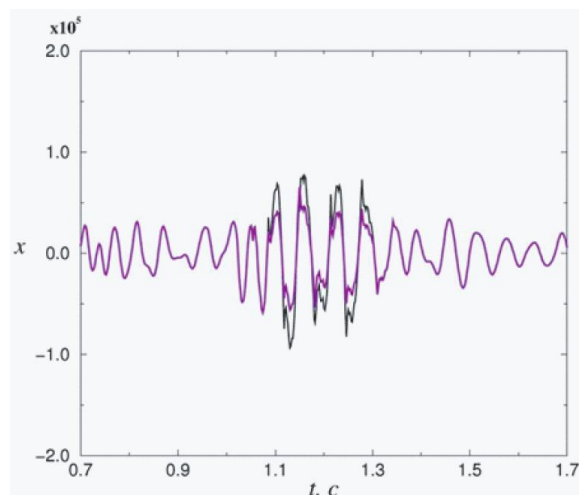


Рис. 6. Улучшение качества фильтрации (улучшение отношения сигнал/шум) путем уменьшения амплитуд вейвлет-коэффициентов, находящихся вне диапазона $n = [35, 65]$ и соответствующих участку присутствия помехи: черная линия демонстрирует результат простой фильтрации помеховых волн путем амплитудного детектирования вейвлет-коэффициентов, а сиреневая соответствует описанному методу улучшенной фильтрации

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. 5).

Отметим, что на рис. 5 обеспечивается локализованная фильтрация помеховых волн, при которой фрагменты сигнала, не содержащие помех, остаются неискаженными. Это обстоятельство принципиальным образом отличает фильтры на основе вейвлетов и клас-

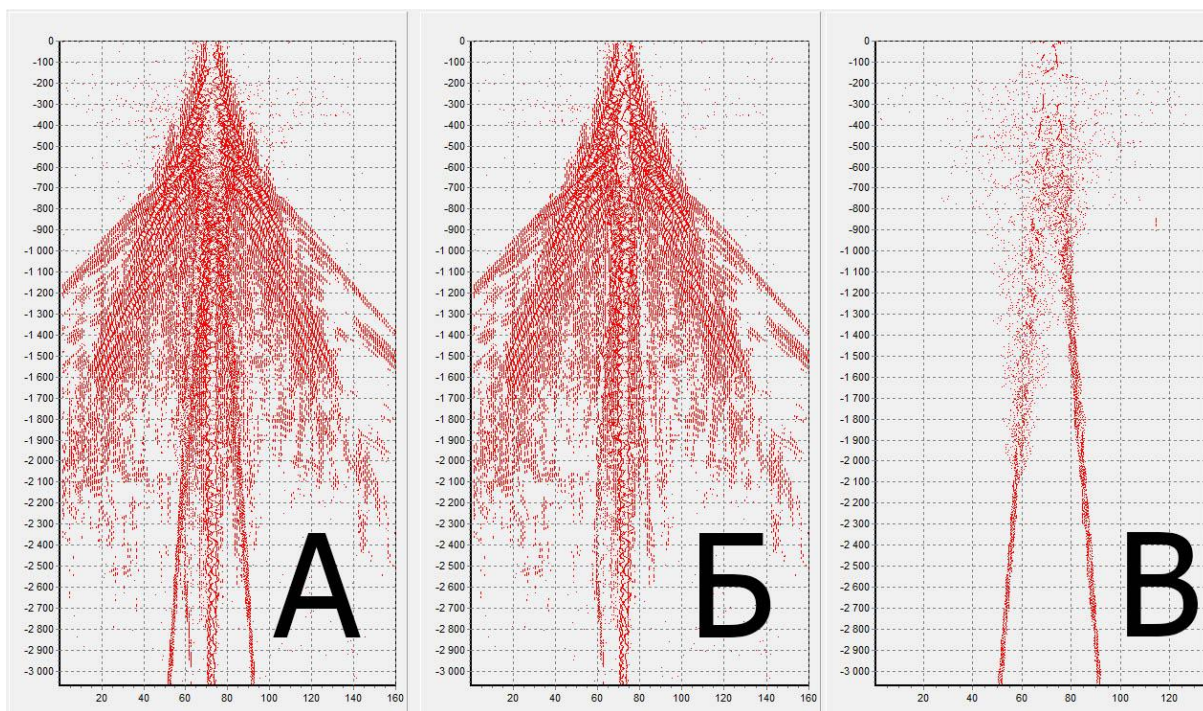


Рис. 7. Сейсмограммы общего пункта возбуждения первичного полевого материала. А – полевого материала до проведения фильтрации; Б – полевого материала после проведения фильтрации; В – отфильтрованная помеха. По оси абсцисс отложен номер трассы N , по оси ординат – время t

сического преобразования Фурье (позволяющего осуществлять полосовую фильтрацию путем 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 коэффициенты, характеризующие помеховые волны, в общей последовательности коэффициентов разложения сигнала (см. рис. 4). Уменьшение амплитуды соответствующих коэффициентов обеспечивает улучшение отношения сигнал/шум. Данная ситуация проиллюстрирована на рис. 6, где показано, что путем корректировки коэффициентов, соответствующих помеховым волнам, происходит уменьшение амплитуды данных волн и повышается эффективность вейвлетной фильтрации.

На рис. 7 представлены результаты фильтрации целой сейсмограммы общего пункта возбуждения предлагаемой улучшенной методикой на базе многомасштабного дискретного вейвлета.

Достоинствами процедуры фильтрации на основе дискретного вейвлет-преобразования являются быстрое действие алгоритма и простота реализации процедуры обратного восстановления сигнала по его коэффициентам разложения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарев В.И., Крылатков С.М. Основы обработки и интерпретации данных сейсморазведки. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2001.
 2. Yilmaz O. Seismic Data Analysis. 2 vols. USA: Tulsa, Society of Exploration Geophysicists, 2001.
 3. Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло А.С. Вейвлеты и их применение // УФН. 2001. Т. 171. № 5. С. 465-501.
 4. Meyer Y. Wavelets: Algorithms and applications. Philadelphia: S.I.A.M., 1993.
 5. Mallat S.G. A wavelet tour of signal processing. N. Y.: Academic Press, 1998.
 6. Филатова А.Е., Артемьев А.Е., Короновский А.А., Павлов А.Н., Храмов А.Е. 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.
 7. Филатова А.Е., Павлов А.Н., Храмов А.Е., Иванов А.В., Грубов В.В., Яшков И.А., Егоров Е.Н., Храмова М.В. Частотно-временной анализ нестационарных геофизических процессов на основе вейвлетов и эмпирических мод // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2012. Т. 17. Вып. 5. С. 1428-1432.
 8. Павлов А.Н., Филатова А.Е., Храмов А.Е., Иванов А.В., Шурыгина С.А., Куркин С.А., Москаленко О.И., Павлова О.Н. Анализ и диагностика многокомпонентных сигналов сейсмограмм с использованием преобразования Гильберта-Хуанга // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2012. Т. 17. Вып. 4. С. 1121-1124.
 9. Abbate A., DeCusatis C., Das P.K. Wavelets and subbands. Fundamentals and applications. Boston: Birkhäuser, 2002.
 10. Филатова А.Е., Павлов А.Н., Короновский А.А., Храмов А.Е. Диагностика и фильтрация различных волновых компонент цифровых данных наземной сейсморазведки на основе вейвлетного анализа // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2011. Т. 16. Вып. 2. С. 541-548.
- БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Государственного задания высшим учебным заведениям на 2014 г. и плановый период 2015 и 2016 гг. в части проведения научно-исследовательских работ (СГТУ-141 и СГТУ-146), а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 14-05-31171.
- Поступила в редакцию 19 апреля 2014 г.
- Runnova A.E., Pavlov A.N., Artemiev A.E., Khramova M.V., Hramov A.E. MULTIREOLUTION OF DISCRETE WAVELET METHODS OF FILTRATION OF INTERFERENCE (SOUND AND SURFACE WAVES) FOR SEISMIC SURVEY NOTES
- The paper presents the results of the development and application of discrete and multiresolution wavelet analysis for filtration of interference wave component on seismic survey notes. We report the methods of discrete wavelet construction for filtering of local singularity in signals. The results of experimental data processing are shown.
- Key words: discrete wavelet transform; seismic prospecting; sound and surface waves.
- Руннова Анастасия Евгеньевна, Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: anefila@gmail.com
- Runnova Anastasia Evgenyevna, Saratov State Technical University named after Y.A. Gagarin, Saratov, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Scientific Worker, e-mail: anefila@gmail.com
- Павлов Алексей Николаевич, Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: pavlov.lesha@gmail.com
- Pavlov Aleksey Nikolayevich, Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky, Saratov, Russian Federation, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, e-mail: pavlov.lesha@gmail.com
- Артемьев Александр Евгеньевич, ОАО «Саратовнефтегеофизика», г. Саратов, Российская Федерация, кандидат геолого-минералогических наук, директор по производству, главный инженер, e-mail: aeartemiev@gmail.com
- Artemiev Aleksander Evgenyevich, JSC "Saratovneftegeofizika", Saratov, Russian Federation, Candidate of Geology and Mineralogy, Director for Production, Main Engineer, e-mail: aeartemiev@gmail.com
- Храмова Марина Викторовна, Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Российская Федерация, кандидат педагогических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий в обучении, e-mail: hramovae@gmail.com

Khramova Marina Viktorovna, Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky, Saratov, Russian Federation, Candidate of Education, Associate Professor of Information Systems and Technologies in Study Department, e-mail: hramovae@gmail.com

Храмов Александр Евгеньевич, Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры электроники, колебаний и волн; Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., ведущий научный сотрудник НОЦ «Нелинейная динамика сложных систем», e-mail: hramovae@gmail.com

Hramov Aleksander Evgenyevich, Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky, Saratov, Russian Federation, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor of Electronics, Fluctuations and Waves Department; Saratov State Technical University named after Y.A. Gagarin, Leading Scientific Worker of "Nonlinear Dynamics of Complex Systems", e-mail: hramovae@gmail.com