



МЕТОД ЭМПИРИЧЕСКИХ МОД И ВЕЙВЛЕТ-ФИЛЬТРАЦИЯ: ПРИМЕНЕНИЕ В ЗАДАЧАХ ГЕОФИЗИКИ

А.Н. Павлов, А.Е. Филатова

Представлены теоретические основы метода эмпирических мод, являющегося одним из новых способов частотно-временного анализа процессов с меняющимися во времени характеристиками. Показано, что применение этого подхода совместно с вейвлетной фильтрацией позволяет детально изучить структуру многочастотных регистрируемых сигналов, наблюдаемых при выполнении сейсморазведки.

Ключевые слова: Мгновенная частота, метод эмпирических мод, вейвлет-анализ, сейсморазведка.

Введение

Проблема анализа структуры нестационарных процессов при наличии помех является актуальной как при проведении теоретических научных исследований в разных областях естествознания, так и при изучении экспериментальных данных в различных практических приложениях науки и техники. Несмотря на то, что за последние десятилетия был достигнут значительный прогресс в развитии методов изучения динамики систем с меняющимися во времени характеристиками [1–6], задача развития нового и совершенствования уже существующего инструментария для адекватной расшифровки информации, содержащейся в сигналах таких систем, остается одной из важнейших для экспериментальных исследований. В значительной степени это связано с ограничениями применяемых в настоящее время специальных методов анализа нестационарной динамики. Так, в частности, метод анализа флуктуаций относительно тренда [1] неприменим для исследования ритмической активности (или требует наличия большого объема выборки при переходе от исходных данных к точечным процессам). Оконный спектральный анализ не обеспечивает качественной частотно-временной локализации при изучении нестационарных многочастотных режимов колебаний [5, 6]. Преобразование Вигнера–Вилля приводит к появлению интерференций, значительно снижающих практическую ценность полученных результатов, а их устранение путем сглаживания с подходящим ядром

ухудшает частотно-временное разрешение [7, 8]. Метод аналитического сигнала, использующий преобразование Гильберта, применим для узкополосных процессов и формально может использоваться в исследованиях нестационарных режимов колебаний, но при локальных смещениях среднего уровня данный подход может приводить к нефизичным результатам, таким как появление отрицательных значений мгновенной частоты.

Отдельно следует выделить вейвлет-анализ, обладающий наиболее широкими возможностями для изучения процессов с меняющимися во времени характеристиками и уже давно воспринимаемый как метод математического микроскопа, способный рассмотреть особенности структуры сложных сигналов в широком диапазоне масштабов наблюдения. Однако и этот подход также не лишен недостатков, среди которых можно упомянуть проблему выбора базиса, появление интерференций, которые могут быть ошибочно приняты за частотную модуляцию [9], необходимость подбора параметров «материнского» вейвлета для обеспечения компромисса между частотным и временным разрешением [10, 11] и т.д. В связи с этим несомненный интерес вызывает развитие комбинированных алгоритмов, использующих вейвлеты в качестве одного из этапов анализа экспериментальных данных. Такие подходы широко применяются, например, в задачах распознавания образов (вейвлетные нейронные сети) [12, 13].

Сравнительно недавно был предложен альтернативный метод анализа нестационарных процессов, использующий принцип разложения на эмпирические моды (*empirical mode decomposition*) [14], который хорошо зарекомендовал себя при решении широкого круга задач [15–17]. Согласно результатам ряда исследований, метод эмпирических мод превосходит вейвлет-анализ с точки зрения частотно-временного разрешения [18, 19]. Этот подход к тому же не требует выбора базиса, что является одним из его существенных достоинств [20, 21]. Следует отметить, что обоснование преимуществ метода эмпирических мод с точки зрения разрешения в настоящее время ограничивается отдельными иллюстративными примерами, так как для этого подхода в меньшей степени разработан математический аппарат (в отличие от вейвлет-анализа, теория которого развита значительно лучше). Разложение на эмпирические моды представляется весьма интересным для практических приложений, и не случайно этот метод приобретает в настоящее время все большую популярность.

Яркий пример активного и успешного внедрения в практическое использование новейших методик и алгоритмов анализа и фильтрации сложных сигналов демонстрируют камеральные геофизические работы. На сегодняшний день наиболее активно развивающимися областями геофизики являются отрасли, связанные с поиском и разведкой залежей различных природных ископаемых, в наибольшей степени нефтяных и газовых месторождений. Лидирующее место по объему ежегодных полевых поисковых и разведочных работ с последующими камеральными исследованиями полученных данных занимает сейсмическая разведка методом отраженных волн. Обеспечивая весьма большую глубинность исследований земной коры при достижении высокой детальности информации, сейсморазведка играла и играет важную, а подчас и превалирующую роль в задачах прогнозирования нефтегазоносности глубоко залегающих отложений. Применяемые для изучения зарегистрированной сейсмической информации методики обработки определяют финальную успешность всех проводимых этапов сейсмической разведки и, в конечном итоге, соответствующие экономические показатели. Большая стоимость проводимых полевых исследований требует высокого качества обработки экспериментальных материалов в целях получения максимально возможной информации о литологическом строении земной

кору района работ. Таким образом, обработка нестационарных временных данных полевых работ играет роль своеобразной «площадки» для испытания современных алгоритмов и методов анализа, фильтрации и выделения различных компонент сложных нестационарных сигналов.

В рамках данной статьи рассмотрены основные принципы предложенного в [14] метода эмпирических мод на примере анализа сигналов геофизических сейсморазведочных работ. Показано, что совместное использование метода эмпирических мод и вейвлетной фильтрации позволяет эффективнее анализировать структуру данных сейсморазведки.

1. Метод эмпирических мод

Прежде чем приступить к описанию метода эмпирических мод, приведем некоторые соображения общего характера, объясняющие целесообразность рассмотрения этого нового подхода в задачах анализа структуры сигналов. С этой целью начнем с самого простого примера – гармонических колебаний

$$x(t) = \sin t, \quad (1)$$

для которых легко вычислить преобразование Гильберта $x^H(t) = \cos t$, постоянные (в данном случае равные 1) значения мгновенной амплитуды A и мгновенной частоты ω , а также линейный рост фазы φ . Гармонические колебания можно изобразить в виде окружности на плоскости (x, x^H) .

Ситуация меняется, если происходит смещение среднего уровня на произвольную величину a

$$x(t) = a + \sin t. \quad (2)$$

Если $|a| < 1$ (рис. 1), то это будет приводить к тому, что скорость изменения фазы перестанет быть постоянной для разных значений φ , следовательно, мгновенная частота ω будет варьироваться, демонстрируя осциллирующий характер зависимости во времени. Если же $|a| > 1$, то наблюдается более сложная ситуация – фаза колебаний не выходит за границы диапазона $[-\pi/2, \pi/2]$; участки роста фазы сменяются участками ее уменьшения, что будет сопровождаться появлением отрицательных значений мгновенной частоты $\omega(t) = d\varphi(t)/dt$. Таким образом, мы приходим к нефизичной ситуации. Очевидно, что можно разложить сигнал (2) на две компоненты – постоянную составляющую и гармоническую функцию, для которой корректно оценивается мгновенная частота. Приведенный очень простой пример поясняет целесообразность разложения сигнала на составляющие и выделения так называемых «внутренних мод» (*intrinsic mode functions* [14]), для которых мгновенная частота может быть корректно вычислена в любой момент времени. Сам тер-

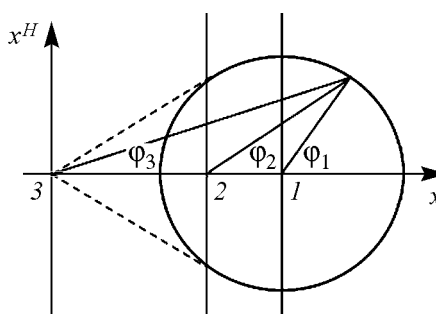


Рис. 1. Представление гармонических колебаний на фазовой плоскости (x, x^H) при различных смещениях среднего уровня: $a = 0$ (уровень 1), $|a| < 1$ (уровень 2), $|a| > 1$ (уровень 3). В последнем случае изменения во времени фазового угла φ_3 ограничены диапазоном, показанном пунктирами

мин «внутренние моды», предложенный в статье [14], связан с тем, что анализируются ритмические составляющие, которые, образно выражаясь, «вложены» в исходный сигнал.

При анализе экспериментальных данных одним из этапов предварительной обработки часто является сведение сигнала к нулевому среднему уровню, что позволяет избавиться от проблем, связанных с некорректным определением мгновенной частоты. Однако это не всегда выполняется для нестационарных процессов, среднее значение которых может меняться и принимать отличные от нуля величины *на локальных участках*. С целью корректного определения мгновенной частоты для компонент c_j , на которые раскладывается сигнал $x(t)$, в рамках метода эмпирических мод предлагается обеспечить выполнение следующих условий:

- 1) должно быть равно нулю локальное среднее значение огибающих, определяемых локальными максимумами функции c_j и локальными минимумами этой функции;
- 2) число пересечений нулевого уровня графиком этой функции и число локальных максимумов (или минимумов) должно совпадать или отличаться не более чем на 1.

Выполнение сформулированных условий при переходе в фазовое пространство обеспечивает вращение фазовой траектории вокруг начала координат и отсутствие фрагментов сигнала, для которых расчеты мгновенной частоты могут привести к нефизичным значениям. Первое условие является новой идеей, высказанной в работе [14]; оно обеспечивает отсутствие нежелательных флуктуаций мгновенных характеристик, вызванных несимметричной формой сигнала.

Чтобы идеология разложения сигнала на эмпирические моды была более понятной, рассмотрим принцип их определения на примере экспериментальных данных. Выберем фрагмент данных сейсмической разведки, описанных в нашей предыдущей работе [22]. На рис. 2 изображен участок одной из трасс сейсмограммы общего пункта возбуждения из первичного полевого материала, полученного на территории Саратовской области (сплошная черная линия). Штриховыми линиями показаны огибающие данного сигнала, построенные путем сплайновой интерполяции локальных максимумов и локальных минимумов. Сплошной серой линией показано среднее значение огибающих $m_1(t)$, которое варьируется относительно нулевого уровня. Для обеспечения равенства нулю этого значения, в рамках метода [14,19] предложено перейти от сигнала $x(t)$ к функции $h_1(t)$

$$x(t) - m_1(t) = h_1(t). \quad (3)$$

Если для полученной функции $h_1(t)$ указанные выше условия выполняются, то ее можно считать «внутренней модой». Однако из-за несимметричности исходного сигнала локальные средние значения $m_{11}(t)$ двух огибающих функции $h_1(t)$ могут по-прежнему отличаться от нуля. Для выполнения первого условия требуется итерационная процедура

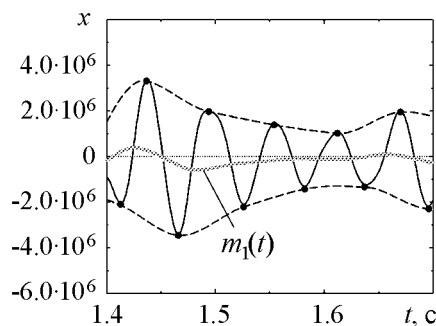


Рис. 2. Иллюстрация принципа вычисления локального среднего уровня на примере данных сейсмо-разведки. Усреднение двух огибающих сигнала (показанных штриховыми линиями) приводит к меняющемуся во времени среднему уровню $m_1(t)$

$$\begin{aligned}
h_1(t) - m_{11}(t) &= h_{11}(t), \\
&\dots \\
h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t) &= h_{1k}(t),
\end{aligned} \tag{4}$$

после завершения которой будет получена первая эмпирическая мода

$$c_1(t) = h_{1k}(t), \tag{5}$$

отражающая ритмическую динамику, соответствующую минимальному из характерных временных масштабов. После вычитания c_1 из исходного сигнала

$$x(t) - c_1(t) = r_1(t) \tag{6}$$

мы переходим к временной зависимости $r_1(t)$, которая будет отражать информацию о более медленных ритмических составляющих. Продолжая применение итерационной процедуры, можно получить последовательность c_j :

$$r_1(t) - c_2(t) = r_2(t), \dots, r_{n-1}(t) - c_n(t) = r_n(t). \tag{7}$$

Данный процесс завершается, когда $c_n(t)$ или $r_n(t)$ становятся монотонными функциями, в которых уже нельзя идентифицировать осциллирующие составляющие [14]. Таким образом, исходный сигнал $x(t)$ представляется в виде суммы эмпирических мод c_j и функции, описывающей тренд, r_n :

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t). \tag{8}$$

Фактически, авторы работы [14] предложили альтернативный вариант разложения сигнала на составляющие, имеющие разные временные масштабы, для каждой из которых можно оценить мгновенную амплитуду, частоту и фазу, воспользовавшись методом аналитического сигнала. При анализе набора функций c_j мы имеем дело с гильбертовским спектром, а сама идеология частотно-временного представления многочастотного процесса с использованием эмпирических мод и гильбертовского спектра часто называется преобразованием Гильберта–Хуанга, расширяющим возможности применения метода аналитического сигнала на процессы, не являющиеся узкополосными [19].

Достаточно простая идея разложения процесса на эмпирические моды оказалась весьма эффективной на практике, хорошо зарекомендовав себя во многих прикладных задачах. Об этом свидетельствует большое число ссылок в сети Интернет на работы, в которых применение метода эмпирических мод позволило эффективно изучать частотно-временную динамику колебательных систем с меняющимися во времени характеристиками. Ряд ключевых публикаций по данной теме указан в монографии [19]. В соответствии с приведенными в этой монографии результатами, метод эмпирических мод превосходит вейвлет-анализ с точки зрения частотно-временного разрешения. Он не требует априорной информации (не нужно выбирать базисные функции, осуществлять настройку «анализатора», как в случае вейвлет-преобразования). В [18] высказано предположение, что метод эмпирических мод эффективнее для изучения нестационарных модулированных колебаний.

Как уже отмечалось во введении, к числу недостатков данного подхода относится отсутствие завершенной теории, которая еще находится в стадии разработки. Но если не акцентировать внимание на этом обстоятельстве, нельзя не признать, что появившийся новый инструмент исследования структуры сигналов обладает существенным потенциалом. Об этом свидетельствует ряд сравнительных исследований метода эмпирических мод и вейвлет-анализа, в которых было показано, что первый из них позволяет решать задачи, выходящие за границы применимости второго (см., например, [19]).

2. Результаты

2.1. Тестовые примеры. В рамках данной работы нами использовалась программа расчета эмпирических мод, подготовленная научной группой П. Фландрина (<http://perso.ens-lyon.fr/patrick.flandrin/emd.html>). То обстоятельство, что данный подход не уступает вейвлет-анализу с точки зрения частотно-временного разрешения, можно проиллюстрировать на простом примере нестационарной динамики – переключении частоты колебаний (рис. 3). Для усложнения примера дополнительно производится смещение среднего уровня. Как видно из рисунка, лишь

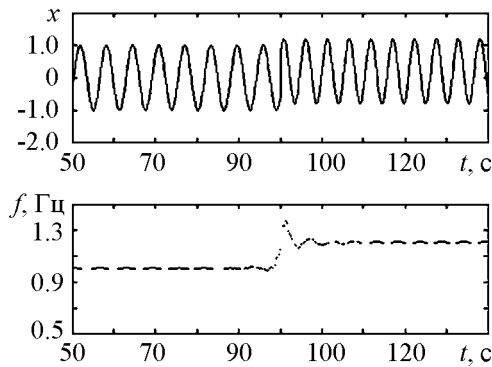


Рис. 3. Пример сигнала с переключением частоты (а) и результаты расчета мгновенной частоты колебаний (б)

в окрестности момента переключения в пределах одного периода колебаний погрешность оценки мгновенной частоты оказывается сравнительно большой. Это сопоставимо с оценками, которые можно сделать на основе вейвлет-преобразования. Несколько иллюстраций более качественной (по сравнению с вейвлетами) идентификации мгновенных характеристик нестационарных режимов колебаний приводятся в [18, 19].

Обратимся к другому тестовому примеру и проанализируем динамику известной модели Ресслера:

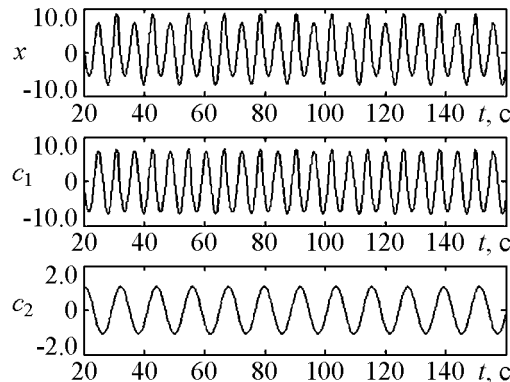


Рис. 4. Периодические колебания (цикл периода 2) в динамике модели Ресслера и первые 2 эмпирические моды

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -y - z, \\ \frac{dy}{dt} &= x + ay, \\ \frac{dz}{dt} &= b + z(x - c). \end{aligned} \quad (9)$$

При значении параметров $a = 0.15$, $b = 0.2$, $c = 5.0$ решением системы (9) являются периодические колебания (цикл удвоенного периода). На рис. 4 представлена временная реализация $x(t)$ и две эмпирические моды,

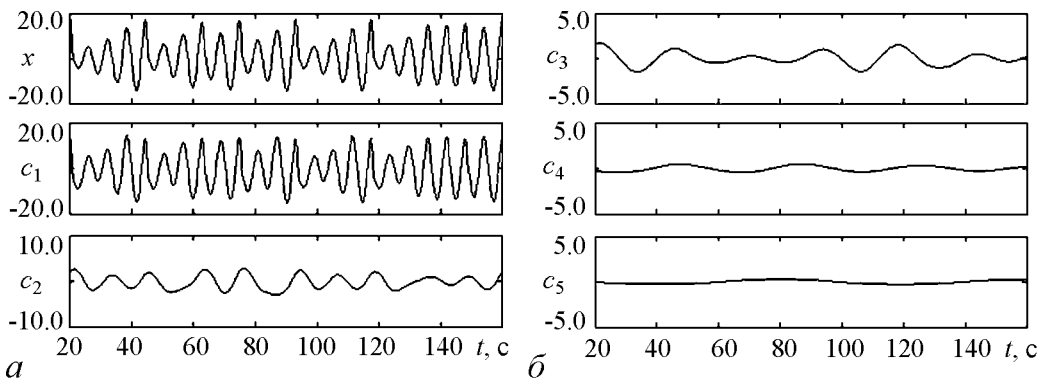


Рис. 5. Хаотические колебания в динамике модели Ресслера и первые 5 эмпирических мод

идентифицируемые в данном сигнале и соответствующие колебаниям с частотами, различающимися в 2 раза. В отличие от разложения на гармонические составляющие в рамках фурье-анализа, эмпирические моды могут иметь произвольную форму в зависимости от формы исходного сигнала $x(t)$. Это наглядно можно видеть на примере хаотического режима колебаний в модели (9). На рис. 5 изображена временная зависимость $x(t)$, полученная при значениях управляющих параметров $a = 0.15$, $b = 0.2$, $c = 10.0$, и первые 5 эмпирических мод. Заметим, что последние из них вносят незначительный вклад в суммарный сигнал (8). Даже визуально хорошо заметно, что полученные зависимости c_j соответствуют колебаниям с разными временными масштабами. Для каждой зависимости можно ввести в рассмотрение мгновенную амплитуду, мгновенную частоту и фазу.

2.2. Анализ данных сейсморазведки. Обратимся теперь к анализу экспериментальных данных, в качестве которых мы выберем трассу сейсмограммы общего пункта возбуждения, фрагмент которой был представлен на рис. 2. Помимо полезного сигнала трасса сейсмограммы содержит помехи (поверхностные и звуковые волны), имеющие большую амплитуду и локализованные в диапазоне от 1.0 до 1.3 секунд. 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 помеховых волн. 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 для устранения локализованных особенностей исследуемого процесса неэффективно. В данной ситуации целесообразнее применять вейвлетную фильтрацию; такой подход был рассмотрен в рамках нашей предыдущей статьи [22]. В данной работе используется более быстрый вариант процедуры фильтрации на основе дискретного вейвлет-преобразования (вейвлеты Добеши D^8) [3] и амплитудного детектирования вейвлет-коэффициентов (приравнивания нулю значений коэффициентов, превышающих заданный пороговый уровень). Несмотря на то, что такая фильтрация приводит к менее гладкой времен-

ной зависимости отфильтрованного процесса по сравнению с непрерывным преобразованием, это обстоятельство не является принципиальным для рассматриваемой задачи (слабая изрезанность формы сигнала может оказывать влияние на высокочастотную область спектра – диапазон, который не представляет практического интереса в сейсморазведке). В то же время возможность многократно (в десятки или сотни раз) повысить скорость вычислений важна для анализа волновых полей сейсмограммы, содержащих большое количество трасс.

На рис. 6, *а* проиллюстрирована исходная трасса из первичного полевого материала, полученного на территории Саратовской области. Анализ этой трассы позволяет выделить 7 эмпирических мод и получить временные зависимости мгновенных амплитуд и частот каждой из них на основе преобразования Гильберта. Представление полученных результатов на плоскости аналогично рассмотрению «хребтов» вейвлет-преобразования. Для получения более полной информации соответствующие зависимости лучше представлять в виде оттенков цвета, кодирующих информацию о мгновенных амплитудах. Результаты анализа эмпирических мод, выделенных в исходном сигнале, представлены на рис. 6, *б*. Темным цветом в диапазоне 1.0...1.3 с отчетливо выделяются мгновенные частоты, соответствующие наиболее мощным колебательным процессам (преимущественно, помехам). Отметим, что их идентификация по одной из трасс практически невозможна, и для определения участков времени, в которых наблюдаются поверхностные и звуковые волны, необходимо рассматривать полную сейсмограмму, содержащую сведения о распространении данных волн от одного пункта приема к другому [22]. Поскольку помехи значительно превосходят по амплитуде полезный сигнал, они будут оказывать существенное влияние на вычисляемые эмпирические моды. Для уменьшения этого влияния и представляется целесообразным анализировать экспериментальные данные после проведения вейвлетной фильтрации. Рис. 7 иллюстрирует результаты анализа частотно-временной динамики отфильтрованного процесса методом эмпирических мод. Теперь уже можно значительно более четко изучать структуру полезного сигнала сейсмограммы, идентифицируя и анализируя динамику ритмических процессов, регистрируемых в конкретном пункте приема.

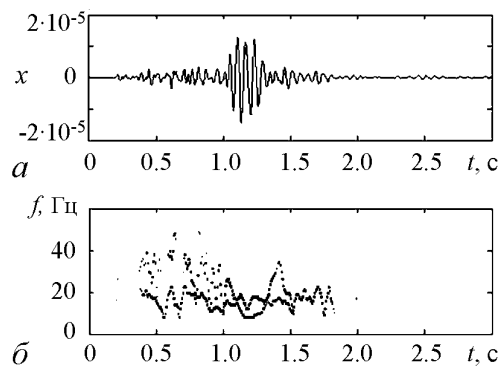


Рис. 6. Трасса сейсмограммы (*а*) и результаты ее частотно-временного анализа на основе метода эмпирических мод (*б*)

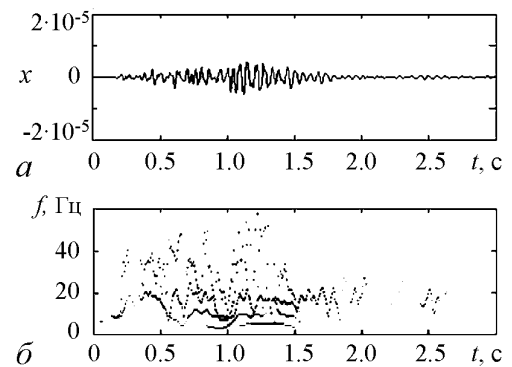


Рис. 7. Трасса сейсмограммы после вейвлет-фильтрации помех (*а*) и результаты ее частотно-временного анализа на основе метода эмпирических мод (*б*)

Заключение

В данной работе представлена идеология метода эмпирических мод, который является одним из новых подходов в задачах анализа частотно-временной динамики нестационарных процессов. Показано, что совместное использование данного подхода и вейвлетной фильтрации позволяет исследовать структуру многочастотных нестационарных режимов колебаний, наблюдаемых в данных сейсморазведки. Преимущество такого способа анализа состоит в том, что он позволяет изучать нестационарные колебательные процессы с близкими значениями частоты, обеспечивая лучшее частотное разрешение между сосуществующими ритмами колебаний. Если бы в качестве инструмента исследования структуры экспериментальных данных использовалось непрерывное вейвлет-преобразование, разрешения метода было бы недостаточно для разделения близких по частоте ритмических процессов, что приводило бы к появлению паразитной интерференции [5,6]. В то же время, проведение предварительной фильтрации экспериментальных данных с применением вейвлетных фильтров позволяет избавляться от больших по амплитуде помех, оказывающих влияние на результаты метода эмпирических мод. Сочетание двух рассматриваемых подходов в этом контексте является более эффективным для детального анализа структуры данных сейсморазведки.

Метод эмпирических мод является новым подходом, который только начинает приобретать популярность в экспериментальных исследованиях. И эта популярность вполне оправданна – даже первые попытки его тестирования (см., например, [18,19]) позволили установить, что с помощью метода эмпирических мод можно идентифицировать модуляцию с близкими значениями частот модулирующего и модулируемого процессов (для вейвлет-анализа эти частоты должны отличаться в несколько раз), уменьшать ширину спектральных линий и т.п. Мы рассматриваем метод эмпирических мод как весьма перспективный инструмент исследования частотно-временных характеристик процессов с большим числом временных масштабов. Развитие и широкое применение таких инструментов в экспериментальных исследованиях способно существенно обогатить возможности цифровой обработки сигналов.

Проводимые исследования были поддержаны Министерством образования и науки РФ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (госконтракт П633).

Библиографический список

1. Peng C.-K., Havlin S., Stanley H., Goldberger A. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series // Chaos. 1995. Vol. 5. P. 82.
2. Muzy J.F., Bacry E., Arneodo A. The multifractal formalism revisited with wavelets // Int. J. Bifurcation and Chaos. 1994. Vol. 4, № 2. P. 245.
3. Daubechies I. Ten lectures on wavelets. Philadelphia: S.I.A.M., 1992.
4. Meyer Y. Wavelets: Algorithms and applications. Philadelphia: S.I.A.M., 1993.
5. Mallat S.G. A wavelet tour of signal processing. New York: Academic Press, 1998.

6. Addison P.S. The illustrated wavelet transform handbook: applications in science, engineering, medicine and finance. Bristol; Philadelphia: IOP Publishing, 2002.
7. Flandrin P. Some aspects of non-stationary signal processing with emphasis on time-frequency and time-scale methods // Wavelets / Eds J.M. Combes, A. Grossmann, Ph. Tchamitchian. Springer, Berlin. 1989. P. 68.
8. Flandrin P. Time-frequency and time-scale analysis. San Diego: Academic Press, 1999.
9. Анисимов А.А., Павлова О.Н., Тупицын А.Н., Павлов А.Н. Вейвлет-анализ чирпов // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2008. Т. 16, № 5. С. 3.
10. Kaiser G. A friendly guide to wavelets. Boston: Birkhäuser, 1994.
11. Короновский А.А., Храмов А.Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: Физматлит, 2003.
12. Zhang Q., Benveniste A. Wavelet networks // IEEE Trans. Neural Networks. 1992. Vol. 3. P. 889.
13. Zhang J., Walter G.G., Miao Y., Lee W.N. Wavelet neural networks for function learning // IEEE Trans. Signal Proc. 1995. Vol. 43. P. 1485.
14. Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shih H.H., Zheng Q., Yen N.-C., Tung C.C. and Liu H.H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proc. R. Soc. London Ser. A. 1998. Vol. 454. С. 903.
15. Coughlin K.T., Tung K.K. 11-year solar cycle in the stratosphere extracted by the empirical mode decomposition method // Adv. Space Res. 2004. Vol. 34. P. 39.
16. Neto E.P.S., Custaud M.A., Cejka C.J., Abry P., Frutoso J., Gharib C., Flandrin P. Assessment of cardiovascular autonomic control by the empirical mode decomposition // Method. Inform. Med. 2004. Vol. 43. P. 60.
17. Wu Z., Huang N.E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method // Proc. R. Soc. London, Ser. A. 2004. Vol. 460. P. 1597.
18. Huang N.E., Shen Z., Long S.R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum // Annu. Rev. Fluid Mech. 1999. Vol. 31. С. 417.
19. Hilbert–Huang transform and its applications / Eds N.E. Huang, S.S.P. Shen. Singapore: World Scientific, 2005.
20. Flandrin P., Goncalvés P. Empirical mode decompositions as data-driven wavelet-like expansion // Int. J. Wavelets Multiresolut. Inform. Process. 2004. Vol. 2. P. 477.
21. Flandrin P., Rilling G., Goncalvés P. Empirical mode decompositions as a filter bank // IEEE Signal Process. Lett. 2004. Vol. 11. P. 112.
22. 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 // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2010. Т. 18, № 3. С. 3.

METHOD OF EMPIRICAL MODES AND WAVELET-FILTERING: APPLICATION IN GEOPHYSICAL PROBLEMS

A.N. Pavlov, A.E. Filatova

Theoretical bases of empirical mode decomposition being one of the new methods of time-frequency analysis of processes with time-varying characteristics are discussed. It is shown that application of this approach together with wavelet-filtering allows one to study in details the structure of multicomponent registered signals recorded in prospecting seismology.

Keywords: Instantaneous frequency, empirical mode decomposition, wavelet-analysis, seismic prospecting.



Павлов Алексей Николаевич – родился в Саратове (1973). Окончил физический факультет Саратовского университета по специальности радиофизика и электроника (1995). Кандидат физико-математических наук (1998). В настоящее время работает доцентом на кафедре радиофизики и нелинейной динамики СГУ. Область научных интересов: анализ временных рядов. Имеет более 80 работ, опубликованных в отечественной и зарубежной печати.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: pavlov_lesha@mail.ru



Филатова Анастасия Евгеньевна – родилась в Саратове (1983). Окончила факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета (2005). Кандидат физико-математических наук (2008). Старший научный сотрудник лаборатории физики нелинейных явлений отделения физики нелинейных систем Саратовского государственного университета. Область научных интересов – нелинейная динамика систем различной природы, методы анализа динамических систем, вейвлетный анализ. Автор ряда статей в рецензируемых отечественных и зарубежных журналах.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: anefila@gmail.com