

УДК 553.9; 51-74

АНАЛИЗ И ДИАГНОСТИКА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИГНАЛОВ СЕЙСМОГРАММ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГИЛЬБЕРТА–ХУАНГА

© А.Н. Павлов, А.Е. Филатова, А.Е. Храмов, А.В. Иванов,
С.А. Шурьгина, С.А. Куркин, О.И. Москаленко, О.Н. Павлова

Ключевые слова: нестационарные процессы; частотно-временной анализ; эмпирические моды; сейсморазведка. Обсуждаются возможности анализа и диагностики многокомпонентных сигналов сейсмограмм с применением метода эмпирических мод. Показано, что только первые 2–3 моды несут основную информацию об анализируемых процессах. Отмечается, что метод эмпирических мод обладает значительным потенциалом для решения задач выделения независимых ритмических составляющих из экспериментальных данных и представляет собой новый инструмент анализа структуры сейсмических сигналов, способный обеспечить повышение качества изучения литографического строения земной коры на разной глубине.

Нестационарность многих процессов, регистрируемых в натуральных экспериментах в геофизике, биологии, медицине и т. д., является главной причиной развития специальных методов анализа структуры сигналов, применимых для исследования сложных процессов и систем с меняющимися во времени характеристиками. Классические методы цифровой обработки сигналов в этой ситуации способны приводить к ошибочной интерпретации результатов обработки экспериментальных данных. Одним из наиболее перспективных новых инструментов исследования нестационарной динамики в настоящее время является метод эмпирических мод, называемый также преобразованием Гильберта–Хуанга [1–3]. В ряде публикаций [1–2, 4] отмечалось, что этот подход превосходит другие методы частотно-временного анализа нестационарных данных, в частности подходы на основе вейвлет-преобразования [5–8]. Главное преимущество метода эмпирических мод заключается в том, что он не требует выбора базиса и настройки параметров преобразования, поэтому его проще использовать на практике при проведении вычислений, т. к. не нужно проводить предварительные исследования, направленные на выбор оптимальной системы функций разложения сигнала.

Существуют основания считать, что метод эмпирических мод эффективнее для изучения нестационарных модулированных колебаний [1]. К числу недостатков данного подхода относится отсутствие завершённой теории, которая еще находится в стадии активной разработки. Но если не акцентировать внимание на данном обстоятельстве, следует признать, что этот сравнительно 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 способен решать задачи, выходящие за границы применимости второго (см., например, [2]).

Данный метод расширяет возможности классической концепции аналитического сигнала [9] на процес-

сы с меняющимися во времени характеристиками. Известно, что при обработке нестационарных процессов могут возникать нефизические результаты, если среднее значение исследуемого сигнала различно от нуля [1]. Из-за ненулевого среднего уровня возможно появление участков с отрицательным значением мгновенной частоты колебаний, формально оцениваемой путем вычисления производной от фазы. Безусловно, такой результат следует признать нефизическим – причиной является наличие постоянной составляющей сигнала, приводящей к неравномерности роста фазового угла, а именно, к появлению участков с отрицательной производной фазы колебаний. Данный пример служит простой иллюстрацией проблем, возникающих при проведении расчетов мгновенной частоты колебаний.

Для устранения нефизических результатов расчета мгновенной частоты необходимо обеспечить движение фазовой траектории вокруг начала координат в фазовом пространстве (x, x^H) , где $x(t)$ – исходный сигнал, $x^H(t)$ – преобразование Гильберта функции $x(t)$. Смещение этой траектории приводят к возможному появлению участков флуктуаций мгновенной частоты (вследствие несимметричности формы сигнала) или даже участков с отрицательной мгновенной частотой (при значительных смещениях локального среднего уровня). Именно такой подход и предусматривается в рамках метода [1, 2]. Ключевой аспект преобразования Гильберта–Хуанга состоит в том, что на первом этапе оно предусматривает «выравнивание» локального среднего уровня путем усреднения и последующего вычитания двух огибающих сигнала – верхней, проходящей через локальные максимумы, и нижней, проведенной по локальным минимумам. Процедура выделения и устранения локального среднего уровня реализуется в виде итерационного алгоритма (т. к. за один шаг в подавляющем большинстве случаев не удается свести сигнал к симметричному виду), позволяющего разложить сигнал на составляющие («внутренние» или эмпирические моды), характеризующиеся более выраженной симметрией по сравнению с исходным процессом и разными

временными масштабами. Детали этой процедуры детально описаны в работах [1, 2], поэтому мы решили не останавливаться на них подробно. Для каждой из эмпирических мод процедура расчета мгновенных частот колебаний, проводимая в рамках классического преобразования Гильберта, будет всегда приводить к корректным с физической точки зрения результатам. Метод [1–2] позволяет, таким образом, применять классическую концепцию аналитического сигнала к многократным процессам, если вначале провести представление исходного сигнала в виде суммы осциллирующих составляющих – эмпирических мод. Если применительно к классическому преобразованию Гильберта можно сформулировать ряд принципиальных недостатков при анализе нестационарных процессов, то для метода Гильберта–Хуанга эти недостатки не столь очевидны.

Ярким примером активного и успешного внедрения в практическое использование новейших методик и алгоритмов анализа 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 и, 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 метода отраженных волн. Сейсмическая разведка, обеспечивая весьма большую глубинность исследований земной коры при достижении высокой детальности информации, играет и играет важную, а подчас и преобладающую 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, величину ее финансовых показателей и соответствующую экономическую выгоду. Большая стоимость проводимых полевых исследований требует высокого качества обработки экспериментальных материалов в целях получения максимальной возможной информации о литологическом строении земной коры района работ. Таким образом, обработка нестационарных временных полевых данных играет роль своеобразной испытательной площадки современных алгоритмов и методов анализа, фильтрации и выделения различных компонент сложных нестационарных сигналов.

Ценность метода эмпирических мод состоит в том, что он позволяет не только проводить частотно-временной анализ сейсмических сигналов, но и осуществлять декомпозицию экспериментальных данных на независимые компоненты, которые могут отражать отличия в структуре разных слоев земной коры.

На рис. 1 приведен пример разложения на эмпирические моды фрагментов одной из трасс сейсмограммы общего пункта возбуждения из первичного полевого материала, полученного на территории Саратовской области. Данное разложение проведено после предварительной процедуры очистки полезного сигнала от шумов и случайных искажений с помощью процедуры вейвлет-фильтрации [10].

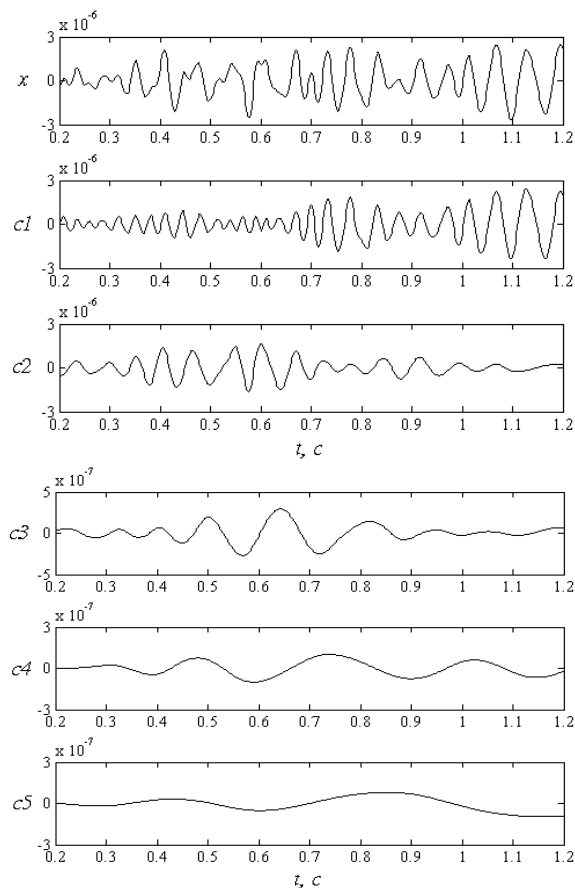


Рис. 1. Пример разложения трассы сейсмограммы $x(t)$ общего пункта возбуждения на эмпирические моды c_1 – c_5

Формальное разложение данного сигнала позволяет выделить до 7 внутренних мод, однако последние из них отражают медленные вариации среднего уровня сигнала или низкочастотный тренд (это видно уже по моде c_5).

Проведем анализ спектральных особенностей каждой из эмпирических мод и сравнение этих данных со спектральными характеристиками исходного анализируемого нестационарного сигнала. На рис. 2 представлены соответствующие спектры мощности, вычисленные по выделенным эмпирическим модам.

Для удобства представления результатов выбраны произвольные единицы изменения по оси ординат. Это связано с тем, что с увеличением номера моды резко уменьшается энергия колебаний, и при представлении результатов в одинаковом масштабе спектральная плотность мощности сигналов $c_4(t)$, $c_5(t)$, $c_6(t)$, $c_7(t)$ становится неразличимой на фоне более высоких значений спектральной плотности мощности сигналов $c_1(t)$, $c_2(t)$, $c_3(t)$.

В соответствии с приведенными спектрами, переход от исходного сигнала к эмпирическим модам означает уменьшение полосы частот (выделенные зависимости $c_1(t)$ – $c_5(t)$ являются более узкополосными процессами по сравнению с $x(t)$), что исключает проблемы некорректного расчета мгновенных частот колебаний в рамках преобразования Гильберта. Более того, переход к высшим модам приводит к уменьшению полосы час-

тот, что позволяет эффективно анализировать фазовые особенности именно высших мод, которые ответственны за слабо выраженные особенности анализируемого процесса. Тем не менее, данные особенности могут нести в себе существенную информацию о строении земной коры и способствовать улучшению качества проведения сейсморазведки.

Переход к каждой последующей моде означает смещение спектра мощности в область более низких частот. Заметим при этом, что каждая мода может иметь сложный спектральный состав, и в этом смысле разложение по эмпирическим модам отличается от разложения по гармоническим составляющим в рамках классического спектрального анализа.

Первые 2–3 моды содержат основную информацию об анализируемом процессе, т. е. о литографическом составе земной коры в точке приема сигнала. В качестве иллюстрации можно провести расчеты коэффициента корреляции, характеризующего степень линейной зависимости между анализируемым сигналом (трассой сейсмограммы) и каждой из выделенных эмпирических мод. В соответствии с результатами, представленными на рис. 3, только первые моды характеризуются большими значениями коэффициента корреляции, а последние моды отражают менее существенные детали исходного процесса. В частности, проведя сложение первых двух эмпирических мод, можно достичь коэффициента корреляции суммарного сигнала и исходной трассы, приблизительно равного 0,99.

Наряду с проведением частотно-временного анализа многокомпонентных сигналов в условиях нестационарности и наличия помех, метод эмпирических мод обладает значительным потенциалом для решения задач

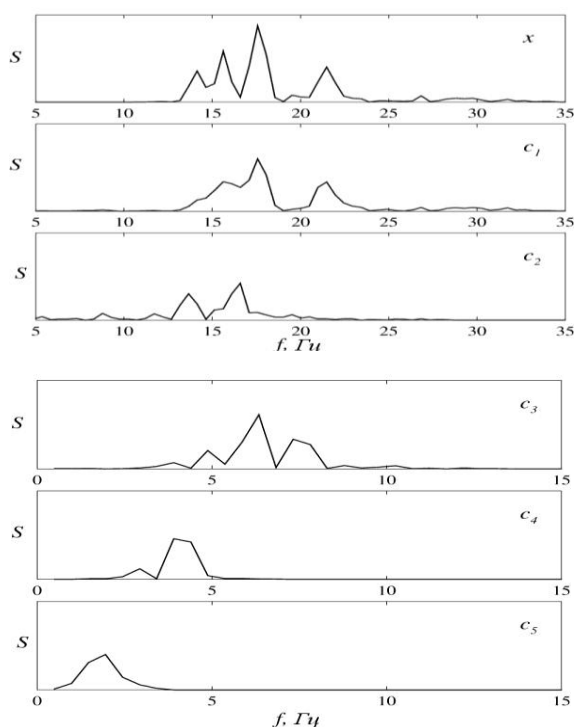


Рис. 2. Спектры мощности трассы сейсмограммы $x(t)$ общего пункта возбуждения и выделенных эмпирических мод

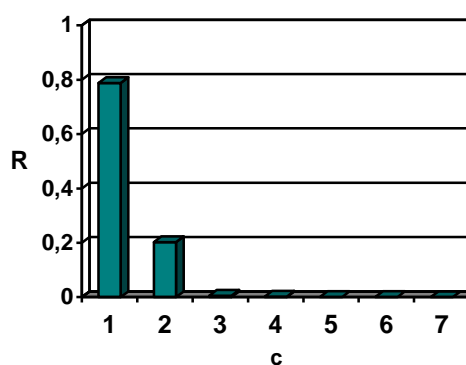


Рис. 3. Зависимость коэффициента корреляции между эмпирическими модами и исходным сигналом от номера эмпирической моды

диагностики независимых ритмических составляющих из экспериментальных данных. Выделение индивидуальных мод позволяет упростить анализ сложных многокомпонентных записей сейсмограмм, проводя переход от исходного сигнала к независимым компонентам этого сигнала. В данной статье мы привели иллюстрацию применения данного подхода для идентификации «внутренних мод» в структуре сигнала сейсмограммы общего пункта возбуждения. Отметим, что современная геофизика является одним из потенциальных приложений разрабатываемых новых методов детального анализа процессов сложной структуры. Более того, исследования в геофизике в значительной степени и стимулируют совершенствование инструментария для цифровой обработки сигналов. Существуют основания полагать, что метод эмпирических мод может стать новым инструментом анализа структуры сейсмических сигналов, который обеспечит повышение качества изучения литографического строения земной коры на разной глубине.

ЛИТЕРАТУРА

- Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shi H.H., Zheng Q., Yen N.-C., Tung C.C., 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. V. 454. P. 903-995.
- Hilbert-Huang transform and its applications / eds. N.E. Huang, S.P. Shen. Singapore: World Scientific, 2005.
- Flandrin P., Goncalves P. Empirical Mode Decompositions as data-driven wavelet-like expansions // Int. J. Wavelets Multiresolut. Inform. Process. 2004. V. 2. P. 477-496.
- Huang N.E., Shen Z., Long S.R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum // Annu. Rev. Fluid Mech. 1999. V. 31. P. 417.
- Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145-1170.
- Addison P.S. The illustrated wavelet transform handbook: applications in science, engineering, medicine and finance. Philadelphia: IOP Publishing, 2002.
- Mallat S.G. A wavelet tour of signal processing. N. Y.: Academic Press, 1998.
- Короновский А.А., Храмов А.Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: Физматлит, 2003.
- Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989.
- Павлов А.Н., Филатова А.Е., Храмов А.Е. Цифровая фильтрация и частотно-временной анализ нестационарных сигналов на основе вейвлетов и эмпирических мод // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56. № 9. С. 1099-1106.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы».

Поступила в редакцию 11 июля 2012 г.

Pavlov A.N., Filatova A.E., Khrarov A.E., Ivanov A.V., Shurygina S.A., Kurkin S.A., Moskalenko O.I., Pavlova O.N. ANALYSIS AND DIAGNOSTICS OF MULTI-COMPONENT OF SEISMIC SIGNALS USING HILBERT–HUANG TRANSFORM

In the work the possibilities of analysis and diagnostics of multi-component seismic signals using empirical mode decomposition are discussed. It is shown that only the first 2–3 modes contain main information about the processes being analyzed. It is noted that the empirical mode decomposition possesses considerable potential to solve the problems of extraction of independent rhythmic components from experimental data. It represents a new tool to analyze the structure of seismic signals, capable to improve the quality of studying of a lithographic structure of earth's crust on different depth.

Key words: non-stationary processes; time-frequency analysis; empirical modes; ground-based seismology.