

Н. В. Мясникова, М. П. Берестень, В. А. Дудкин

ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ*

Изложены теоретические основы экспресс-анализа и его приложения к задачам обработки случайных процессов в системах охранной сигнализации. Рассмотрена возможность использования способа экспресс-оценивания спектральных характеристик на основе экстремальной фильтрации для анализа сейсмических сигналов.

Системы сейсмического наблюдения являются типичными системами, для которых необходимо использовать экспресс-анализ, т.к. в них в реальном времени необходимо проводить сложную обработку по обнаружению и классификации источника сейсмозмущения. На основе таких систем строятся, например, периметровые системы для охраны важных промышленных объектов, системы контроля локальных рубежей.

В задачах обнаружения и распознавания необходимо сформировать диагностические признаки, обладающие следующими свойствами:

- признаки должны иметь физическую интерпретацию, описывать определенные свойства сигнала;
- признаки должны быть устойчивыми (не должны сильно изменяться при незначительном изменении свойств сигнала);
- признаки должны быть легко вычисляемыми, допускающими оценивание в темпе эксперимента.

Первым двум требованиям, безусловно, отвечают спектральные характеристики сигнала – амплитудный спектр или, гораздо чаще применяемый, спектр мощности. В спектре, как правило, выделяются устойчивые узкополосные резонансы. Количество этих резонансов, их частоты и мощности позволяют сформировать первичные диагностические признаки. Разные распознаваемые объекты будут иметь разные спектры, а следовательно, и разные диагностические признаки. Для одного и того же объекта возможно смещение частот резонансов, изменение их мощности и количества в процессе его перемещения относительно сейсмического приемника.

В этой классической процедуре диагностики кроме высокой трудоемкости спектрального анализа существует еще и трудность выделения истинных резонансов, маскируемых боковыми частотами, обусловленными «утечкой» в спектральной полосе. Избежать этого позволяет применение параметрических способов, четко выделяющих колебательные составляющие. Но их точность очень зависит от достаточно субъективного выбора порядка модели, а трудоемкость еще выше, чем в классических алгоритмах.

Выход из создавшейся ситуации – экспресс-оценивание спектральных характеристик на основе экстремальной фильтрации. Хотя в этом методе выделяются субполосные составляющие (т.е. не разделяются близкие гармоники), он является достаточно эффективным, простым, нетрудоемким способом спектрального оценивания, а параметры выделенных знакопеременных составляющих позволяют сформировать диагностические признаки, отвечающие всем сформулированным требованиям. Количество знакопеременных

* Работа выполняется при поддержке гранта РФФИ а06-08-00698.

составляющих p , их параметры – амплитуды A_i , частоты f_i могут быть положены в основу формирования диагностических признаков.

Рассмотрим предложенный подход к экспресс-анализу сейсмических сигналов в системах охранной сигнализации. Основные принципы экспресс-анализа изложены в работах [1–4].

На рисунке 1,а показан выходной сигнал сейсмоприемника при проезде автомобиля, а на рисунке 1,б – выделенные знакопеременные составляющие, представленные своими экстремумами для одного из анализируемых участков. На рисунке 2 показано обнаружение автомобиля с помощью предложенной системы признаков с использованием факта, что в условиях поля наблюдается высокочастотный сейсмический фон. Анализ проводился скользящим окном длительностью 3 с, а сигнал тревоги (обнаружения) формировался через каждую секунду.

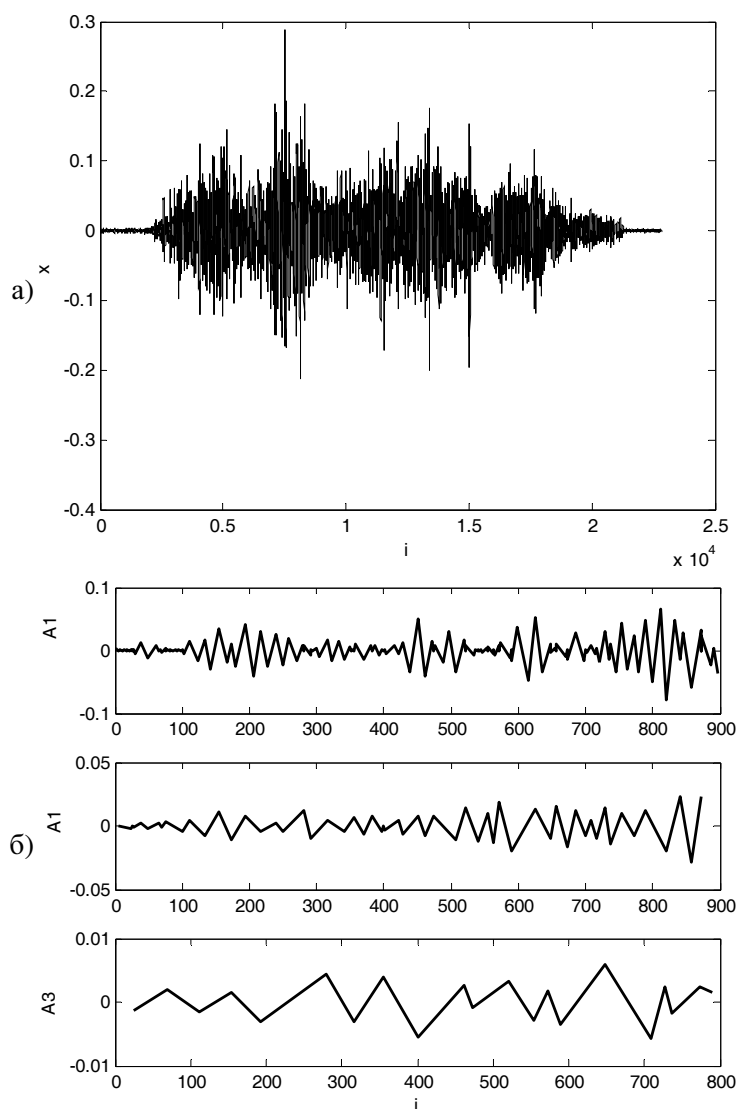


Рис. 1 Сигнал с датчика (а) и знакопеременные составляющие одного из участков анализа (б)

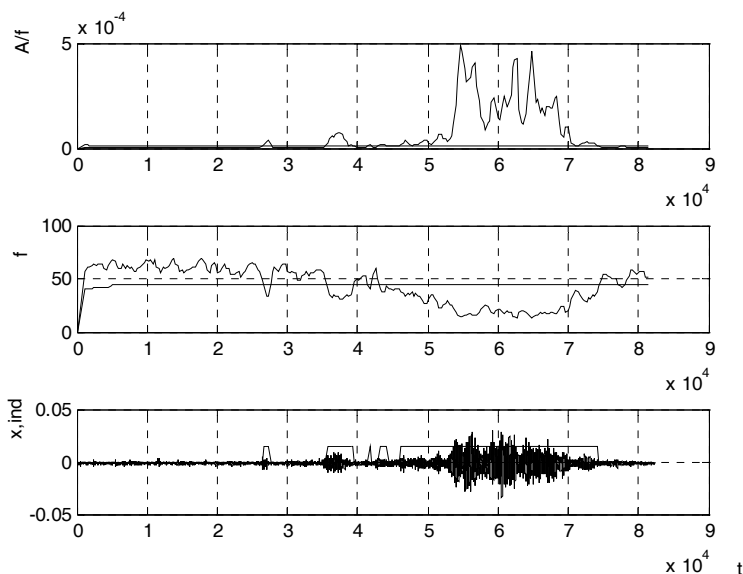


Рис. 2 Диагностические признаки A_i/f_i , f , сейсмосигнал x и сигнал тревоги ind

При приближении объекта к датчику увеличивается отношение сигнал/шум и частотные свойства регистрируемого сигнала будут определяться сейсмозвущением – амплитуда выделяемых составляющих возрастает, а частота, наоборот, уменьшается. Можно установить разделяющую границу частот шум–сигнал.

Вероятно, возможна и обратная ситуация, когда сейсмошуму будет соответствовать низкочастотная область. В этом случае сигналу будут соответствовать более высокочастотные сигналы с большими амплитудами.

Сама по себе амплитуда не очень четкий признак, т.к. она сильно зависит от расстояния до объекта. Поэтому предложено сформировать диагностический признак для разделения сейсмофон–сигнал в виде отношения A_i/f_i . Этот диагностический признак более контрастно разделяет классы.

Итак, параметры A_i , f_i , $i = 1..p$ формируют узкополосные составляющие спектра. Главное преимущество экстремального фильтра – адаптивность к свойствам исследуемого сигнала.

Проиллюстрируем, насколько правильно они характеризуют частотные свойства сигнала. На рисунке 3 показаны амплитуды выделенных скользящим окном знакопеременных составляющих при проезде грузовой машины и спектр нескольких реализаций. Как видно из рисунка 3, получено не только правильное качественное описание спектральных свойств, но и хорошее количественное совпадение.

В настоящее время очень широко применяется вейвлет-анализ. Покажем, что совокупность полученных знакопеременных составляющих может быть интерпретирована как время-частотная характеристика [1, 2]. Эта характеристика представлена на рисунке 4. Из рисунка хорошо видно изменение частотного состава при въезде автомобиля в зону ответственности – частотный диапазон сигнала очень быстро меняется от 0–80 Гц до 0–35 Гц. Анало-

гично при выезде из зоны, наоборот, частотный диапазон сигнала очень быстро меняется от 0–35 Гц до 0–80 Гц.

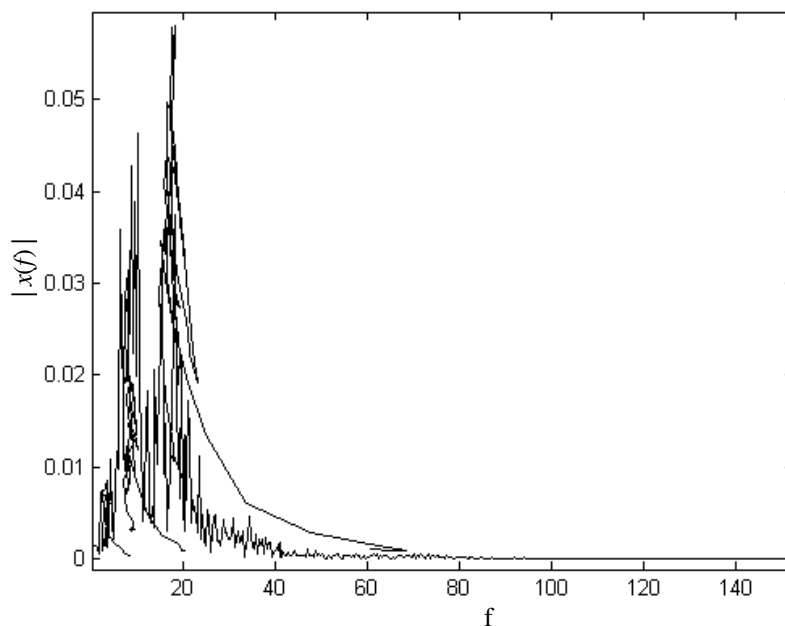


Рис. 3 Спектральные характеристики сигнала: экспресс-оценка по знакопеременным составляющим и спектр сигнала

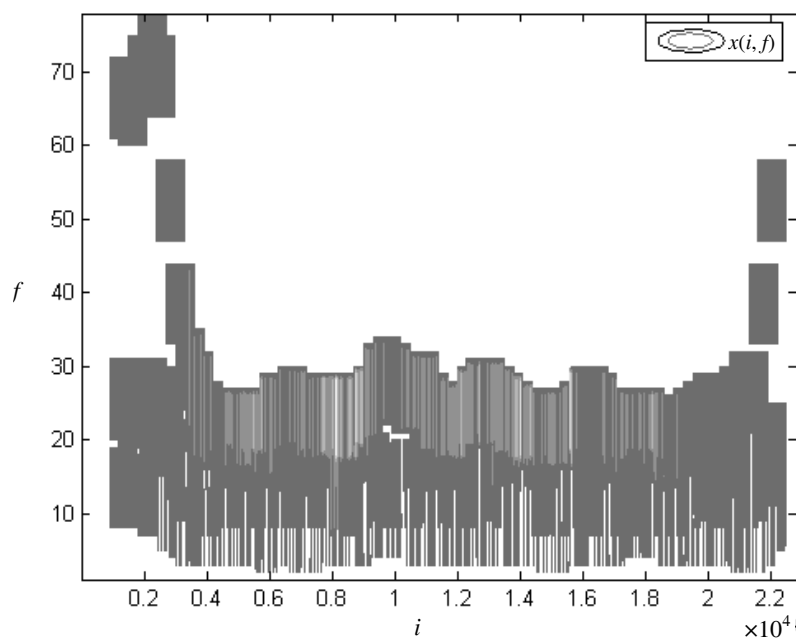


Рис. 4 Экспресс-оценка время-частотной характеристики

Эту же характеристику можно представить в виде вейвлет-скалограммы (рис. 5,а), а на рисунке 5,б для сравнения приведена «настоящая»

вейвлет-скалограмма. Видно сходство этих характеристик. Рисунок 5,а отличается от рисунка 4 только тем, что первая характеристика построена в привычных для спектрального анализа координатах время (в отсчетах) – частота (Гц), а на рисунке 5,а, как это принято в вейвлет-анализе в координатах: время – период (в отсчетах).

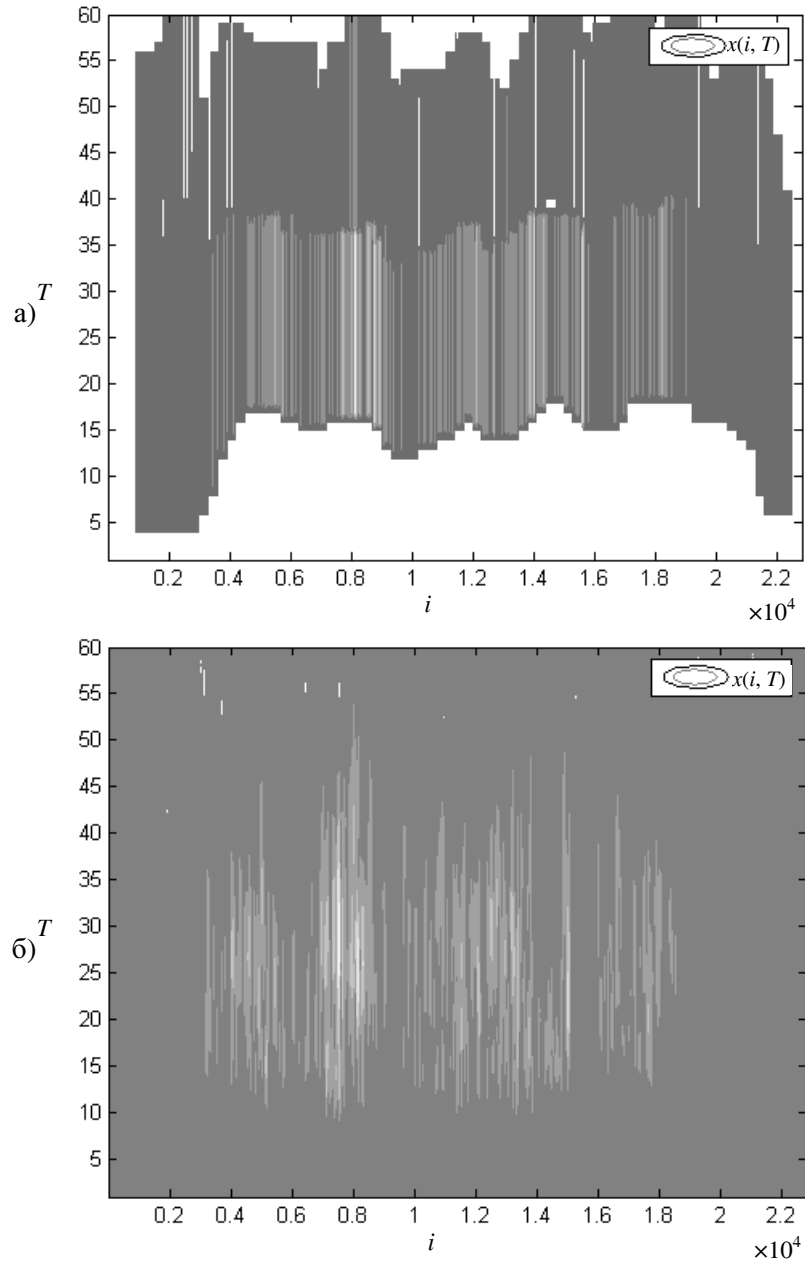


Рис. 5 Вейвлет-характеристика: а – экспресс-оценка; б – преобразование Морлета

Таким образом, используя простое разложение на знакопеременные составляющие в темпе эксперимента можно не только решать задачи спектрального анализа сигналов, но и получать оценку вейвлет-характеристики.

А это говорит о полноте признаков, образованных параметрами A_i , f_i , $i = 1...p$. Выбирая или, наоборот, отбрасывая составляющие определенного диапазона, легко решить и задачу фильтрации [3].

После формирования системы признаков остается решить еще одну задачу – классификации. Ее решение основано на предположении, что параметры A_i , f_i , $i = 1...p$ будут различаться не только для разных объектов, но и для разных расстояний от объекта сейсмозмущения до приемника.

Автоматизация интерпретации полученных характеристик является достаточно сложной задачей. Неоднозначность трактовки приводит к необходимости разработки комплекса адаптивных критериев и решающих правил. Выбор конкретного критерия определяется характером задачи исследования.

Интерпретация зачастую сводится к возможности сравнивать значение характеристик сигнала в разные моменты времени между собой или с эталоном. При этом характеристики (или отдельные их компоненты) выступают в качестве признаков сигнала.

Выбор используемого решающего правила зависит, главным образом, от сформированной системы признаков и имеющейся априорной информации. Простота вычислительной реализации решающего правила для задач экспресс-анализа имеет особое значение по двум причинам: 1) необходимость минимизировать временные затраты; 2) отсутствие обширных обучающих выборок, которые требуются для сложных методов классификации.

Для сравнения двух экспресс-оценок спектра можно адаптировать традиционные решающие правила (например, применяемые при сравнении спектров) или сформировать новые, учитывающие специфику (как положительную, так и отрицательную) используемых признаков.

Рассмотрим зависимость процедуры интерпретации характеристик случайного процесса от размерности вектора признаков.

Если исследуемый процесс в данный момент времени характеризуется одним признаком, то применяются различные модификации допускового контроля, причем считается, что свойства сигнала не изменились, если различие не превысило порога.

В этом случае на основе экспресс-оценки спектра формируется вторичный признак, в достаточной мере характеризующий свойства анализируемого процесса. В качестве вторичного признака можно использовать моменты спектра мощности, характеризующие его форму.

По мере усложнения задачи экспресс-анализа (расширение числа искомым изменений свойств сигнала, увеличение типов исследуемых сигналов и т.п.) возрастает необходимое число признаков сигнала, а это приводит к тому, что закономерность расплывается на множество зачастую малозначущих связей. Если каждый из сравниваемых объектов характеризуется системой из L признаков (U) фиксированного состава, то для количественного описания различия между ними используется понятие расстояния. Наибольшее распространение в задачах классификации получило Евклидово (среднеквадратичное) расстояние:

$$d = \sum_{k=1}^L (u_{1k} - u_{2k})^2.$$

Евклидово расстояние удобно в расчетах и имеет физический смысл: это мера энергии разности двух сигналов.

В этом случае определение расстояния между спектрами мощности можно интерпретировать как сравнение мощностей соответствующих L компонент сигнала. Совпадение сеток частот является обязательным условием возможности применения приведенного способа сопоставления спектров. Однако при этом остаются нерешенными проблемы, связанные с оцениванием смещения по частоте отдельных гармоник.

При разработке способа вычисления расстояния между двумя экспресс-оценками будем также следовать требованиям, которым должны отвечать любые меры типа *расстояние*: а) положительность расстояния; б) расстояние равно нулю только для случая совпадения признаков; в) расстояние от первого объекта до второго равно расстоянию от второго до первого; г) расстояние между двумя объектами не превышает суммы расстояний между ними и некоторым третьим объектом.

При равном числе компонент в базовом и исследуемом сигналах расстояние может быть определено из соотношения, подобного правилу Евклида:

$$d(S_1, S_2) = \sum_{i=1}^K \sqrt{(\bar{f}_{1i} - \bar{f}_{2i})^2 + (\sigma_{1i}^2 - \sigma_{2i}^2)^2}, \quad (1)$$

где f_{li} – значения центральной частоты i -й компоненты; σ_{li}^2 – значения мощности i -й компоненты; K – количество компонент.

Приведенное соотношение позволяет выявлять изменения и центральных частот, и мощностей компонент, но для исключения влияния разных размерностей признаков необходимо их нормирование. В качестве нормирующих множителей целесообразно использовать величины, обратные частотному диапазону, и полной мощности базового сигнала соответственно для центральной частоты и мощности компонент. В дальнейшем будем полагать, что используются нормированные признаки.

Если число компонент в сравниваемых сигналах различно, то непосредственное использование соотношения (1) становится невозможным. В этом случае при классификации можно было бы избежать вычисления расстояния, полагая, что сам факт изменения числа компонент является признаком появления некоторых изменений. Однако при сравнении сигналов найдется не абсолютное совпадение, поэтому появление дополнительной мало-мощной составляющей может оказаться несущественным.

Одним из возможных способов решения этой задачи является введение «штрафа» за изменение числа компонент. Тогда получим следующее соотношение:

$$d = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^{K_1} \sqrt{(\Delta f_i)^2 + (\Delta \sigma_i^2)^2} + \sum_{i=1}^{K_2} \sqrt{(\Delta f_i)^2 + (\Delta \sigma_i^2)^2} \right],$$

где Δf_i , $\Delta \sigma_i^2$ – разности между оценками частот и мощностей i -й компоненты сигнала и ближайшей к ней (по частоте) компоненты второго сигнала. Второе слагаемое введено для того, чтобы выполнялось требование равенства расстояния от первого объекта до второго расстоянию от второго объекта до первого.

Отметим, что изложенные подходы могут быть распространены и на случаи сравнения поверхностей (например, время-частотных распределений, вейвлет-скалограмм и т.п.).

Принятие решения можно возложить на нейронную сеть, используя сформированные признаки, как ее входы. Таким образом, предложенный подход к экспресс-анализу перспективен и для применения в современных интеллектуальных системах.

Список литературы

1. **Мясникова, Н. В.** Аппроксимативный способ вейвлет-анализа / Н. В. Мясникова, М. П. Берестень // Датчики и системы. – 2003. – № 1. – С. 17–20.
2. **Мясникова, Н. В.** Подход к экспресс-wavelet-анализу на основе адаптивной фильтрации / Н. В. Мясникова, М. П. Берестень // Датчики и системы. – 2004. – № 2. – С. 16–21.
3. **Мясникова, Н. В.** Экстремальная фильтрация и ее приложения / Н. В. Мясникова, М. П. Берестень // Датчики и системы. – 2004. – № 4. – С. 8–11.
4. **Мясникова, Н. В.** Теоретические основы экспресс-анализа / Н. В. Мясникова, М. П. Берестень // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2006. – № 6. – С. 117–123.