

УДК 621.391:534.23

КЛАССИФИКАЦИЯ ИМПУЛЬСОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ЗВУКОВОГО ДИАПАЗОНА НА БАЗЕ СИМВОЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ

Тристанов А.Б., к.т.н., с.н.с. Института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (Камчатка), доцент Калининградского государственного технического университета, e-mail: alextristanov@mail.ru;

Луковенкова О.О., аспирантка Института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (Камчатка), преподаватель Камчатского государственного университета им. Витуса Беринга (Петропавловск-Камчатский).

THE SOUND RANGE ACOUSTIC EMISSION PULSES CLASSIFICATION BASED ON SYMBOLIC REPRESENTATION OF TIME-FREQUENCY STRUCTURE

Tristanov A.B., PhD, senior researcher, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Science (IKIR FEB RAS), Associated Professor, Kaliningrad State Technical University;

Lukovenkova O., graduate student, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Science (IKIR FEB RAS), teacher Vitus Bering Kamchatka State University.

The paper presents the main approaches to the acoustic emission signals analysis based on methods of sparse and symbolic approximation of a time-frequency structure. It is presented the modification of the classical algorithm SAX for time-frequency domain. The method of signals classification is shown.

Key words: acoustic emission, geoaoustic signal, time-frequency analysis, sparse approximation, matching pursuit.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, геоакустический сигнал, частотно-временной анализ, разреженная аппроксимация, алгоритм согласованного преследования.

Представлены основные подходы к анализу сигналов геоакустической эмиссии на базе методов разреженной и символьной аппроксимации частотно-временной структуры. Изложена модификация классического алгоритма SAX для частотно-временной области. Предложен подход к классификации сигналов.

Введение

Полуостров Камчатка – сейсмически активный регион, поэтому на геодинамических полигонах Камчатского края ведется непрерывный мониторинг различных физических процессов, связанных с сейсмической активностью, в том числе геоакустической эмиссии (ГАЭ). Сигналы ГАЭ представляют собой упругие колебания, возникающие вследствие дислокационных изменений окружающей среды.

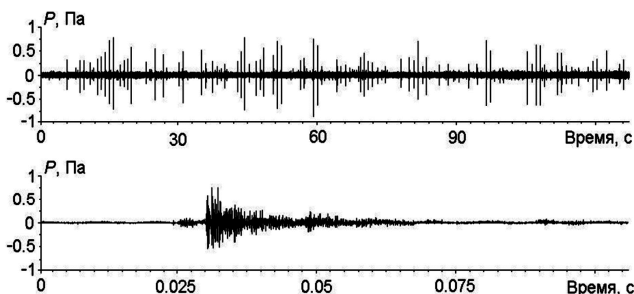


Рис. 1. Пример сигнала ГАЭ

Подробнее о механизмах возникновения ГАЭ, используемой для регистрации аппаратуре и методах предварительной обработки и анализа, можно найти в

[1]. Типичный сигнал ГАЭ складывается из релаксационных импульсов и шумовой составляющей как естественной, так и техногенной природы (рис 1).

Доказано, что частота следования импульсов резко возрастает за 1-3 суток перед сейсмическими событиями. Раскрытие внутренней структуры импульсов ГАЭ может помочь в исследовании источников происходящих в земной коре пластических процессов. Импульсы сильно различаются между собой длительностью (от 3 до 250 мс), временной формой, частотной структурой (рис. 2), поэтому одной из важнейших задач анализа сигналов ГАЭ является классификация участков сигнала, содержащих импульс. Алгоритм классификации на основе частотно-временной структуры облегчит поиск однотипных импульсов в сигналах и, следовательно, ускорит процесс поиска интересующей информации в накопленных и структурированных данных.

Метод анализа сигналов ГАЭ

Малая длительность (одиночный импульс не превышает 250 мс), большое разнообразие временных форм и сильная зашумленность не позволяют эффективно ис-

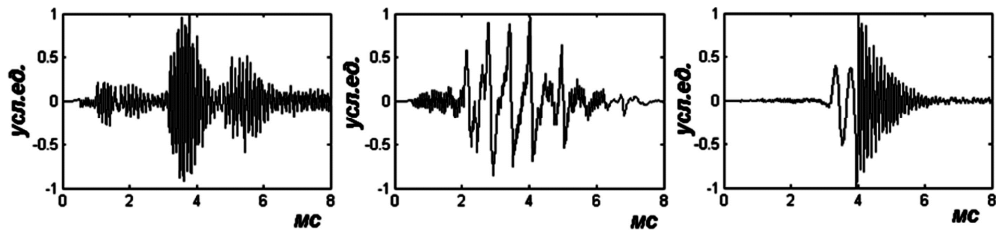


Рис. 2. Разнообразие временных форм импульсов ГАЭ

использовать классические методы частотно-временного анализа сигналов, такие как спектрограммы, вейвлеты и др., поэтому в 2011 году для анализа сигналов ГАЭ было предложено использовать методы разреженной аппроксимации [2]. Из огромного количества алгоритмов, решающих задачу разреженной аппроксимации, был выбран предложенный Mallat S. и Zhang Z. [3] алгоритм согласованного преследования (Matching Pursuit, MP). Работы [2, 4, 5] посвящены применению данного алгоритма для анализа сигналов ГАЭ. В [6] описаны модификации классического согласованного преследования, позволяющие применять метод в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Изначально в качестве словаря использовался словарь Габора, состоящий из масштабированных, модулированных и сдвинутых функций Гаусса [2].

$$g(t) = A \cdot \exp(-Bt^2) \cdot \sin(2\pi ft)$$

Из теории цифровой обработки сигналов известно, что функции Гаусса обладают наименьшей площадью частотно-временного окна.

Позднее для анализа сигналов ГАЭ было предложено использовать словарь Берлаге [4].

$$g(t) = A \cdot t^n \cdot \exp(-Bt) \cdot \sin(2\pi ft)$$

Функция Берлаге – одна из наиболее популярных моделей сейсмического импульса. Модулированная функция Берлаге обладает схожей с элементарными импульсами ГАЭ структурой, поэтому словарь Берлаге лучше словаря Габора аппроксимирует участки сигнала, содержащие импульс.

В последних работах авторов [6] показано, что применение смешанного словаря, включающего как функции Гаусса, так и функции Берлаге, существенно повышает качество аппроксимации сигналов ГАЭ, при этом атомы Берлаге преимущественно аппроксимируют участки сигнала, содержащие импульс, а атомы Габора – акустический шум.

Модель сигнала ГАЭ, построенная на базе разреженного представления

$$\begin{cases} sig = \sum_{i=0}^{N-1} a_i \Phi[f_i, \bar{p}_i] + R_N, \\ N \rightarrow \min, \end{cases}$$

где sig – исследуемый сигнал, $g_i = \Phi[f_i, \bar{p}_i]$ – элементы разложения (атомы), f_i – частота атома, \bar{p}_i – вектор параметров, отвечающих за форму атома, R_N – ошибка аппроксимации, обладает рядом преимуществ: во-первых, оно компактно (в среднем разложение типичного одиночного импульса состоит из 6-8 атомов); во-вторых, информативно (раскрывает внутреннюю структуру импульса). На рис. 3 можно увидеть частотно-

временные области разложений, полученных с помощью оконного преобразования Фурье (ОПФ) и согласованного преследования (MP).

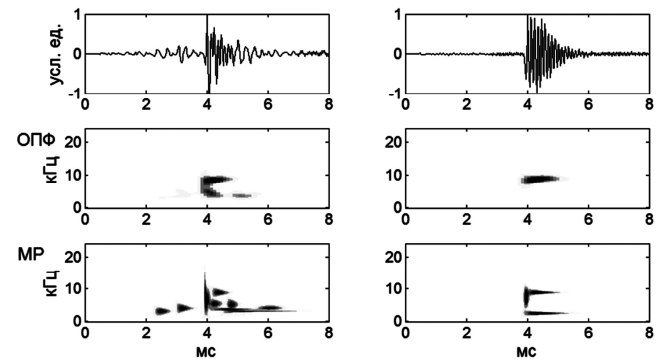


Рис. 3. Анализ импульсов ГАЭ методами оконного преобразования Фурье (ОПФ) и согласованного преследования (MP)

Символьная аппроксимация в частотной области

Для классификации импульсов ГАЭ по их разреженному представлению авторами был применен модифицированный вариант метода символьной аппроксимации (Symbolic Aggregate AppRoXimation, SAX), предложенного Lin J., Keogh E., Lonardi S., Chiu B. в [7]. В качестве признакового описания была выбрана несущая частота атомов.

Классический вариант символьной аппроксимации применяется к сигналам во временной области. Предварительно выбираются размер символьного словаря (алфавита) и длина последовательности (слова) m . На первом этапе исследуемый сигнал sig длиной n отсчетов нормируется и центрируется, затем разбивается на m равных непересекающихся участков, каждый из которых усредняется, и сигнал преобразуется в кусочно-постоянное представление (Piecewise Aggregate Approximation, PAA).

$$sig \rightarrow PAA = \bar{c}_1, \bar{c}_2, \dots, \bar{c}_m$$

$$\bar{c}_i = \frac{n}{m} \sum_{j=\frac{n}{m}(i-1)+1}^{\frac{n}{m}i} sig_j.$$

Далее каждый участок в зависимости от среднего значения «кодируется» определенным символом, формируется символьное представление сигнала (рис. 5).

$$PAA = \bar{c}_1, \bar{c}_2, \dots, \bar{c}_m \rightarrow SAX = c_1, c_2, \dots, c_m$$

$$c_i = \alpha_j, \text{ if } \beta_{j-1} \leq \bar{c}_i < \beta_j.$$

Уровни β_j подбираются таким образом, чтобы попадание среднего значения сигнала в области, соответствующие разным символам алфавита, было равновероятно. Одним из допущений использования алгоритма символьной аппроксимации является предположение о

том, что значения амплитуды исследуемого сигнала подчиняются нормальному закону распределения, и как следствие, уровни рассчитываются из условия равенства площадей, ограниченных уровнями, под кривой нормального распределения.

Применение метода к разреженному представлению импульсов в частотной области требует внесения ряда изменений. Во-первых, распределение частот исследуемых сигналов не является нормальным, следовательно, значения уровней, применяемые для классической символьной аппроксимации, не подходят.

Для оценки кривой плотности вероятности распределения частот адаптивным согласованным преследованием было получено разреженное представление для 2000 характерных одиночных импульсов ГАЭ по комбинированному словарю, состоящему из функций Гаусса и Берлага [6]. На рис. 4а изображены гистограмма распределения всех частот, включенных в разложения, и оценка плотности вероятности на отрезке от 0 до 24 кГц методом ядерного сглаживания. По графику кривой видно, что распределение частот полимодальное, пик на 8,8 кГц.

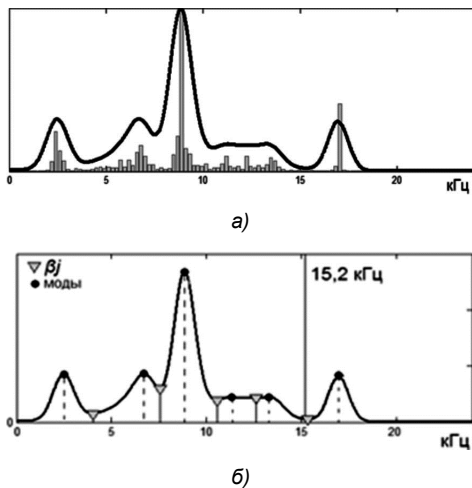


Рис. 4. а) Гистограмма распределения частот в разложения и оценка кривой плотности вероятности; б) расположение мод и уровней β

Как упоминалось выше, импульс может содержать не только полезную информацию, но и шум. Очень часто регистрируемые сигналы содержат техногенный шум небольшой амплитуды, так называемую паразитную импульсную наводку (ПИН). На практике выяснилось, что, как правило, информативная составляющая импульса не превышает по частоте 15,2 кГц, и все что лежит выше, относится к ПИН (рис. 5). Поэтому для анализа из разложений можно исключать атомы, частота которых превышает 15,2 кГц, а кривую распределения рассматривать на отрезке от 0 до 15,2 кГц.

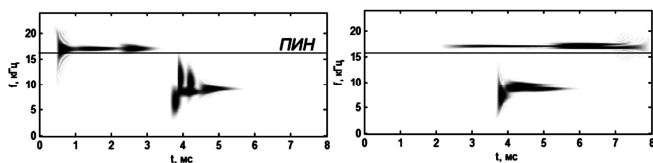


Рис. 5. Паразитная импульсная наводка в импульсах ГАЭ

Как и в классическом варианте, уровни можно рассчитать из условия равенства площадей под кривой

распределения, но такой подход оказался неэффективен: сильная островежность пика приводит к большой плотности (скупенности) уровней, что отрицательно отражается на анализе сигналов. Поэтому было решено, выбрать значения уровней β таким образом, чтобы разграничить моды распределения (рис. 4б). Оценки значений уровней β для алфавитов различного объема представлены в табл. 1.

Таблица 1. Значения уровней β (Гц)

Объем алфавита \ β	3	4	5
β_1	7551	4020	4020
β_2	10554	7551	7551
β_3		10554	10554
β_4			15353

Во-вторых, нет необходимости преобразования сигнала к кусочно-усредненному представлению РАА, так как каждый атом в частотной области определяется одним значением – своей частотой. Для сохранения хронологии следования символов, перед «кодированием» необходимо расположить частоты атомов в порядке их появления в сигнале. Видоизмененный вариант SAX можно описать следующими формулами

$$sig \rightarrow MP = \sum_{i=1}^N a_i \Phi[f_i, \bar{p}_i]$$

$$MP = \sum_{i=1}^N a_i \Phi[f_i, \bar{p}_i] \rightarrow SAX = c_1, c_2, \dots, c_N$$

$$c_i = \alpha_j, \text{ if } \beta_{j-1} \leq f_i < \beta_j,$$

где β_j – значения уровней из табл. 1.

На рис. 6 и 7 изображен процесс применения модифицированного алгоритма символьной аппроксимации к импульсу ГАЭ.

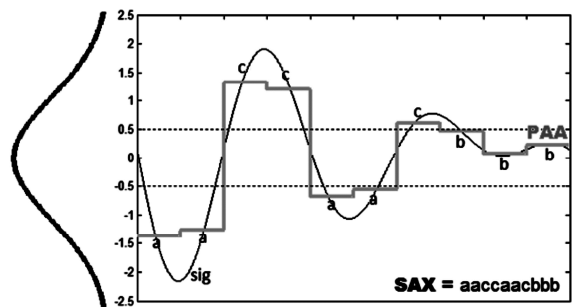


Рис. 6. Символьная аппроксимация сигнала

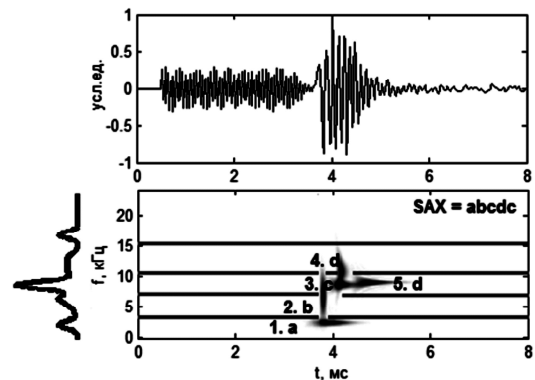
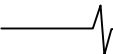


Рис. 7. Применение символьной аппроксимации к импульсу ГАЭ



Классификация импульсов ГАЭ по символному представлению

Символьное представление импульсов позволяет:

1. Проводить иерархическую кластеризацию импульсов. Расстояния между символными представлениями вычисляются по формуле

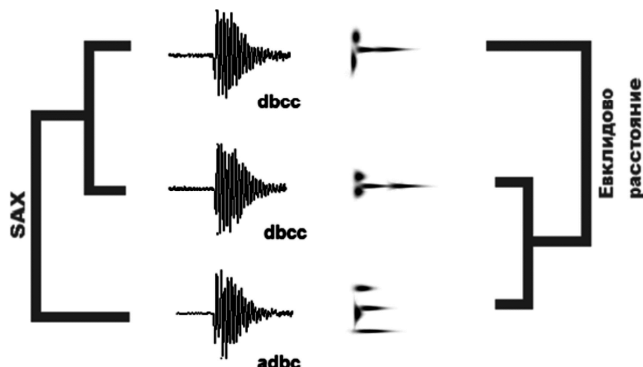


Рис. 8. Пример иерархической кластеризации по символному представлению

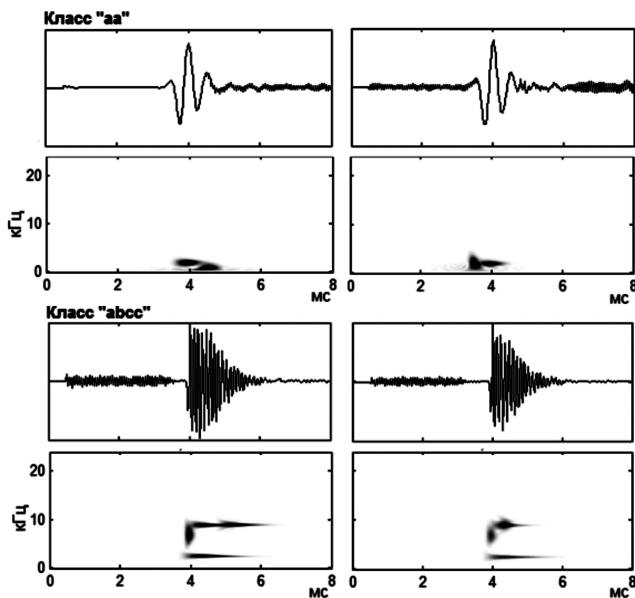


Рис. 9. Классификация импульсов

$$\rho(SAX^1, SAX^2) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \rho(c_i^1, c_i^2)^2},$$

$$\rho(\alpha_i, \alpha_j) = \begin{cases} 0, & |i - j| \leq 1 \\ \beta_{\max(i,j)-1} - \beta_{\min(i,j)} \end{cases}$$

На рис. 8 изображены иерархии, построенные по временной форме сигнала и по символному представлению в частотной области.

2. Классифицировать импульсы. Каждое символное представление описывает отдельный класс импульсов в частотной области (рис. 9).

Заключение

В рамках настоящей работы предпринята попытка перейти от анализа отдельных частотно-временных распределений, получаемых методом разреженной аппроксимации, к системе классификации импульсов акустической эмиссии. Дальнейшие исследования должны быть направлены на уточнение данной классификации путем более тонкой настройки алгоритмов.

Литература

1. Марапулец Ю.В., Шевцов Б.М. Мезомасштабная акустическая эмиссия. – Владивосток: Даль-наука, 2012. – 125 с.
2. Марапулец Ю.В., Тристанов А.Б. Применение метода разреженной аппроксимации в задачах анализа сигналов геоакустической эмиссии // Цифровая обработка сигналов. 2011, №2, С.13-17.
3. Mallat S., Zhang Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries // IEEE Transactions on Signal Processing, 41(12), P.3397-3415.
4. Марапулец Ю.В., Тристанов А.Б. Разреженная аппроксимация акустических временных рядов с использованием частотно-временного словаря Берлаге // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и её применение. 2012. Выпуск: XIV; Том-1, С. 91-94.
5. Афанасьева А.А., Луковенкова О.О., Марапулец Ю.В., Тристанов А.Б. Применение разреженной аппроксимации и методов кластеризации для описания структуры временных рядов акустической эмиссии // Цифровая обработка сигналов. 2013. №2. С. 30-34.
6. Луковенкова О.О., Тристанов А.Б. Адаптивный алгоритм согласованного преследования с уточнением на смешанных словарях в анализе сигналов геоакустической эмиссии // Цифровая обработка сигналов. 2014. №2. С. 54-57.
7. Lin J., Keogh E., Lonardi S., and Chiu B. A symbolic representation of time series, with implications for streaming algorithms // Proceedings of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data (DMKD '03), P. 2–11, 2003.