

# Автоматическое выделение импульсов геоакустической эмиссии на основе метода согласованного преследования

МАРАПУЛЕЦ Ю.В., ТРИСТАНОВ А.Б., ЛУКОВЕНКОВА О.О., АФАНАСЬЕВА А.А.

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,  
Россия

marpl@ikir.ru, alextristanov@mail.ru, a.a.afanaseva@yandex.ru

С 1999 года на полуострове Камчатка проводится изучение геоакустической эмиссии на различных стадиях сейсмической активности. Регистрация осуществляется непрерывно с частотой 48 кГц, что существенно осложняет ручную обработку. Анализ геоакустического сигнала показывает, что он состоит из серии релаксационных колебаний (импульсов) с ударным возбуждением, амплитудой 0.1 – 1 Па, длительностью, не превышающей 200 мс, частотным заполнением в единицы и первые десятки кГц.

Одной из основных задач обработки сигналов геоакустической эмиссии является автоматическое выделение и частотно-временной анализ импульсов. В последние годы, наряду с классическими методами анализа сигналов активно использовались методы разреженной аппроксимации, показавшие свою достаточную эффективность [1].

В данной работе предложен новый подход к обнаружению импульсов геоакустической эмиссии, основанный на анализе разложения сигнала, построенного методом разреженной аппроксимации.

Разреженная аппроксимация предполагает построение модели сигнала, содержащей наименьшее число элементов, т.е.

$$\begin{aligned} f(t) &= \sum_{m=0}^{N-1} a_m g_m(t) + R_N \\ \|R_N\| &\rightarrow \min \\ \|a_m\|_0 &\rightarrow \min \end{aligned} ,$$

где  $f(t)$  – исследуемый сигнал,  $g_m(t)$  – элемент (атом словаря) словаря

$$D = \{g_m(t), \|g_m\| = 1\},$$

$a_m$  – коэффициенты разложения,  $N$  – количество элементов разложения,  $R_N$  – ошибка аппроксимации,  $\|\cdot\|_0$  – псевдонорма, равная числу ненулевых членов вектора.

Как правило, методы разреженной аппроксимации используются для разложения сигналов по избыточным словарям, предоставляя исследователю обширный инструментарий для анализа структуры сигнала, но, нагружая задачу большой вычислительной сложностью, что не позволяет решить её за полиномиальное время.

Алгоритмы преследования уменьшают вычислительную сложность поставленной задачи, осуществляя поиск эффективных, но не оптимальных аппроксимаций.

Одним из алгоритмов преследования является алгоритм согласованного преследования, предложенный Mallat S. И Zhang Z. Суть алгоритма сводится к итеративному процессу поиска элементов словаря, минимизирующих на каждом шаге ошибку аппроксимации [2]:

$$\begin{cases} R^0 f = f \\ R^n f = \langle R^n f, g_{\gamma_n} \rangle g_{\gamma_n} + R^{n+1} f \\ g_{\gamma_n} = \arg \left[ \max_{g_{\gamma_i} \in D} |\langle R^n f, g_{\gamma_i} \rangle| \right] \end{cases} .$$

Выбор словаря является важной задачей, от которой зависит качество дальнейшего анализа. Предыдущие работы показали, что наиболее эффективным словарем для аппроксимации геоакустических сигналов является словарь Берлаге, поскольку импульсы Берлаге обладают схожей структурой с импульсами геоакустической эмиссии [3].

В процессе анализа большого количества реальных данных методом согласованного преследования было обнаружено, что на различных участках сигнала итеративный процесс разложения ведет себя по-разному: ошибка аппроксимации спадает ощутимо быстрее на участках сигнала, содержащих одиночные импульсы.

На основе данной закономерности была предложена идея алгоритма автоматического выделения импульсов в сигнале с использованием метода согласованного преследования.

Алгоритм состоит из четырех этапов: формирование обучающей выборки, построение решающих правил, предобработка тестируемого сигнала, анализ тестируемого сигнала скользящим окном.

Рассмотрены сигналы, регистрируемые в разные дни, и сформирована обучающая выборка, состоящая из 1000 объектов класса “Импульс есть” и 1000 объектов класса “Импульса нет” (рис. 1). Следует отметить, что для построения выборки использовались наиболее явные одиночные импульсы, амплитуда которых превышала амплитуду шума не менее, чем в 3 раза.

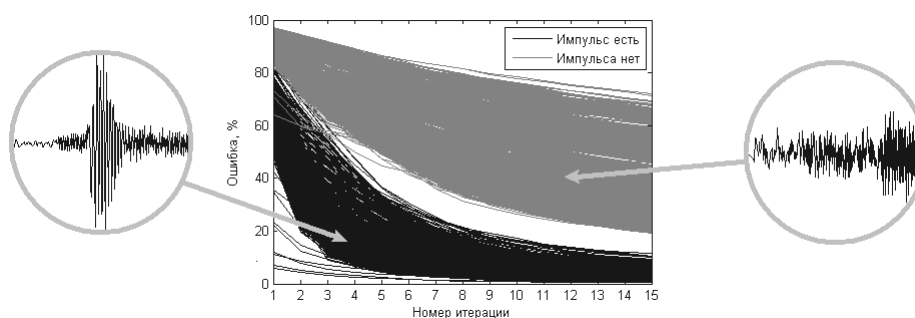


Рис. 1. Обучающая выборка

Следующим этапом является поиск правил для обнаружения импульсов. Признаковое пространство данной задачи классификации образовано значениями спада ошибки метода согласованного преследования при аппроксимации участков сигнала длительностью 8 мс 15 атомами словаря Берлаге.

Поиск решающих правил осуществлялся тремя способами.

#### 1. Построение дерева решений.

На основе обучающей выборки с помощью функций Statistics Toolbox среды MATLAB было построено дерево решений, представленное на рис. 2.

#### 1. Граница областей.

Как видно из рис. 1, графики спада ошибок объектов класса “Импульс есть” и объектов класса “Импульса нет” сгруппированы в различных областях координатной плоскости, следовательно, возможно построить линию, четко разграничивающую данные области, и классифицировать неизвестный объект по положению графика спада ошибки относительно полученной линии (рис. 3).

#### 1. Центры классов.

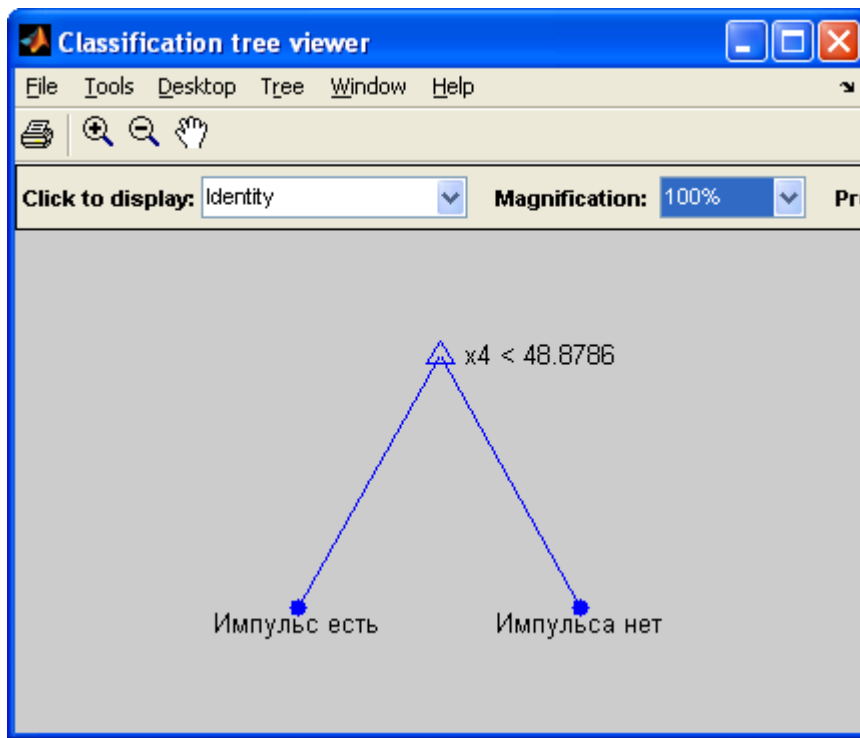


Рис. 2. Дерево решений

Если представить график спада ошибки каждого объекта обучающей выборки как пятнадцатимерную точку, то для каждого из множеств “Импульс есть” и “Импульса нет” можно рассчитать центральный элемент, и класс неизвестного объекта определять по степени близости его точки в пятнадцатимерном пространстве к центральным элементам (рис. 3).

Решающие правила были протестированы на 5023 неизвестных объектах (табл. 1). Наиболее эффективным по проценту корректно определенных объектов оказалось правило, полученное третьим способом.

Таблица 1. Результаты тестирования решающих правил

Тип объекта	Всего	Кол-во неправильно определенных объектов	Процент правильно определенных объектов
<i>Дерево решений (CART)</i>			
Импульсы	3899	11	99,72%
Шум	1124	0	100%
<i>Граница</i>			
Импульсы	3899	8	99,78%
Шум	1124	0	100%
<i>Центры классов</i>			
Импульсы	3899	6	99,85%
Шум	1124	0	100%

Для проверки робастности решающих правил был проведен следующий эксперимент. Было отобрано 200 слабо зашумленных импульсов, не включенных в обучающую выборку,

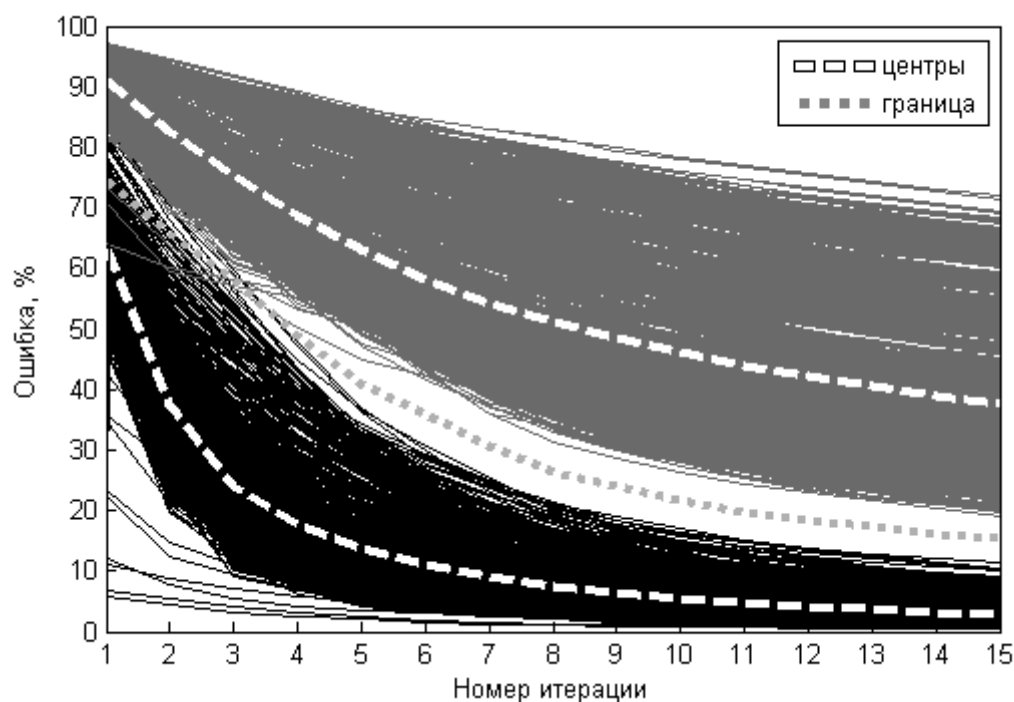


Рис. 3. Граница областей и центры классов

к каждому из них последовательно до тех пор, пока алгоритм не давал ложный результат, прибавлялся белый шум все большей амплитуды. Эксперимент показал, что алгоритм дает ложный результат в среднем при соотношении сигнал – шум, равном 3.4 Дб. На рис. 4 представлен график зависимости процента правильного распознавания от соотношения сигнал – шум (SNR).

Разработанный алгоритм был протестирован на сигнале длиной 10000 отсчетов. Предобработка сигнала заключалась в нормировании, центрировании и фильтрации в диапазоне 1-48 кГц. Фильтрация позволила очистить сигнал от техногенных наводок и помех, имеющих место в регистрирующем тракте. На вход алгоритма посылались участки, вырезанные скользящим окном длительностью 8 мс. Для участков, содержащих импульс, частотно-временное разложение сохранялось. В результате были выявлены все импульсы, присутствующие в сигнале, за исключением сильно зашумленных и искаженных (рис. 5).

## Литература

1. *Марапулец Ю.В., Тристанов А.Б.* Применение метода разреженной аппроксимации в задачах анализа сигналов геоакустической эмиссии // Цифровая обработка сигналов. –2011, –№2, –С.13-17.
2. *Малла С.* Вэйвлеты в обработке сигналов.– М.: Мир, 2005.– 672 с.
3. *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. –Т.1. –С. 91-94.

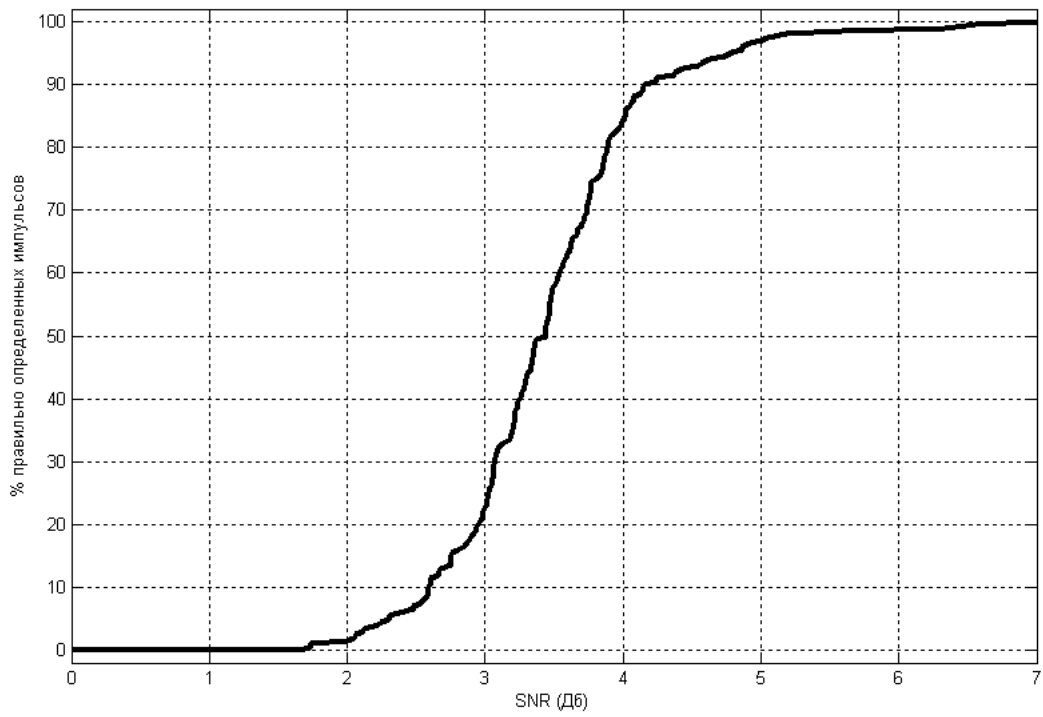


Рис. 4. График зависимости процента правильного распознавания от SNR

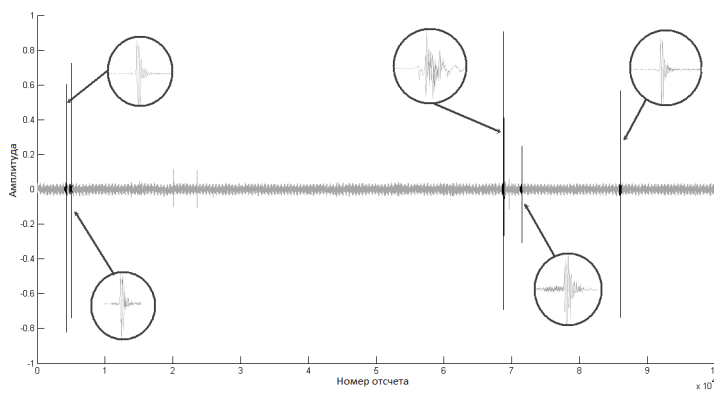


Рис. 5. Эксперимент на реальных данных

# Sparse approximation method in the analysis of acoustic emission signal morphological features

*Tristanov A.B.<sup>1,2</sup>, Marapulets Y.V.<sup>1</sup>, Lucovcova O.O.<sup>1</sup>, Afanasieva A.A.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation FEB RAS, Russia*

<sup>2</sup> *Kaliningrad State Technical University, Russia*

Acoustic emission is the phenomenon of elastic wave radiation by an object under examination during its nonlinear transformation. The purpose of the investigation of acoustic emission signals is to obtain information on solid body restructuring. The acoustic emission signal contains acoustic emission single pulse flow distorted by wave propagation channel and carries information on dynamic restructuring in the object, a generation source. There is a significant distortion of the original pulse, when it passes through the environment and receiving channel of a recording device, a characteristic signal is recorded. During the activation of a plastic process, many elementary sources are formed, that generate acoustic emission single pulses, which, in their turn, blending and distorting additively, form the resulting signal registered by receivers. It is important to detect the pulse morphological structure according to the data recorded by a receiver. The authors suggest to apply the matching pursuit method providing the sparse signal model. This method sequentially extracts functions, which minimize signal approximation error, from the family of characteristic wave forms (dictionary). The basis of this family is the dictionary, consisting of Berlage pulses, which form correlate with the signal most accurately. The paper analyzes signals by the proposed method, specific classes of acoustic emission pulses are distinguished, the behavior of approximation error is analyzed, and the model for a signal is suggested.