

## АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ СОГЛАСОВАННОГО ПРЕСЛЕДОВАНИЯ С УТОЧНЕНИЕМ НА СМЕШАННЫХ СЛОВАРЯХ В АНАЛИЗЕ СИГНАЛОВ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

*Луковенкова О.О., аспирантка Института космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (ИКИР ДВО РАН), e-mail: o.o.lukovenkova@yandex.ru;*

*Тристанов А.Б., к.т.н., старший научный сотрудник Института космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (ИКИР ДВО РАН), доцент Калининградского государственного технического университета, e-mail: alextristanov@mail.ru*

**Ключевые слова:** геоакустическая эмиссия, согласованное преследование, адаптивный алгоритм, смешанный словарь, разреженная аппроксимация.

Под геоакустической эмиссией понимаются упругие колебания, возникающие в твердых природных средах под влиянием дислокационных изменений (рис. 1). С 1999 года на полуострове Камчатка ведется активное изучение сигналов ГАЭ на различных стадиях сейсмической активности. В работе [1] описаны особенности, методы регистрации, предварительной обработки и анализа сигналов ГАЭ.

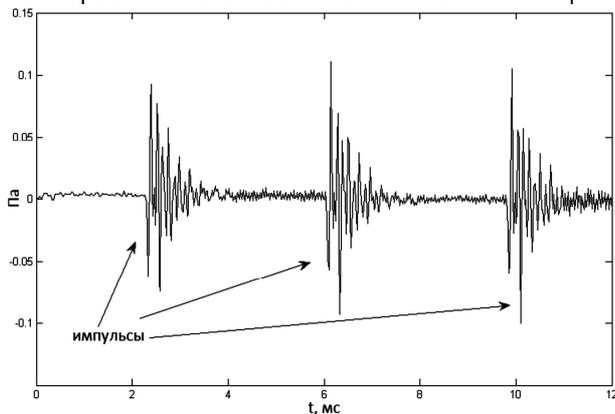


Рис. 1. Пример сигнала ГАЭ

Традиционно для анализа сигналов импульсной природы используются классические методы частотно-временного анализа: преобразование Фурье, оконное преобразование Фурье, вейвлет-анализ [2, 3, 10, 11]. Однако, в связи с малой длительностью, временной локализованностью аномалий и сильной зашумленностью, классический частотно-временной анализ сигналов ГАЭ не дает желаемых результатов. В 2011 году лабораторией акустических исследований ИКИР ДВО РАН впервые для анализа внутренней структуры сигналов ГАЭ было предложено использовать метод разреженной аппроксимации [4]. В ходе экспериментов авторами показано, что наиболее подходящим из алгоритмов разреженной аппроксимации для анализа сигналов ГАЭ является алгоритм согласованного преследования (Matching Pursuit), предложенный Mallat S. и Zhang Z. [5].

Подробно о подходе разреженной аппроксимации и

В 2011 году лабораторией акустических исследований впервые для более точного анализа внутренней структуры сигналов был предложен метод разреженной аппроксимации. В ходе экспериментов выяснилось, что наиболее подходящим из алгоритмов разреженной аппроксимации для анализа сигналов геоакустической эмиссии (ГАЭ) является алгоритм согласованного преследования (Matching Pursuit). Одним из преимуществ подхода разреженной аппроксимации является возможность использования смешанных словарей, описанных различными математическими функциями. В представленной статье описано применение смешанного словаря, составленного из функций Габора и Берлаге, и предложен усовершенствованный алгоритм с добавлением уточнения в пространстве параметров словаря, названный адаптивным согласованным преследованием с уточнением. Новый алгоритм модифицирован для применения на смешанных словарях и протестирован на реальных сигналах ГАЭ.

методе согласованного преследования изложено в [2, 5, 8, 9]. Работы авторов [4, 6, 7] посвящены применению алгоритма согласованного преследования для анализа сигналов ГАЭ.

В отличие от методов классического частотно-временного анализа, порождающих избыточные разложения сигналов, включающие все атомы словаря, разреженная аппроксимация, не теряя в точности, строит компактные представления, состоящие лишь из наиболее значимых элементов словаря. Еще одним преимуществом подхода разреженной аппроксимации является возможность разложения сигналов по неортогональным в общем случае словарям, описываемым различными математическими функциями, что обеспечивает более широкие возможности для интерпретации моделей сигнала и объяснения физики процессов генерации сигналов. От выбора словаря  $D$  зависит качество аппроксимации, дальнейший анализ и интерпретация.

В первом приближении элементы сигнала ГАЭ могут быть описаны локализованными модулированными функциями. На основе данного заключения в ранних работах в качестве словаря  $D$  был выбран словарь Габора, включающий масштабированные, модулированные и сдвинутые по времени функции Гаусса [4]:

$$g(t) = Ae^{-Bt^2} \sin(2\pi ft).$$

В работе [6] показано, что словарь, составленный из масштабированных, модулированных и сдвинутых

функций Берлаге, является более адекватным по сравнению со словарем Габора, т.к. функции Берлаге обладают схожей структурой с элементарными импульсами ГАЭ, поэтому лучше аппроксимируют участки сигнала, содержащие импульсы

$$g(t) = At^n e^{-Bt} \cos\left(2\pi ft + \frac{\pi}{2}\right).$$

Функции Гаусса подходят для аппроксимации зашумленных участков сигнала. На рис. 2 представлены графики зависимостей средней (по 100 сигналам) ошибки аппроксимации от числа итераций алгоритма согласованного преследования для словарей Берлаге и Габора.

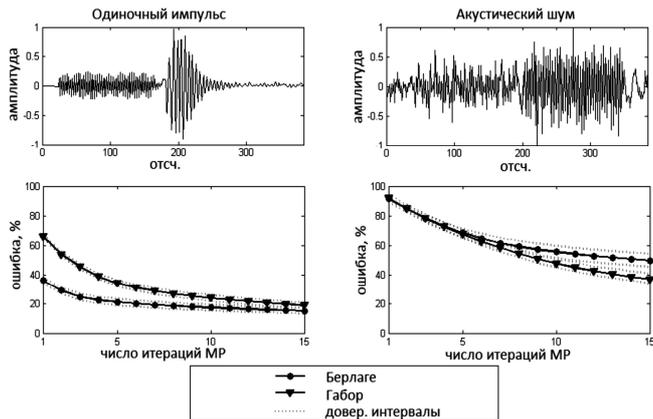


Рис. 2. Сравнение спада ошибок аппроксимации для участков сигнала, содержащих и не содержащих одиночные импульсы ГАЭ

Для улучшения качества аппроксимации сигналов ГАЭ было решено использовать смешанный словарь, включающий как функции Берлаге, так и функции Гаусса. Далее под *монословарем* понимается набор однотипных функций, полученных вариацией значений независимых параметров материнской функции (словари Габора и Берлаге), под *смешанным* – словарь, составленный из атомов, описываемых различными математическими функциями.

Формирование словаря, в первую очередь, требует определения диапазонов независимых параметров, значения которых уникальным образом характеризуют каждый частотно-временной атом. Для функции Гаусса были выделены следующие параметры: частота заполняющей гармоники  $f$  [Гц], длина атома  $T_{end}$  [с], приращение параметра, отвечающего за форму огибающей атома  $\Delta$

$$g(t) = Ae^{-(B_{lim}(T_{end} + \Delta)t)^2} \sin(2\pi ft),$$

где  $B_{lim}$  – критическое значение параметра  $B$ , отвечающего за форму огибающей, при котором амплитуда атома на границе области определения составляет 5% от

максимального значения.

Для функции Берлаге – частота заполняющей гармоники  $f$  [Гц], длина атома  $T_{end}$  [с], положение максимума  $t_{max}$  [с], приращение параметра, отвечающего за форму огибающей атома  $\Delta$

$$g(t) = At^{n_{lim}(T_{end} + t_{max}) + \Delta} e^{-\frac{n_{lim}(T_{end} + t_{max}) + \Delta}{t_{max}} t} \cos\left(2\pi ft + \frac{\pi}{2}\right),$$

где  $n_{lim}$  – критическое значение параметра  $n$  при котором амплитуда атома на границе области определения составляет 5% от максимального значения.

В ходе серии экспериментов были проанализированы распределения параметров, наиболее часто встречаемых в разложениях атомов, и подобраны обеспечивающие подходящее качество аппроксимации диапазоны параметров (табл. 1).

Сформированный смешанный словарь, состоящий из 640 функций Берлаге и 400 функций Гаусса, тестировался на 200 сигналах ГАЭ длиной 8 мс, первая половина из которых содержала явные одиночные импульсы с амплитудой 0.02 – 0.05 Па и заполняющей частотой 5 – 15 кГц, а вторая – акустический шум. Предварительная обработка сигналов включала фильтрацию по частотному диапазону 1 – 24 кГц и нормирование по амплитуде. Для каждого из исследуемых сигналов по заданному смешанному словарю алгоритмом согласованного преследования строилась разреженная аппроксимация по 15 атомам. Ошибка аппроксимации вычисляется по формуле

$$\varepsilon_N = \frac{\|R^N s\|}{\|s\|} \times 100\%,$$

где  $R^N s$  – остаток на  $n$ -й итерации,  $s$  – исследуемый сигнал. Использование смешанного словаря снизило ошибку на 5-10 % по сравнению с ошибкой на монословаре Берлаге (рис. 3).

Расширение словаря, включение в него новых атомов с параметрами из выбранных диапазонов также существенно улучшает качество аппроксимации сигналов, однако увеличение размерности словаря сопряжено со значительными затратами временных и пространственных вычислительных ресурсов.

Самой затратной частью алгоритма согласованного преследования является вычисление на каждой итерации скалярных произведений атомов словаря с сигналом. Пусть имеется словарь, состоящий из  $M$  атомов длиной  $L_{atom}$  отсчетов, и сигнал длиной  $L_{sig}$  отсчетов, тогда вычисление всех скалярных произведений потребует выполнения  $M \times (2L_{atom} - 1) \times L_{sig}$  сложений и умножений, соответственно объем вычислительных ресурсов, требуемых для выполнения алгоритма, прямо пропорционален размеру словаря  $M$ .

Таблица 1. Параметры для формирования смешанного словаря

Параметр	$f$	Длина атомов в % относительно длины сигнала, $\frac{T_{end}}{T_{atom}} \times 100\%$	$\Delta$	Положение максимума огибающей в % относительно длины атома, $\frac{t_{max}}{T_{end}} \times 100\%$
Словарь				
Берлаге	200 – 15000	50 – 100%	5 – 20	10 – 35%
Габора			$10^5 - 10^9$	–

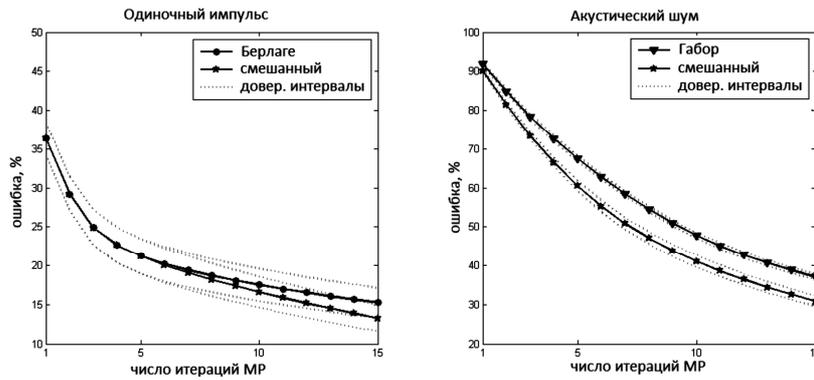


Рис. 3. Графики спада средних ошибок аппроксимации (по 100 сигналам) для участков сигнала, содержащих одиночные импульсы и акустический шум

Одним из способов повышения качества аппроксимации в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, не требующим расширения словаря, является добавление уточнения в пространстве параметров к алгоритму (рис. 4). Под *пространством параметров монословаря* будем понимать  $n$ -мерное пространство, образованное всеми допустимыми значениями  $n$  параметров атомов заданного словаря. Каждый атом в пространстве параметров представляется  $n$ -мерной точкой. Суть адаптивного алгоритма согласованного преследования с уточнением заключается в поиске нового, более значимого элемента разложения на каждой итерации алгоритма в окрестности выделенного атома. Найденный уточненный атом и все его сдвиги добавляются в словарь, адаптируя его к конкретным особенностям сигнала. Блок-схема процесса уточнения на примере словаря Габора представлена на рис. 5.

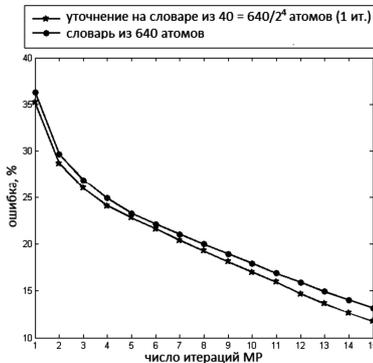


Рис. 4. Сравнение согласованного преследования с уточнением на словаре Берлаге из 40 атомов с классическим согласованным преследованием на словаре Берлаге из 640 атомов

Применение уточнения позволяет снизить объем затрачиваемых вычислительных ресурсов. Преобладающая часть времени выполнения одной итерации адаптивного алгоритма с уточнением на словаре с  $N_p$ -мерным пространством параметров складывается из времени выполнения  $(M + k \cdot 3^{N_p}) \times (2L_{atom} - 1) \times L_{sig}$  сложений и умножений и фиксированного времени формирования уточняющего словаря из  $3^{N_p}$  атомов, умноженного на количество итераций обучения  $k$ . Таким образом, объем вычислительных ресурсов, требуемых для согласованного преследования с уточнением, пропорционально зависит от размера словаря  $M$  и количества итераций обучения  $k$ . Для словаря определенного размера

$M$  можно подобрать значение  $k$ , обеспечивающее высокую точность при заданных вычислительных ресурсах.

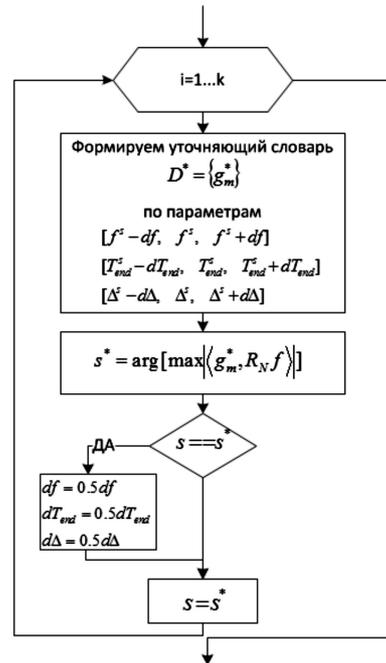


Рис. 5. Уточнение на примере словаря Габора

Адаптивное согласованное преследование с уточнением тестировалось на словарях Габора и Берлаге, описанных в табл. 1. Для данного размера словарей оптимально проводить около 5-10 итераций уточнения. Дальнейшее увеличение  $k$  вызывает незначительные изменения ( $<0.5\%$ ) ошибки аппроксимации (рис. 6).

Ввиду различия признаков пространств атомов на смешанных словарях следует применять модифицированное согласованное преследование с уточнением: на каждой итерации отдельно уточняются атомы, принадлежащие к различным семействам функций, затем из уже уточненных выбирается атом, обладающий наибольшим по абсолютной величине скалярным произведением с сигналом. Данные изменения вводятся для построения точных по типам функций разложений сигнала. По графикам спада средних ошибок аппроксимации (по 100 сигналам ГАЭ) классического согласованного преследования и согласованного преследования с уточнением на смешанном словаре, представленном на рис. 7, можно сделать вывод, что алгоритм с уточнением строит более качественные аппроксимации.

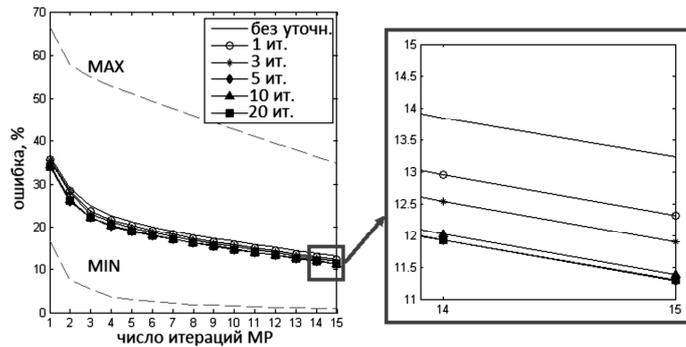


Рис. 6. Спады ошибок аппроксимации при различном количестве итераций уточнения

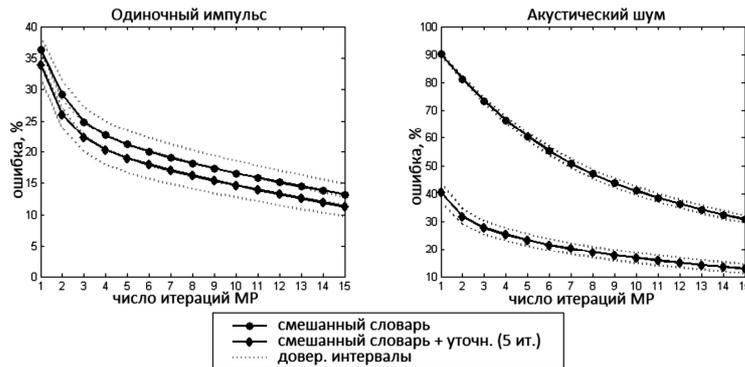


Рис. 7. Спад ошибок аппроксимации метода согласованного преследования с уточнением и без уточнения

В заключении следует отметить, что модификация классического согласованного преследования с использованием смешанных словарей и с привлечением алгоритмов уточнения в пространстве параметров существенно повышает качество аппроксимации сигналов ГАЭ. Предложенный алгоритм целесообразно использовать в системах обработки и анализа сигналов ГАЭ.

### Литература

1. Марапулец Ю.В., Шевцов Б.М. Мезомасштабная акустическая эмиссия. – Владивосток: Даль-наука, 2012. – 125 с.
2. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов. – М.: Мир, 2005. – 672 с.
3. Chakraborty A., Okaya D. Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet-based methods// Geophysics, vol.60, 6: P.1906-1916.
4. Марапулец Ю.В., Тристанов А.Б. Применение метода разреженной аппроксимации в задачах анализа сигналов геоакустической эмиссии // Цифровая обработка сигналов. 2011, № 2, С.13-17.
5. Mallat S., Zhang Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries. IEEE Transactions on Signal Processing, 41(12), P.3397-3415.
6. 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.
7. Афанасьева А.А., Лукovenkova 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.
8. Chen S.S., Donoho D.L., Saunders M. Atomic Decomposition by Basis Pursuit // SIAM J. Sci. Comput. 1998. Vol. 20, № 1. P. 33.

9. Donoho D.L., Elad M. Optimally sparse representation in general (nonorthogonal) dictionaries via  $l_1$  minimization. // Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. National Academy of Sciences, 2003. Vol. 100, № 5. P. 2197–2202.

10. Khelladi. M., Seddiki O., Bendimerad F.T. Time-frequency decomposition of an ultrashort pulse: wavelet decomposition. Radioengineering journal.2008. Vol. 17, №1. P. 56-63.

11. Aly O. A. M., Omar A. S. Detection and localization of RF radar pulses in noise environments using wavelet packet transform and higher order statistics. Progress In Electromagnetics Research, PIER 58. 2006. P. 301–317.

### ADAPTIVE REFINING MATCHING PURSUIT ALGORITHM FOR COMBINED DICTIONARIES IN THE ANALYSIS OF THE GEOACOUSTIC EMISSION SIGNALS

*Lukovenkova O., Tristanov A.*

From 1999 to study seismic processes the geoacoustic emission (GAE) signals have been measured continuously in Kamchatka. Typical GAE signal is of pulse nature. Traditionally, the classical methods of time-frequency analysis such as Fourier transform, short-time Fourier transform, wavelet transform and others are used for these signals. In 2011 acoustic researches laboratory first proposed the sparse approximation method for more detailed analysis of the GAE signal inner structure. Researchers have discovered that matching pursuit is the most proper algorithm for sparse approximating of the GAE signals. One of the main advantages of sparse approximation is the ability to use combined dictionaries described by different mathematical functions. This paper considers the use of combined dictionaries consisting of Gabor and Berlage functions. The improved algorithm of refinement in the parameter space named by adaptive refining matching pursuit has been proposed. The new algorithm has been changed to be used for combined dictionaries and tested on real GAE signals.