

Исследование электромагнитных сигналов диапазона ОНЧ с использованием разреженных аппроксимационных схем

О. О. Луковенкова¹, Ю. В. Марпулец², А. А. Ким³
ИКИР ДВО РАН;
КамГУ имени Витуса Беринга
¹o.o.lukovenkova@yandex.ru, ²marpl@ikir.ru,
³a.a.afanaseva@yandex.ru

А. Б. Тристанов
ИКИР ДВО РАН;
Калининградский государственный технический
университет
alextristanov@mail.ru

Аннотация. В статье описана методика анализа электромагнитных сигналов ОНЧ диапазона с использованием разреженной аппроксимации. Предлагаются модель сигнала-атмосферика и алгоритм ее идентификации – адаптивное согласованное преследование. Описан эксперимент по выбору базисных функций, наиболее точно аппроксимирующих электромагнитные сигналы. Приведены результаты тестирования предложенной методики на реальных электромагнитных сигналах.

Ключевые слова: электромагнитная эмиссия; разреженная аппроксимация; согласованное преследование

I. ВВЕДЕНИЕ

Регулярный шумовой фон в электромагнитном излучении существует постоянно. Его основными источниками являются грозовые очаги в атмосфере, а также потоки низкоэнергетических частиц в магнитосфере, поэтому в основном он формируется сигналами импульсной природы, которые получили название «атмосферики». Исследования шумовой составляющей в диапазоне очень низких частот (ОНЧ) в России были начаты в 1962 г. [1]. В настоящее время на Камчатке электромагнитные наблюдения в диапазоне ОНЧ ведутся с помощью многоканального регистратора, который состоит из двух рамочных и одной вертикальной штыревой антенн. Анализ электромагнитного сигнала, регистрируемого данной системой, показывает, что он состоит из релаксационных импульсов с ударным возбуждением, длительностью, не превышающей 50 мс, и частотным заполнением от единиц до первых десятков килогерц. В результате многолетних исследований было установлено, что за 1–2 суток перед землетрясениями с магнитудами $M > 5$ на гипоцентральных расстояниях до первых сотен километров возникают аномальные всплески электромагнитного излучения [2, 3]. Наиболее вероятной причиной возникновения такого излучения является активизация деформационных процессов при подготовке землетрясений, приводящая к изменению проводимости земной коры вблизи пункта наблюдения, либо к

возникновению близко расположенного источника электромагнитного излучения [3]. Для изучения источников, условий распространения электромагнитных сигналов и, в конечном итоге, выяснения природы аномального излучения, необходимо производить анализ и сравнение частотно-временных структур электромагнитных импульсов в фоновые периоды и во время аномальных всплесков перед землетрясениями.

В работе предлагается использовать разреженную аппроксимацию (РА) для анализа внутренней частотно-временной структуры электромагнитных импульсов. Ранее применение данного метода показало хорошие результаты при исследовании схожих по форме импульсных сигналов геоакустической эмиссии [4].

II. МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СИГНАЛА

В первом приближении электромагнитный сигнал может быть описан суммой полезного сигнала и шума:

$$x(t) = s(t) + \varepsilon(t),$$

где функция $s(t)$ принадлежит линейному нормированному пространству $L_2(R)$ и описывает неискаженный атмосферик, а $\varepsilon(t)$ – определяет шумовую составляющую сигнала $x(t)$. При этом $s(t)$ может быть аппроксимирована рядом функций

$$s(t) \approx \sum_{m=0}^{N-1} a_m g_m(t). \quad (1)$$

Для того чтобы аппроксимация (1) была разреженной необходимо выполнение условия $\|a\|_0 \rightarrow \min$. Функции $g(t)$ соответствуют элементарным импульсам, составляющим сигнал $s(t)$. Функции $g(t)$ выбираются из заранее определенной системы функций D . Для любого атмосферика можно построить аппроксимацию (1), удовлетворяющую следующим условиям [5]:

- $g(t)$ принадлежат линейному нормированному пространству $L^2(R)$, для случая дискретного времени норма определяется как

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект №18-11-00087

$$\|g\| = \sqrt{\langle g, g \rangle} = \sqrt{\sum_{i=0}^{L_g-1} g(i\Delta t)} \quad 0 \leq i \leq L_g - 1,$$

где L_g – количество отсчетов в $g(n \cdot \Delta t)$;

- в общем случае система функций D избыточна (в терминологии РА система функций, по которым строится аппроксимация, называется «словарем», а сами функции – «частотно-временными атомами» или просто «атомами»);
- $g(t)$ описывают элементарные импульсы, входящие в состав атмосфера, при этом каждый атом $g(t)$ однозначно определяется набором параметров \bar{p} : частотой заполняющей гармоники f ; параметрами, влияющими на форму огибающей и др.; т.е. существует однозначное отображение

$$\Phi: \bar{p} \rightarrow g(t; \bar{p});$$

- $\|g(t)\| = 1$.

В общем случае шумовая составляющая сигнала $\varepsilon(t)$ также может быть описана при помощи аддитивной модели, поэтому исходный сигнал электромагнитной эмиссии представим в виде

$$\begin{cases} x(t) = \sum_{i=0}^{N_1-1} \alpha_i g_i(t; \bar{p}) + \sum_{j=N_1}^{N_1+N_2-1} \beta_j g_j(t; \bar{p}) + R_N, & t_1 \leq t \leq t_L \\ \|R_N\| \rightarrow \min \\ \|\alpha\|_0 + \|\beta\|_0 \rightarrow \min \end{cases}, \quad (2)$$

где $g_i(t; \bar{p})$ и $g_j(t; \bar{p})$ – функции, аппроксимирующие импульс и шумовую составляющую импульса соответственно, N_1 и N_2 – количество атомов, входящих в состав импульса и шумовой составляющей сигнала соответственно, R_N – невязка, α_i и β_j – коэффициенты разложения.

Задача поиска разреженной аппроксимации сигнала, содержащей наименьшее количество ненулевых элементов и одновременно минимизирующей ошибку, в избыточном словаре в общем случае относится к NP-трудным задачам, и на сегодняшний день не существует алгоритма, способного решить ее за полиномиальное время. Однако существуют алгоритмы с полиномиальной вычислительной сложностью, позволяющие получить приближенное решение задачи РА.

В работах [5–8] в качестве метода идентификация аддитивной модели (2) для геоакустических сигналов предложен метод согласованного преследования (Matching Pursuit, MP). Суть метода заключается в итеративном процессе поиска атомов словаря, минимизирующих на

каждом шаге норму невязки R_N . Данный алгоритм имеет квадратично-логарифмическую вычислительную сложность $O(N^2 \log N)$.

$$\begin{cases} R_0(t) = s(t), \\ (m, h) = \arg \left[\max_{k,j} \left| \langle g_k(t - \tau_j), R_i(t) \rangle \right| \right], \\ R_{i+1}(t) = R_i(t) - \langle g_m(t - \tau_h), R_i(t) \rangle \cdot g_m(t - \tau_h). \end{cases}$$

Количество атомов, обеспечивающее достаточную точность разложения (т.е. N_1 и N_2), определяется с помощью величины ERR , вычисляемой отношением нормы невязки к норме исходного сигнала:

$$ERR_N = \frac{\|R_N\|}{\|s\|} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Разложение останавливается при достижении ERR заданного порогового значения.

III. ВЫБОР СЛОВАРЯ

Одним из важнейших этапов построения модели сигнала (2) является выбор базисных функций (атомов). При исследовании сигналов геоакустической эмиссии было установлено, что наилучшее качество аппроксимации обеспечивают словари, составленные из модулированных функций Гаусса, Берлаге (рис. 1), и комбинированный словарь, состоящий из функций обоих типов [5].

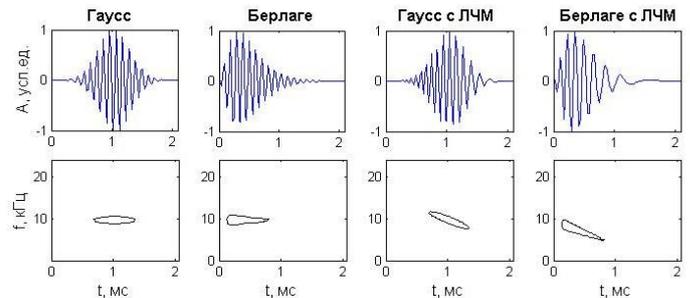


Рис. 1. Примеры базисных функций

Функции Гаусса описываются тремя независимыми друг от друга параметрами f , T_{end} , A , уникальным образом характеризующими каждый атом словаря. Данные параметры определяют частоту атома, длину временной формы и форму огибающей соответственно. У функций Берлаге к описанному набору параметров добавляется параметр p_{max} , определяющий относительное положение максимума в атоме (t_{max} / T_{end}).

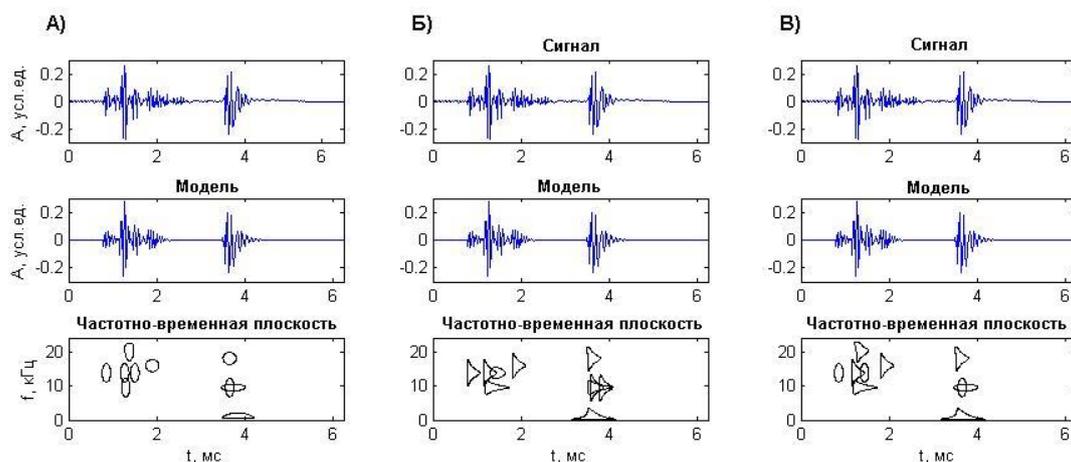


Рис. 2. Модели электромагнитного сигнала, построенные с использованием: А) словаря Гаусса; Б) словаря Берлаге; В) комбинированного словаря

Вышеописанные словари использовались при моделировании электромагнитных сигналов. На рис. 2 изображены модели атмосферика, полученные методом согласованного преследования:

- с использованием словаря Гаусса, составленного из 90 атомов (10 значений f , 3 значения T_{end} , 3 значения Δ);
- с использованием словаря Берлаге, составленного из 120 атомов (10 значений f , 3 значения T_{end} , 2 значения t_{max} , 2 значения Δ);
- с использованием комбинированного словаря, полученного путем объединения словарей Гаусса и Берлаге (210 атомов).

Представление модели в частотно-временной области получено с помощью преобразования Вигнера-Вилля (контуры вычислены по уровню 0.2).

В ходе анализа характерных атмосфериков было выявлено, что у большинства сигналов происходит затухание частоты импульсов. Данная особенность электромагнитных сигналов не соотносится с постоянной (неизменяющейся) частотой атомов Гаусса и Берлаге. Поэтому для улучшения качества разложений сигналов электромагнитной эмиссии предлагается включать в словарь функции с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Набор параметров таких функций дополняется еще одним параметром, k , коэффициентом затухания частоты в сигнале $f_{end} = f_0 / k$. На рис. 3 изображена модель электромагнитного сигнала, построенная с использованием комбинированного словаря, составленного из функций с постоянной частотой и функций с ЛЧМ соответственно.

Для определения словаря, обеспечивающего наилучшее качество аппроксимации, был проведен вычислительный эксперимент: на выборке, состоящей из 1000 атмосфериков, тестировались словари Гаусса, Берлаге и

комбинированные словари, составленных из функций с постоянной частотой и функций с ЛЧМ. Каждый атмосферик аппроксимировался 15 атомами, для каждой аппроксимации измерялось итоговое значение величины ERR (3). Согласно полученным данным (табл. I), для электромагнитных сигналов хорошие результаты продемонстрировали словари, составленные из импульсов с линейной частотной модуляцией. Это связано с тем, что типичный атмосферик состоит из квазипериодических затухающих колебаний с увеличивающимся во времени периодом, и во многих случаях импульс заканчивается длинным низкочастотным «хвостом».

ТАБЛИЦА I Значения ERR для различных словарей

Словарь	Количество атомов в разложении			
	1	5	10	15
Гаусса	50.15	13.08	6.17	3.61
Берлаге	47.14	12.19	5.31	2.8
Комбинированный	46.94	13.2	6.19	3.31
Гаусса с ЛЧМ	45.8	10.95	4.53	2.28
Берлаге с ЛЧМ	38.84	9.96	4.54	2.49
Комбинированный с ЛЧМ	37.65	8.9	3.6	1.77

IV. АДАПТИВНОЕ СОГЛАСОВАННОЕ ПРЕСЛЕДОВАНИЕ

Алгоритм согласованного преследования, выбранный изначально в качестве метода идентификации параметров модели, позволяет строить модели атмосфериков, обладающие достаточной точностью и высокой разреженностью. Однако у алгоритма согласованного преследования имеется несколько существенных недостатков. Во-первых, для обеспечения достаточной точности разложений требуется использование словарей больших размеров, что в свою очередь вызывает степенной рост скорости выполнения алгоритма. Во-вторых, выбор атомов осуществляется из неизменяющегося словаря, и полученные разложения отличаются «грубой» дискретизацией в пространстве параметров.

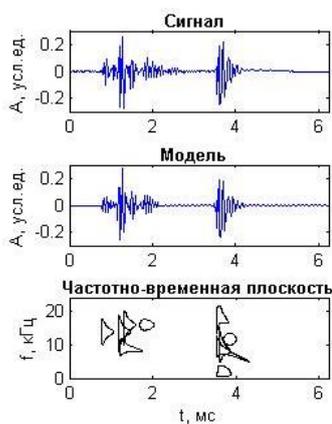


Рис. 3. Модель электромагнитного сигнала, построенная с использованием комбинированного словаря, составленного из функций с ЛЧМ

Одним из способов решения вышеперечисленных проблем в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, не требующим расширения словаря, является добавление к алгоритму процедуры уточнения в пространстве параметров. Суть процедуры уточнения 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. Метод согласованного преследования с использованием процедуры уточнения называется адаптивным согласованным преследованием (Adaptive matching pursuit, AMP).

Адаптивное согласованное преследование с использованием комбинированных словарей было протестировано на выборке из 1000 сигналов-атмосфериков. Каждый выделяемый атом из словаря уточнялся 5 раз. Результаты эксперимента, представленные в табл. II, показывают, что добавление процедуры уточнения позволило улучшить качество аппроксимации сигналов электромагнитной эмиссии.

V. ВЫВОДЫ

Описанное в статье исследование доказывает возможность применения методов разреженной аппроксимации (в частности метода согласованного преследования) в задачах анализа и моделирования импульсных сигналов электромагнитной эмиссии.

Авторами был проведен вычислительный эксперимент, посвященный выбору оптимального базиса для описания электромагнитных сигналов. Тестировались словари, составленные из функций Гаусса с ЛЧМ и без, функций

Берлаге с ЛЧМ и без, а также их комбинаций. По результатам эксперимента установлено, что из всех рассмотренных словарей наилучшую точность и разреженность моделей обеспечивает комбинированный словарь, состоящий из функций с ЛЧМ.

Также показано, что увеличение точности моделей, построенных на словарях фиксированного размера, достигается за счет использования алгоритма адаптивного согласованного преследования.

ТАБЛИЦА II ЗАВИСИМОСТЬ ERR ОТ КОЛИЧЕСТВА АТОМОВ В РАЗЛОЖЕНИИ

Алгоритм	Словарь	Количество атомов в разложении			
		1	5	10	15
MP	Комбинированный	46.94	13.2	6.19	3.31
AMP	Комбинированный	41.38	8.81	3.21	1.48
MP	Комбинированный с ЛЧМ	37.65	8.9	3.6	1.77
AMP	Комбинированный с ЛЧМ	32.96	6.78	2.35	1.04

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Вершинин Е. Ф., Пономарев Е. А. О классификации непрерывного УНЧ излучения верхней атмосферы / Земной магнетизм, полярные сияния и ультранизкочастотное излучение. Иркутск: СибИЗМИР. 1966. С. 35–43.
- [2] Дружин Г.И. Опыт прогноза камчатских землетрясений на основе наблюдений за электромагнитным ОНЧ излучением // Вулканология и сейсмология. 2002. № 6. С. 51–62.
- [3] Дружин Г.И., Марапулец Ю.В., Чернева Н.В., Исаев А.Ю., Солодчук А.А. Акустические и электромагнитные излучения перед землетрясением на Камчатке // Доклады академии наук. 2017. Т. 472. №5. С. 584-589.
- [4] Tristanov A.B., Marapulets Yu.V., Lukovenkova O.O., Kim A.A. A new approach to study of geoacoustic emission signals // Pattern Recognition and Image Analysis (Advances in Mathematical Theory and Applications). 2016. Vol. 26. No. 1. P. 34-44.
- [5] Ким А.А., Марапулец Ю.В., Тристанов А.Б. Луковенкова О.О. Методы регистрации и частотно-временного анализа сигналов геоакустической эмиссии, Владивосток: Дальнаука. 2017. 148 с.
- [6] Ким А.А., Марапулец Ю.В., Тристанов А.Б. Луковенкова О.О. Моделирование сигналов импульсной природы на базе разреженной аппроксимационной схемы, Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM'2015, том 2, 2015, с. 171-174.
- [7] Луковенкова О.О. Очистка сигналов геоакустической эмиссии от природных и техногенных шумов методом разреженной аппроксимации, Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2015. № 2(11), с. 77-81.
- [8] Луковенкова О.О. Сравнение методов разреженной аппроксимации на примере сигналов геоакустической эмиссии, Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки, №2(9), 2014, с. 59-67.