Исследование метода эмпирической модовой декомпозиции в задаче анализа сигналов акустической эмиссии

Investigation of empirical mode decomposition method in the scenario of acoustic emission signals analysis

Дюк / Diuk V.
Вячеслав Анатольевич
(v_duke@mail.ru)
доктор технических наук.
ФГБУН Институт проблем транспорта
им. Н. С. Соломенко (ИПТ) РАН,
главный научный сотрудник.
г. Санкт-Петербург

Комашинский / Komashinsky V.
Владимир Ильич
(kama54@rambler.ru)
доктор технических наук, доцент.
ИПТ РАН, заместитель директора по научной работе.
г. Санкт-Петербург

Малыгин / Malygin I.
Игорь Геннадьевич
(malygin_com@mail.ru)
доктор технических наук, профессор.
ИПТ РАН, директор.
г. Санкт-Петербург

Сенкевич / Senkevich Yu.
Юрий Игоревич
(yury.senkevich@gmail.com)
доктор технических наук, доцент.
ФГБУН Институт космофизических исследований
и распространения радиоволн ДВО РАН,
ведущий научный сотрудник.
Камчатский край, Елизовский район, с. Паратунка

Аванесов / Avanesov M.
Михаил Юрьевич
(avanesov@itain.ru)
кандидат технических наук.
ЗАО «Институт телекоммуникаций»,
научный секретарь.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: эмпирическая модовая декомпозиция – empirical mode decomposition; анализ сигналов – signal analysis; акустическая эмиссия – acoustic emission.

Приведен краткий обзор существующих методов первичного преобразования нестационарных сигналов. Отмечены недостатки традиционных методов. На примерах анализа сигналов акустической эмиссии показаны преимущества метода эмпирической модовой декомпозиции Хуанга. Полученные результаты продемонстрировали богатую палитру возможностей метода эмпирической модовой декомпозиции.

The existing methods of non-stationary signals primary conversion have been briefly reviewed. Disadvantages of the existing methods have been pointed out. Based on the examples of acoustic emission signals, the advantages of Huang empirical mode decomposition method have been shown. The results obtained have demonstrated a high potential of empirical mode decomposition method.

Вопросы поиска устойчивых маркеров сейсмических событий на основе анализа сейсмических сигналов, несмотря на свою достаточно долгую историю изучения, постоянно находятся в поле внимания исследователей. Наиболее значимые результаты здесь были получены в области предсказания землетрясений [1, 2]. При этом в основном рассматривался сверхнизкочастотный диапазон акустических колебаний, лежащий ниже 10 Гц [3, 4]. Вместе с тем в последние годы обратили на себя внимание работы по изучению сигналов более высокого диапазона колебаний (от 20 Гц до 10–16 кГц), наблюдаемых в приповерхностном слое Земли и связанных с физическими процессами пластической деформации. Такие акустические сигналы известны как сигналы акустической эмиссии (САЭ) [5].

Предварительные исследования свидетельствуют, что динамические показатели группового поведения импульсов САЭ и морфологические особенности их строения указывают на повышение вероятности возникновения сейсмического события. Было показано, что по амплитудно-частотному составу сигнала САЭ с определенной точностью можно определять масштаб

порождающего сигнал источника колебаний и оценивать расстояние от него до пункта регистрации [6, 7].

САЭ, в силу своего физического происхождения, представляют хаотическую последовательность импульсов разной амплитуды, частоты внутреннего наполнения, также вероятности их появления за эпоху наблюдения. Причем было обнаружено значительное разнообразие паттернов импульсов САЭ [8] и значительные градиенты фоновой активности. Статистические оценки параметров САЭ характеризуют рассматриваемые сигналы как нестационарные, то есть такие, у которых математическое ожидание, дисперсия и корреляционные характеристики заметно меняются во времени. Кроме того, наблюдаемые на практике САЭ воспринимаются на фоне шумовых помех, порождаемых погодными факторами и другими атмосферными явлениями, а также присутствием источников шума искусственного происхождения, которые независимо носят нестационарный характер. В результате процесс выделения полезного сигнала становится нетривиальной задачей.

Успех получения полезной информации из временных рядов (ВР) САЭ зависит от качества преобразования, позволяющего разделить его на полезную (целевую) и сопутствующую[1] составляющие. Наиболее часто в случае принятия стационарной модели ВР используются фильтры (сглаживающие, медианные, Баттерворта, Чебышева и др.) и при стремлении существенно снизить зашумленность ВР их применение приводит к значительному искажению формы полезного сигнала. Стратегия оптимальной фильтрации Колмогорова-Винера успешно функционирует, когда свойства как сигнала, так и шума заведомо известны. Для качественной фильтрации Калмана необходимо опираться на представлении о ВР как функции с линейным стохастическим распределением предсказываемых состояний. По существу, рекурсия алгоритма фильтра Калмана тянет за собой след предшествующего состояния, которая и вносит значимые искажения в преобразованный ВР. В геофизике последнее десятилетие получила распространение очистка от шумов сейсмических и произвольных периодических сигналов с помощью вейвлет-преобразования данных с последующим исключением из вейвлетного спектра шумовых уровней разложения [9, 10]. Но и в этом случае интуитивный подбор вейвлет-базисной функции является неизбежной причиной искажения формы искомого ВР.

Все перечисленные выше методы анализа ВР имеют общий серьезный недостаток, а именно, качество получаемых результатов анализа жестко зависит от правильного выбора начальных параметров каждого конкретного метода, таких как подбор границ и крутизны фронтов фильтра, формы его АЧХ в полосе пропускания и вне ее, выбора базисных функций спектрального разложения, формы применяемого вейвлета, размера окна, шага масштабирования, задания функции окна и т. д. Иначе говоря, возникает необходимость использовать для каждого конкретного исследования априорную информацию об анализируемом ВР. Для нестационарных природных сигналов, к которым в частности относятся и САЭ, такая информация, как правило, отсутствует.

В этом смысле несомненный интерес представляют методы, основанные на эмпирической модовой декомпозиции (ЭМД), предложенной в 1998 г. Н. Хуангом [11]. В России наиболее известны применения метода ЭМД для очистки медленно меняющихся геофизических сигналов от фоновых помех [12]. Метод ЭМД отличается тем, что не использует априорный базис и не требует осуществлять подбор внутренних параметров преобразования. Использование ЭМД для выделения импульсов САЭ является предметом настоящего исследования.

Задача исследования формулируется как выделение шаблонов информационно значимых морфологических форм импульсов САЭ. Получение таких шаблонов импульсов САЭ требуется не только для построения оптимальных фильтров, но и для создания реестра морфологического многообразия форм для проведения дальнейших углубленных исследований по поиску связей между такими формами и состояниями среды их порождающей.

Метод ЭМД основан на процедуре определения огибающей ВР с последующим итеративным вычислением огибающей нового ВР, в качестве которого используется огибающая ВР, полученная на предыдущем этапе вычислений. Совокупность получаемых огибающих ВР принимается за собственный неортогональный базис. Манипуляции с ВР САЭ основаны на следующей аддитивной модели:

$$u(t) = \sum_{i=1}^{n} c_i(t) + r_n(t),$$

где временной ряд $u(t)$ представлен смесью определенного числа мод $c(t)$ и остаточного ряда $r_n(t)$. Каждая из этих мод принимается как базисная функция. Причем каждой из мод можно приписать некоторый реальный физический процесс, составляющий анализируемый ВР. Получаемые моды необязательно ортогональны друг другу и отражают особенности исходного ВР на всех его локальных участках. Метод ЭМД однозначным образом разбивает любой временной ряд $u(t)$ длины N на компоненты, называемые характеристическими модовыми функциями (*Intrinsic Mode Functions – IMF*). Получение мод достигается применением следующего базового алгоритма [13]:

[1] Здесь намеренно говорится о сопутствующей составляющей не как о помехе, поскольку она сама по себе представляет предмет отдельного исследования.

1. Поиск всех локальных точек экстремума для данного ВР $u(t)$.

2. Вычисление с помощью сплайнов интерполяции двух огибающих кривых, проходящих, соответственно, через максимумы и минимумы анализируемого ряда. Обозначим верхнюю огибающую кривую (проходящую через максимумы) – U, нижнюю огибающую кривую (проходящую через минимумы) – L.

3. Вычисление среднего значения верхней и нижней огибающих

$$m = \frac{U + L}{2}.$$

4. Получение остатка вычитанием

$$r = u(t) - m.$$

5. Проверка критерия отсеивания (**sifting process**) и, при его невыполнении, применение процедур 1–4 для остатка ВР $u(t) = r$.

6. Полученный после отсеивания остаток r принимается за найденную компоненту $c_i(t) = r$, где i – номер компоненты или число пройденных циклов алгоритма EMD.

7. Вычитание из исходного ВР $u(t)$ найденной компоненты $c(t)$. Полученный остаток становится новым ВР для декомпозиции

$$u_i(t) = u(t) - c_i(t).$$

8. Проверка, является ли новый ВР монотонной функцией или удовлетворяет определенным заданным условиям. При положительных результатах проверки, декомпозиция завершается. Иначе – полученный ВР используется в качестве исходного, весь алгоритм декомпозиции повторяется уже для него. ВР, полученный на последнем шаге данного алгоритма, является остаточной компонентой $r_n(t)$. В связи с тем, что сама процедура отсеивания остатка должна быть конечной, Хуанг предложил использовать для этого так называемый остановочный критерий (*stoppage criterion*). На практике многие исследователи ограничиваются более простым правилом остановки алгоритма. Десяти и даже менее итераций хватает для получения компонент со свойствами, близкими к характеристическим модовым функциям IMF [10].

Для начальной проверки работоспособности разработанной компьютерной программы был использован тестовый сигнал, представленный суммой синусоидальных сигналов с относительными некратными частотами f_1=125, f_2=73, f_3=37, f_1=14, частотой дискретизации 4096 и длиной выборки в 4096 отсчетов.

Для эффективной декомпозиции этого искусственного временного ряда оказалось достаточно вычислить четыре моды – они соответствуют просуммированным синусоидальным сигналам. Пятая мода характеризуется малым значением дисперсии – 0,045 и поэтому может быть исключена.

На следующем этапе проверки программы метода ЭМД генерировались импульсные сигналы, по морфо-

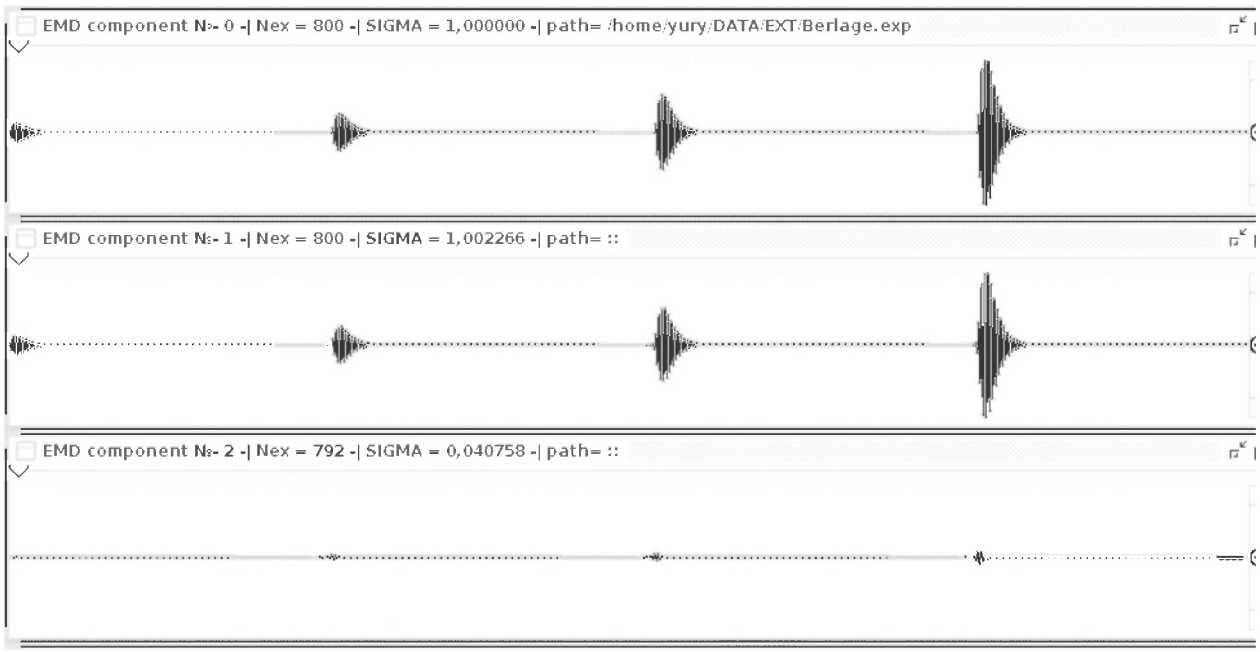

Рис. 1. Результаты тестирования компьютерной программы, реализующей метод ЭМД (описание в тексте)

логической структуре близкие к реальным импульсам, составляющим САЭ. Эти сигналы описываются функциями Габора и Берлаге [14,15]. В нашем эксперименте были использованы импульсы с законом модуляции Берлаге.

$$b(t) = A \cdot t^{\alpha} \cdot e^{-\beta t} \cdot \sin(2\pi f t).$$

Для наглядности амплитуда каждого последующего импульса увеличивалась вдвое. Остальные параметры следующие: амплитуда $A = (1, 2, 3, 4)$, частота модуляции – $f = 0.1$, коэффициенты скорости нарастания и спада $\alpha = 1.2$, $\beta = 0.05$, длительность ВР 0– $T = 1000$.

На рис. 1 представлены результаты применения ЭМД для исходного ВР, который отображен в верхнем окне компьютерной программы. В окнах ниже видно, что уже первая мода незашумленного сигнала в точности повторяет исходную импульсную последовательность, а остальные моды (отображена только вторая мода) несут ничтожно малую энергию и являются следствием выбранной функции сплайновой аппроксимации.

Следующая часть нашего экспериментального исследования заключалась в оценке качества восстановления серии искусственных импульсных сигналов Берлаге при зашумлении исходного ВР. В качестве аддитивного шума, накладываемого на исходный ВР, был использован сигнал генератора случайных чисел математической библиотеки среды программирования Eclipse (*java.util.Random. Autor Frank Yellin. Ver.*1.0). Параметры сигнала и шума (помехи) представлены в табл. 1. Расчет значений отношений сигнал-шум вычислялся по стандартной формуле:

$$SN(dB) = 20\lg(\sigma_s / \sigma_n).$$

где σ_s и σ_n – среднеквадратичное отклонение амплитуды сигнала и шума соответственно.

Проведенное компьютерное моделирование показало, что структура паттерна исходных импульсных сигналов Берлаге хорошо восстанавливается вплоть до отношения сигнал-шум –6 dB. Метод ЭМД позволяет успешно выделять полезный импульсный сигнал из шума с нормальной функцией распределения вероятности. Для этого достаточно выполнить итеративный алгоритм всего лишь до уровня третьей моды. Энергия четвертой и последующих мод составляет менее 2% от общей энергии искусственного сигнала.

В ходе исследования проводилась сравнительная оценка результатов применения метода ЭМД и других процедур фильтрации искусственных сигналов в интересах выделения и восстановления структуры их паттернов. Эквивалентом искомой структуры паттернов, как и ранее, принимались результаты морфологического изучения сигналов САЭ, которые были получены в лаборатории акустических исследований ИКИР [5]. На рис. 2 приведена иллюстрация одного из результатов применения ЭМД (показаны три первые моды) и процедуры скользящего весового сглаживания косинусным окном с размерностью 8, 32 и 64 отсчета соответственно. Верхнее окно (1) и верхнее окно (2) программы на рис. 2 демонстрируют результат смешивания импульсов Берлаге и шума с отношением –6 dB. Очевидно, что увеличение размера окна усреднения не приводит к восстановлению структуры паттерна исходных импульсов Берлаге (часть 2 рис. 2) в отличие от второй моды части 1 рис. 2. При этом применение ЭМД позволяет заметно увеличить отношение сигнал-шум.

Заключительный этап исследования включал применение метода ЭМД к реальным сигналам САЭ. Для тестирования отбирались фрагменты измерений, на которых САЭ проявляли различные свойства – редкие одиночные импульсы САЭ, группа импульсов различной амплитуды, импульсы, искусственного происхождения, вызванные пролетом вертолета. Полученные результаты продемонстрировали богатую палитру возможностей метода ЭМД. Проведенные эксперименты по использованию метода ЭМД для обработки и анализа САЭ подтвердили ранее высказанные идеи и гипотезы о структурном многообразии форм, составляющих эти сигналы.

Заключение

В результате проведенного исследования получены следующие результаты:

Таблица 1.

Параметры аддитивной смеси сигнала и шума и их отношения

Номер эксперимента	(1)	(2)	(3)	(4)
Мат. ожидание сигнала	–0.012	–0.006	–0.003	–0.001
СКО сигнала	57.661	28.637	14.241	7.217
Мат. ожидание помехи	0.113	–0.351	–0.164	0.268
СКО помехи	28.648	28.507	28.632	29.003
SN(*dB*)	6.078	0.039	–6.066	–12.081

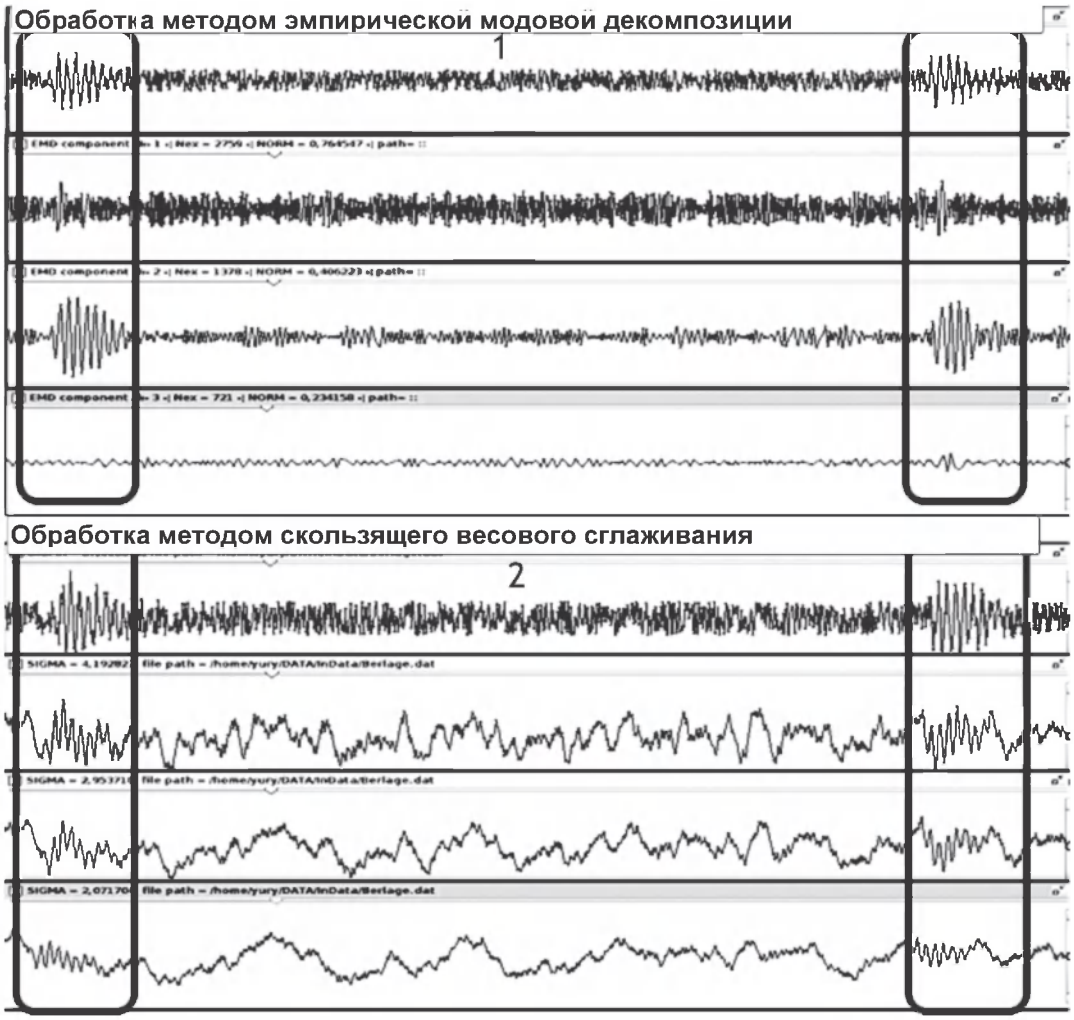

Рис. 2. Отображение результата сравнения применения ЭМД и процедуры взвешенного усреднения к аддитивной смеси пары импульсов Берлаге и шума

1. Произведён краткий обзор существующих методов первичного преобразования временных рядов применительно к нестационарным сигналам, указывающий на серьезные искажения, которые вносят традиционные методы очистки сигналов от шумов в структуру паттернов искомых сигналов, то есть происходит необратимое искажение тонкой структуры искомых сигналов.

2. Проанализирована принципиальная возможность применения ЭМД для выделения и восстановления импульсных сигналов САЭ.

3. Численным экспериментом показано положительное качественное отличие результатов применения алгоритма очистки сигналов от шумов на базе неполной декомпозиции Хуанга. Метод ЭМД позволяет успешно выделять полезный сигнал из шума и восстанавливать структуру импульсов САЭ при соотношении сигнал-шум до −6 dB.

4. Восстановление структуры паттернов, составляющих САЭ, открывает перспективу более глубокого исследования значимости группового поведения импульсов определенных морфологических форм и физических явлений, связанных с пластическими процессами, происходящими в Земной коре.

Литература

1. Федотов, С. А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном прогнозе / С.А. Федотов // Сейсмическое районирование в СССР. – М.: Наука, 1968. – С. 121–150.

2. Соболев, Г. А. Физика сейсмического землетрясения и прогноз землетрясения / Г.А. Соболев // В сб. Геофизика на рубеже веков. – М.: Изд. ОИФЗ РАН, 2004. – С. 70–79.

3. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. / В.Н. Чебров [и др.] // Вулканология сейсмология. – 2013. – № 1. – С. 18–40.

4. Рикитаке, Т. Предсказание землетрясения / Т. Рикитаке. – М.: Мир, 1979. – 388 с.

5. Марапулец, Ю. В. Мезомасштабная акустическая эмиссия / Ю.В. Марапулец, Б.М. Шевцов. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – 126 с.

6. Марапулец, Ю. В. Изменение направленности геоакустического излучения на станции «Микижа» в связи с землетрясениями на Камчатке / Ю.В. Марапулец, А.А. Солодчук, А.О. Щербина // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2016. – № 4 (15). – С. 74–79.

7. Ларионов, И. А. Отклик геоакустической эмиссии на процесс подготовки землетрясений в разных пунктах наблюдений / И.А. Ларионов, А.О. Щербина, М.А. Мищенко // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. – 2005. – № 2 (6). – С. 108–115.

8. Применение разреженной аппроксимации и методов кластеризации для описания структуры временных рядов акустической эмиссии / А.А. Афанасьева [и др.] // Цифровая обработка сигналов. – 2013. – № 2. – С. 30–34.

9. Соловьев, И. С. Метод выделения короткопериодных флуктуаций в геомагнитном сигнале на основе вейвлет-преобразования / И.С. Соловьев // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2011. – № 7. – С. 35–40.

10. Мандрикова, О. В. Моделирование и анализ параметров ионосферы на основе совмещения вейвлет-преобразования и авторегрессионных моделей / О.В. Мандрикова, Н.В. Глушкова, И.В. Живетьев // Геомагнетизм и аэрономия. – 2014. – Т. 54, № 5. – С. 638–645.

11. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis / N.E. Huang [et al.] // Proc. R. SOC. London, Ser. A. – 1998. – No. 454. – P. 903–995.

12. Давыдов, В. А. Очистка сигналов от шумов методом эмпирической модовой декомпозиции в диалоговом режиме. [Электронный ресурс] / В.А. Давыдов, А.В. Давыдов // Персональный сайт д-ра геол.-минерал. наук, проф. А. В. Давыдова. – Режим доступа: www.geoin.org/hht/app/hht6.doc, свободный. – Загл. с экрана.

13. Сафиуллин, Т. Н. Разработка методики анализа временных рядов с помощью преобразования Хуанга-Гильберта: дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 / Т.Н. Сафиуллин. – Новосибирск, 2015. – 193 с.

14. Применение разреженной аппроксимации и методов кластеризации для описания структуры временных рядов акустической эмиссии / А.А. Афанасьева [и др.] // Цифровая обработка сигналов. – 2013. – № 2. – С. 30–34.

15. Марапулец, Ю. В. Анализ структуры сигналов акустической эмиссии звукового диапазона методом разреженной аппроксимации / Ю.В. Марапулец, А.Б. Тристанов, Б.М. Шевцов // Акустический журнал. – 2014. – Т. 60, № 4. – С. 398–406.