

Клионский Дмитрий Михайлович

**МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ СОБЫТИЙ
В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛАХ
НА ОСНОВЕ МУЛЬТИМАСШТАБНЫХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ
МЕТОДОВ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ**

05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) на кафедре математического обеспечения и применения ЭВМ (МО ЭВМ)

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Геппенер Владимир Владимирович

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, доцент, Дегтярев Александр Борисович, Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ), профессор кафедры компьютерного моделирования и многопроцессорных систем

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Егоров Владимир Викторович, ОАО «Российский институт мощного радиостроения» (ОАО «РИМР»), ведущий научный сотрудник

Ведущая организация – Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича)

Защита состоится «_____» _____ 2012 г. в _____ на заседании диссертационного совета Д 212.238.01 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Автореферат разослан «_____» _____ 2012 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Щеголева Н.Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время продолжается интенсивное развитие направления обработки и анализа измерительных сигналов, отражающих состояние различных сложных динамических объектов (СДО) и передающихся по большому числу каналов связи. СДО, как правило, характеризуются нестационарным поведением, и данным, описывающим функционирование таких объектов, зачастую свойственна большая размерность в силу возможности одновременной регистрации нескольких сигналов различной природы.

Одной из важнейших задач, решаемых при обработке измерительных сигналов от СДО, является задача контроля состояния объектов, в частности, автоматическое выявление *аномальных событий*. Такие события, происходящие на самом объекте, находят отражение в самих измерительных сигналах, а именно в изменении их свойств и характеристик. В данной работе рассматривается задача выявления аномальных событий в *телеметрических измерениях*, характеризующих состояние СДО во время испытаний и эксплуатации.

В силу сложности применяемых на практике объектов и необходимости контроля большого числа параметров, анализ работы СДО на предмет выявления аномальных событий наиболее часто осуществляется на основе сигналов, регистрируемых установленными на объекте автономными датчиками. Соответственно вся дальнейшая работа проводится именно с поступившими сигналами в режиме *послесансовой обработки*. Особенно актуальными являются методы обработки, ориентированные на сигналы, представляющие собой аддитивный набор компонент различной природы - *многокомпонентные измерительные сигналы* (МИС).

При анализе и обработке МИС необходимо решать актуальные задачи, связанные с нестационарной природой протекающих на объектах процессов, зачастую колоссальным объемом исследуемых выборок и *сложной помеховой обстановкой* (наличием большого числа различных возмущающих факторов - шумов, помех, выбросов и пр.). Высокие требования к точности и достоверности результатов стали стимулом к развитию математических средств обработки таких процессов на основе использования современных достижений в целом ряде научных областей и, главным образом, цифровой обработки сигналов (частотно-временного анализа, теории вейвлетов, адаптивных разложений на основе апостериорных базисов и др.) и численных методов линейной алгебры, математической статистики и анализа временных рядов.

Обработка МИС, направленная на выявление аномальных событий в реальных условиях работы объектов, требует наличия специальной группы методов, позволяющих последовательно выполнить классификацию, предварительную обработку (очистку от шума, выделение тренда, отбраковку выбросов) и структурный анализ (мультимасштабный, спектральный и частотно-временной анализ) сигналов.

Основной проблемой в области работы с МИС является отсутствие единой группы методов обработки и анализа, учитывающих вышеприведенные требования, а также *адаптивных* методов, учитывающих индивидуальные особенности конкретных сигналов. Обработка и анализ осуществляются, как правило, с использованием методов, которые в силу своей природы не способны учитывать индивидуальные (в т.ч. локальные) особенности конкретных сигналов. Кроме того, не всегда принимается во внимание наличие ошибок в МИС (недостоверных значений), неравнодискретность сигналов и их колоссальный объем (до нескольких миллионов отсчетов). Предлагаемая

в данной работе **методика** обработки МИС с целью выявления аномальных событий на объекте имеет следующие отличительные признаки:

1) Используется процедура предварительной классификации МИС, что позволяет корректно выбирать методы обработки таких сигналов с целью получения достоверных результатов при выявлении аномальных событий.

2) Разработанные методы ориентированы на обработку следующих типов сигналов: стационарных (*установившихся вибраций*), нестационарных (*переходных и ударных процессов*), а также комбинированных (имеющих в своем составе и те и другие процессы, чередующиеся друг с другом) сигналов в силу возможности выбора методов обработки после проведенной классификации.

3) Для исследования внутренней структуры сигналов с целью дальнейшего выявления аномальных событий используются специальные *адаптивные* методы анализа. Среди таких методов используются как уже известные методы, так и те, что были модифицированы в рамках данной работы:

- *Декомпозиция на эмпирические моды (ДЭМ)*. Мультимасштабный метод, позволяющий сформировать конечный набор компонент (апостериорный базис) путем их последовательного извлечения непосредственно из самого исходного сигнала;

- *Спектральный анализ* с высоким разрешением на основе совмещения непараметрических методов, основанных на преобразовании Фурье, процедуры сглаживания с помощью классического дискретного вейвлет-преобразования и специальной пороговой процедуры;

- *Гармоническое вейвлет-преобразование*. Мультимасштабный метод, предназначенный для задач предварительной обработки (очистки от шума) и автоматического выявления в сигналах временных границ определенных типов процессов, что может свидетельствовать о моментах возникновения аномальных событий;

- *Частотно-временной анализ на основе ДЭМ*. Адаптивный метод, применяемый для выявления скрытых модуляций, идентификации областей концентрации энергии и извлечения информации о начале и окончании различных процессов в сигнале.

Целью диссертационной работы является разработка методов и программных средств, предназначенных для выявления аномальных событий в работе сложных динамических объектов на основе анализа поступающих с них многокомпонентных измерительных сигналов, находящихся в условиях сложной помеховой обстановки.

В соответствии с указанной целью в работе сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Выполнен обзор основных методов, алгоритмов и технологий обработки МИС, направленных на выявление аномальных событий, сформулированы их недостатки и пути к их частичному или полному устранению.

2. Разработаны адаптивные мультимасштабные методы обработки МИС на основе ДЭМ, частотно-временного анализа и гармонического вейвлет-преобразования с целью выявления аномальных событий в МИС, характеризующих работу СДО.

3. Разработан адаптивный метод спектрального анализа МИС с высоким разрешением с целью выявления аномальных событий на основе совмещения непараметрических методов и классического дискретного вейвлет-преобразования.

4. Разработана методика анализа МИС, характеризующих состояние СДО, с целью выявления аномальных событий.

5. Разработано и введено в эксплуатацию программное обеспечение, реализующее разработанные методы выявления аномальных событий в МИС и включающее модули классификации, предварительной обработки, структурного анализа на основе

мультимасштабных и спектральных методов, а также подсистему моделирования сигналов на основе представленных в работе моделей.

6. Проведено экспериментальное исследование разработанных методов на модельных и реальных МИС и приведена оценка эффективности их применения.

Объектом исследования диссертационной работы являются многокомпонентные измерительные сигналы, поступающие от сложных динамических объектов и находящиеся в условиях сложной помеховой обстановки.

Предметом изучения являются методы выявления аномальных событий в многокомпонентных измерительных сигналах, поступающих от сложных динамических объектов и находящихся в условиях сложной помеховой обстановки.

Методы исследования. Теоретическая часть работы выполнена на основе методов математической статистики и цифровой обработки сигналов (методы вейвлет-анализа, частотно-временного анализа, спектрального анализа). В экспериментальной части применяются математическое моделирование, численные методы и методы создания программных средств. Для выполнения экспериментальной части создан комплекс программ под названием “Программный комплекс анализа и обработки измерительной информации на основе мультимасштабных и частотно-временных методов”.

Научная новизна работы представлена следующими положениями:

1. Адаптивные мультимасштабные методы анализа многокомпонентных измерительных сигналов с целью выявления аномальных событий, основанные на декомпозиции на эмпирические моды и гармоническом вейвлет-преобразовании.

2. Многокомпонентная модель представления измерительных сигналов, параметры которой определяются на основе апостериорного базиса с автоматическим выбором компонент, полученных в результате декомпозиции на эмпирические моды.

3. Адаптивный метод спектрального анализа многокомпонентных измерительных сигналов с высоким разрешением, направленный на выявление аномальных событий и сочетающий использование непараметрических методов и классического дискретного вейвлет-преобразования.

4. Адаптивный метод частотно-временного анализа многокомпонентных измерительных сигналов на основе декомпозиции на эмпирические моды с целью выявления аномальных событий.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования на практике предложенных методов и моделей, а также разработанного комплекса программ в задачах анализа и обработки многокомпонентных измерительных сигналов с целью выявления аномальных событий. Комплекс программ включает модули структурного анализа на основе адаптивных мультимасштабных и спектральных методов высокого разрешения. Кроме того, на практике может эффективно использоваться предложенная в работе методика анализа многокомпонентных измерительных сигналов, характеризующих состояние сложных динамических объектов.

Результаты и положения, выносимые на защиту:

1. Адаптивные мультимасштабные методы выявления аномальных событий в многокомпонентных измерительных сигналах на основе декомпозиции на эмпирические моды и гармонического вейвлет-преобразования.

2. Многокомпонентная модель измерительных сигналов, параметры которой определяются на основе апостериорного базиса с автоматическим выбором компонент, полученных в результате декомпозиции на эмпирические моды.

3. Метод выявления аномальных событий в многокомпонентных измерительных сигналах на основе спектрального анализа с высоким разрешением путем совме-

стного использования непараметрических методов и классического дискретного вейвлет-преобразования.

4. Адаптивный метод частотно-временного анализа многокомпонентных измерительных сигналов, направленный на выявление аномальных событий.

5. Методика и комплекс программ для анализа многокомпонентных измерительных сигналов, поступающих от сложных динамических объектов, с целью выявления аномальных событий.

Внедрение результатов. Результаты работы использовались при проведении НИОКР в рамках Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы” в 2010-2012 годах (3 НИОКР), в результате которых были разработаны 3 комплекса программ. Результаты работы использовались в рамках работы научно-педагогической школы (НПШ) на базе кафедры МО ЭВМ СПбГЭТУ “ЛЭТИ” под руководством д.т.н., проф. Геппенера В.В. Результаты работы также использовались в рамках проведения 2-х НИР в “Научно-инженерном центре Санкт-Петербургского электротехнического университета”.

Работа поддержана программой фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере “Участник молодежного движения Научно-Инновационного Конкурса” (2008-2010 года), специальными стипендиями президента РФ (2010-2011 годы) и правительства РФ (2011-2012 годы), а также в рамках конкурсов научных достижений аспирантов СПбГЭТУ “ЛЭТИ” в 2009, 2010 и 2011 годах.

Разработанные программные средства и методические материалы использовались в учебном процессе при проведении лабораторных работ и практических занятий по курсам «Цифровая обработка сигналов» и «Распознавание речевых сигналов» для студентов по направлениям подготовки “Информатика и вычислительная техника” и “Прикладная математика и информатика” в СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, а также при проведении лабораторных работ по дисциплине “Компьютерные технологии в науке и образовании” для магистров по направлению “Телекоммуникации” в СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

Апробация результатов исследования. Основные положения и результаты работы изложены в следующих документах:

1. Отчет о выполнении научно-исследовательской работы «Проведение анализа и обработки телеметрических и биомедицинских данных на основе технологии Гильберта-Гуанга», № У-2008-3/2 «Био», государственный контракт № 6471p/8711, 2009 г.

2. Отчет о выполнении научно-исследовательской работы «Проведение анализа и обработки телеметрических данных на основе современных достижений в области спектрального, частотно-временного и интеллектуального анализа данных», № У-2010-1/2 «Био», государственный контракт №7672p/11206, 2010 г.

3. Отчет о выполнении научно-исследовательской работы «Разработка технологии комплексного анализа телеметрических данных, характеризующих состояние сложных динамических объектов», № гос. контракта 2010-1.3.2-111-017, 2011 г.

4. Отчет о выполнении научно-исследовательской работы «Разработка адаптивных подходов к комплексной обработке и выявлению аномалий в телеметрических данных, включающей предварительную обработку, структурный и интеллектуальный анализ данных», № гос. задания 1.12.11, 2011 г.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на ряде конференций, в число которых входят следующие:

1. 7-й Открытый Российско-Немецкий семинар по распознаванию образов и анализу изображений (OGRW-2007), г. Эттлинген, Германия, 2007 г.

2. 9-я Международная конференция “Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии” (PRIA-2007), г. Йошкар-Ола, 2007 г.
 3. 3-я, 4-я Всероссийская научная конференция "Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB", г. Санкт-Петербург, Харьков, 2007, 2011.
 4. Конкурс-конференция студентов, аспирантов и молодых ученых Северо-запада “Технология Microsoft в теории и практике программирования”, г. Санкт-Петербург, 2007, 2008 г.
 5. 62-я, 63-я, 64-я, 65-я, 66-я Научно-техническая конференция, посвященная дню Радио, г. Санкт-Петербург, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011 г.
 6. 10-я, 11-я, 12-я, 13-я Международная конференция и выставка “Цифровая обработка сигналов и ее применение” (DSPA), г. Москва, 2008, 2009, 2010, 2011 г.
 7. 11-я Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2008), г. Санкт-Петербург, 2008 г.
 8. 1-я Международная конференция “Компьютерные науки и технологии”, г. Белгород, 2009 г.
 9. 3-й Всероссийский форум студентов, аспирантов и молодых ученых “Наука и инновации в технических университетах”, г. Санкт-Петербург, 2009 г.
 10. Итоговый семинар по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга, г. Санкт-Петербург, 2009 г.
 11. 5-я Международная конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений», с. Паратунка, Камчатский край, 2010 г.
 12. 10-я международная конференция “Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии” (PRIA-2010), г. Санкт-Петербург, 2010 г.
- Выступления на международной конференции “Цифровая обработка сигналов и ее применение” (DSPA) в 2008, 2010 и 2011 годах отмечены дипломами за лучшие доклады. Диссертационная работа одобрена на семинаре по современным технологиям обработки данных в Институте Аналитического Приборостроения Российской Академии Наук (г. Санкт-Петербург, 2012 год).

Публикации. По теме диссертации опубликована 51 работа, включая 12 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией, 3 статьи в других изданиях, 2 монографии (в соавторстве), 33 доклада в материалах конференций. Комплекс программ “Программный комплекс анализа и обработки измерительной информации на основе мультимасштабных и частотно-временных методов” зарегистрирован в качестве программного средства (свидетельство о регистрации № 2012610110 от 11.01.2012).

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения и библиографии, включающей 122 наименования. Основная часть работы изложена на 165 страницах машинописного текста. Работа содержит 64 рисунка, 15 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, определяются цель и задачи исследования, указываются объект, предмет и методы исследования, формулируются научная новизна, а также результаты и положения, выносимые на защиту. Приводится информация, подтверждающая практическую ценность полученных результатов, их внедрение и апробацию.

Первая глава посвящена анализу современного состояния, тенденций и перспектив развития методов обработки и анализа многокомпонентных измерительных сигнала-

лов с целью выявления аномальных событий. В начале главы приводятся определения базовых понятий, таких как аномальное событие, многокомпонентный измерительный сигнал (МИС), мультимасштабный метод, адаптивный метод, спектральный метод высокого разрешения, сложный динамический объект (СДО). В данной главе содержится обзор основных существующих методов анализа и обработки МИС на предмет выявления аномальных событий, включая преобразование Фурье, вейвлет-преобразование, частотно-временной анализ и технологию на основе Data Mining.

В данной главе значительное внимание уделено основным проблемам существующих методов анализа МИС с целью выявления аномальных событий. Многие методы дают неудовлетворительные результаты при работе в *сложной помеховой обстановке*, т.е. при наличии в исходных данных возмущающих факторов таких, как шумы, выбросы и т.д. В отдельных случаях даже вейвлет-преобразование, предназначенное для таких случаев, не всегда оказывается эффективным в вопросах выявления аномальных событий в силу использования *априорного* базиса, не учитывающего индивидуальные особенности конкретных сигналов. На практике возникает необходимость обрабатывать стационарные, нестационарные и комбинированные сигналы (включающие оба типа сигналов), что требует наличия отдельных методов для каждой из этих групп. Не все методы могут эффективно работать в таких условиях. Это, прежде всего, касается преобразования Фурье, ориентированного на работу со стационарными сигналами, поскольку при этом теряется информация о времени, т.е., например, невозможно определить моменты начала и окончания различных процессов в сигнале. Также наблюдается рассеивание энергии в частотной области, что не позволяет четко выделить основные диапазоны ее концентрации.

При выявлении аномальных событий в МИС важно получить разложение на набор компонент с целью понимания внутренней структуры сигнала. Вместе с тем, например, частотно-временной анализ не предоставляет возможности получения *мультимасштабного* разложения. Другие методы, наоборот, предназначены для получения разложения МИС, но не могут быть использованы для анализа в частотно-временной области.

Применяемые на практике методы спектрального анализа (в первую очередь, непараметрические) имеют ряд недостатков. К ним относятся низкое частотное разрешение, высокая дисперсия спектральных оценок и смещение спектральных пиков. В данной работе предлагается новый метод спектрального анализа МИС, позволяющий более точно выявлять аномальные события в сигналах путем определения отклонения оценок спектральной плотности мощности (СПМ) от заранее известной нормы.

Подход на основе технологии Data Mining является довольно успешным в задачах выявления аномальных событий, поскольку он ориентирован на работу с *моделями* исходных данных, которые позволяют эффективно сравнивать результаты на реальных сигналах с заранее известными шаблонами и тем самым выявлять отклонения. Вместе с тем в классической постановке методы Data Mining практически не используют сведения о спектральном составе МИС, а также о структуре и особенностях входящих в сигнал компонент, что не позволяет в полной мере использовать всю информацию, содержащуюся в сигнале. Довольно часто аномальные события могут быть выявлены лишь посредством проведения мультимасштабного или спектрального анализа.

В работе рассматриваются дискретные сигналы $s(k)$ ($k = 1, \dots, N$ - дискретное нормированное время), принимающие фиксированные равнодискретные значения. Обобщенная **многокомпонентная модель измерительного сигнала** представляется в виде

$$s(k) = \sum_{i \in I} g_i c_i(k), \quad (1)$$

где g_i - постоянные вещественные коэффициенты, $c_i(k)$ - компоненты модели, I - индексное множество, формируемое по результатам обработки и анализа сигнала.

Во время исследований были проанализированы и изучены три основных типа процессов: вибрационные, ударные и переходные. Данные процессы описывают широкий набор измерений, встречающихся при анализе работы СДО. Далее, в соответствии с обобщенной многокомпонентной моделью (1), рассмотрим модели отдельных процессов, анализ которых подробно рассмотрен в диссертационной работе.

Вибрационный процесс задается с помощью АРСС-модели (авторегрессии скользящего среднего) с внешним (сторонним) шумом наблюдения:

$$s_{\text{вибр}}(k) = -\sum_{i=1}^p a_i s_{\text{вибр}}(k-i) + \sum_{j=0}^q b_j e(k-j) + n(k), \quad (2)$$

где p и q - порядки АР и СС частей соответственно, a_i - коэффициенты АР-части модели, b_j - коэффициенты СС-части модели, $e(k)$ - возбуждающий белый шум, $n(k)$ - внешний шум наблюдения, вызванный суммарным воздействием различных факторов и имеющий распределение, обычно аппроксимируемое нормальным законом.

Модель переходного процесса представляет собой мультигармонический сигнал с постоянными амплитудами A_p и частотами гармоник ω_p на фоне шума и тренда:

$$s_{\text{перех}}(k) = \sum_{p=1}^q A_p \sin(\omega_p k) + n(k) + u(k), \quad (3)$$

где q - число гармоник, $n(k)$ - высокочастотная шумовая компонента (аппроксимируемая нормальным белым шумом), $u(k)$ - трендовая компонента, $A_p, \omega_p = \text{const}$.

Модель ударного процесса представляется в виде суммы амплитудно-частотно-модулированных гармоник:

$$s_{\text{удар}}(k) = \sum_{p=1}^q r_p(k) \sin(\omega_p(k) \cdot k) + n(k) + u(k), \quad (4)$$

где q - число слагаемых ряда (4), $r_p(k)$ - затухающая функция, описывающая закон амплитудной модуляции, $\omega_p(k)$ - функция, описывающая закон частотной модуляции, $n(k)$ - высокочастотная шумовая компонента (нормальный белый шум), $u(k)$ - трендовая компонента. В частности, функция $r(k)$ с высокой точностью аппроксимируется зависимостью вида $r(k) = C e^{-\alpha k}$, где C - константа, α - коэффициент затухания.

Под **аномальным событием** в сигнале в дальнейшем будем понимать отклонение характеристик сигнала от нормы. "Норма" задается с помощью специальных шаблонов, известных экспертам, анализирующим результаты и принимающим решения о качестве функционирования СДО. К числу анализируемых характеристик относятся СПМ сигнала, его частотно-временной образ, а также вейвлет-коэффициенты сигнала и компоненты, полученные в результате разложения по некоторому базису. В работе рассмотрены следующие **модели сигналов с аномальными событиями**:

$$s_{\text{аномал}}(k) = \sum_{p=1}^q (r_p(k) + \eta(k)) \sin((\omega_p(k) + \xi(k)) \cdot k) + n(k) + u(k), \quad (5)$$

где $\eta(k)$ и $\xi(k)$ - нормально распределенные случайные величины с нулевым средним и неизвестными дисперсиями. Аномальным событием (*аномальным событием первого типа*) в данном случае считаются флуктуации амплитуды и частоты сигнала, превы-

вой обработки для удаления шума из сигнала и показана эффективность ее использования. Кроме того, также представлены методы выделения тренда, отражающего глобальное поведение исходного сигнала.

В данной главе предложена модификация метода ДЭМ с *параболической* интерполяцией огибающих, которая используется для выявления аномальных событий первого типа. Данная модификация направлена на устранение как избыточности разложения, так и появления ложных неинформативных компонент за счет уточненного определения местоположения экстремумов функций на всех этапах ДЭМ.

С целью выявления аномальных событий в сигналах в данной работе предлагается новый метод, основанный на разбиении ЭМ на две большие группы:

- 1) *основные* ЭМ (включая *шумовые* и *ЭМ-шаблоны*);
- 2) *трендовые* ЭМ (включая *компенсирующие* и *истинные трендовые*).

Основные ЭМ всегда имеют четкий физический смысл и отражают внутреннюю структуру и особенности каждого конкретного сигнала. К их числу относятся шумовые ЭМ и ЭМ-шаблоны. Появление в разложении первых объясняется наличием в исходном сигнале шума, а вторые связаны непосредственно с самим полезным сигналом. Трендовые ЭМ характеризуют тренд, и среди них выделяют *истинные трендовые* ЭМ, описывающие динамику среднего значения, и *компенсирующие* ЭМ, возникающие и при отсутствии тренда.



Рисунок 1. Схема разложения сигнала по методу ДЭМ

В данной работе предложена *автоматическая классификация* всех ЭМ с целью выявления аномальных событий. Вначале модель МИС записывается в виде

$$s = \mathbf{x} \boldsymbol{\beta} + e, \quad (9)$$

где s – исходный сигнал; \mathbf{x} – матрица регрессоров; $\boldsymbol{\beta}$ – вектор неизвестных весовых коэффициентов; e – белый гауссовский шум. Данное выражение соответствует модели (1). Используя свойство полноты разложения на основе ДЭМ, можно записать следующее:

$$s(k) = \sum_{i=1}^{M-1} c_i(k) + r_M(k), \quad k = \overline{1, N} \quad (10)$$

где r_M – остаток, M – общее число компонент. Из суммы можно выделить 1-ю ЭМ в качестве приближения шума в силу ее ярко выраженного высокочастотного характера:

$$s(k) = c_1(k) + \sum_{i=2}^{M-1} c_i(k) + r_M(k) = e(k) + \sum_{i=2}^{M-1} c_i(k) + r_M(k). \quad (11)$$

Для улучшения точности представления сигнала набором извлеченных компонент в работе были введены весовые коэффициенты, которые определялись в соответствии с МНК. После этого модель сигнала совпала по виду с выражением (9):

$$s(k) = c_1(k) + \sum_{i=2}^{M-1} \beta_i c_i(k) + \beta_M c_M(k) = e(k) + \sum_{i=2}^{M-1} \beta_i c_i(k) + \beta_M c_M(k), \quad (12)$$

$$s = \mathbf{C}\boldsymbol{\beta} + e. \quad (13)$$

МНК-оценка вектора коэффициентов $\boldsymbol{\beta}$ определяется формулой

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T s. \quad (14)$$

Далее в работе была введена специальная *классификационная статистика*:

$$T_{ii} = \frac{|\hat{\beta}_i|}{\sqrt{\{\{\mathbf{V}^{-1}\}_{ii} \hat{\sigma}_e\}}}, \quad i = \overline{2, M} \quad (15)$$

где \mathbf{V} – матрица ковариаций ЭМ, $\hat{\sigma}_e$ – оценка среднеквадратического отклонения (СКО) шума, определяемая по первой ЭМ *робастным* методом (путем расчета медианы абсолютного отклонения). Значения данной статистики распределялись по группам на основе *кластер-анализа*. Описанная последовательность действий позволяет провести классификацию всех ЭМ, извлеченных из исходного сигнала и, сравнив разложения для случаев наличия и отсутствия аномальных событий, принять соответствующее решение.

Новым *частотно-временным методом* выявления аномальных событий (в частотно-временной области) является спектр Гильберта-Гуанга, вычисляемый на основе ДЭМ. В силу адаптивности метода ДЭМ данный спектр также является адаптивным. По извлеченным компонентам путем вычисления мгновенных частот и их нанесения на частотно-временную плоскость получается результирующий спектр в системе координат “амплитуда-время-частота”. Он является эффективным средством для многих задач, к числу которых относятся выявление скрытых модуляций, идентификация областей концентрации энергии, классификация сигналов, расчет *маргинального спектра* (аналог Фурье-спектра для нестационарных сигналов) и *мгновенной плотности энергии* (для выявления изменений энергетических соотношений). Путем анализа спектра Гильберта-Гуанга для сигналов без аномальных событий и с их наличием принимаются соответствующие решения о работе СДО.

Третья глава диссертации посвящена применению *гармонического вейвлет-преобразования* для выявления аномальных событий второго типа и методов *спектрального анализа* с высоким разрешением в задачах анализа МИС на предмет выявления аномальных событий третьего типа.

Гармонические вейвлеты применяются к широкому классу МИС, имеющих осциллирующую природу. Сигналы, рассматриваемые в данной работе, безусловно, относятся к таковым. Данные вейвлеты необходимы для эффективной обработки таких процессов в силу подобия им по форме (базисные вейвлеты также являются осциллирующими функциями). Во многих случаях наиболее эффективным для обработки является базис, имеющий высокую степень корреляции с исследуемыми сигналами. Представление сигнала в таком базисе будет требовать малого количества слагаемых.

Гармонические вейвлеты имеют спектры в виде прямоугольной волны в заданной полосе частот, поэтому они обладают *компактным носителем* в частотной области, что необходимо и эффективно при решении задачи локализации характерных локальных особенностей сигналов. Кроме того, существуют и используются на практике быстрые алгоритмы вычисления вейвлет-коэффициентов и восстановления сигнала, основанные на БПФ. В диссертации предложен метод выявления аномальных событий

в сигналах на основе гармонического вейвлет-преобразования. Основная идея заключается в анализе самого первого (самого тонкого) уровня разложения, поскольку все аномальные особенности, как локальные, так и протяженные, локализуются именно на нем. Для количественного сравнения 1-го уровня разложения для сигнала с аномальными событиями и с их отсутствием, введена мера эффективности гармонического вейвлет-преобразования, которая записывается следующим образом:

$$\gamma = N_z / N, \quad (16)$$

где N_z – число нулевых вейвлет-коэффициентов на всех уровнях, а N – общее число вейвлет-коэффициентов на всех уровнях. Чем больше значение γ , тем выше эффективность применения гармонического вейвлет-преобразования.

В диссертации также показано, каким образом можно использовать гармоническое вейвлет-преобразование для задач предварительной обработки сигналов и выявления протяженных участков с аномальными событиями. Применительно к предварительной обработке показано применение гармонических вейвлетов для задачи очистки сигналов от шума. Данный метод особенно актуален для переходных и ударных процессов, имеющих гармоническую природу. Основная идея направлена на проведение вейвлет-разложения и определения шумовых уровней с помощью специальных критериев, основанных на вычислении автокорреляционной функции (АКФ) и кумулятивной периодограммы вейвлет-коэффициентов каждого уровня и применении к рассчитанным величинам специальной статистики. Таким образом, для удаления шума из сигнала в работе предложена следующая последовательность действий:

- Определение уровней, содержащих шумовые вейвлет-коэффициенты;
- Применение к шумовым уровням пороговой обработки вейвлет-коэффициентов со специально рассчитанными пороговыми значениями.

Вначале найденные вейвлет-коэффициенты $a_j(k)$ исходного сигнала записываются в следующем виде (в силу линейности гармонического вейвлет-преобразования):

$$a_j(k) = w_j(k) + e_j(k), \quad (17)$$

где j – номер уровня разложения, $w_j(k)$ – вейвлет-коэффициенты незашумленного сигнала, $e_j(k)$ – вейвлет-коэффициенты шума. Тогда интересующее нас слагаемое $w_j(k)$ может быть в общем случае определено как

$$w_j(k) = F[a_j(k), \rho_j], \quad (18)$$

где F – оператор пороговой обработки, ρ_j – пороговое значение. Ключевую роль во всей процедуре играют значения порогов ρ_j , вычисляемые как

$$\rho_j = \sigma_j \sqrt{2 \ln N}, \quad (19)$$

где σ_j – оценка СКО шумовой составляющей на j -м уровне разложения. При этом *робастное* оценивание (устойчивое к ошибкам измерений) СКО осуществляется для самого тонкого уровня с дальнейшим перерасчетом для остальных шумовых уровней:

$$\sigma_1 = 1.4826 \cdot \text{median} |a_1(k) - \text{median} \{a_1(k)\}|. \quad (20)$$

Для остальных шумовых уровней формула записывается как

$$\rho_j = \sqrt{2 \ln N} [\sigma_1 / q(j)], \quad (21)$$

где $q(j)$ – нормирующий коэффициент, зависящий от номера уровня разложения. В работе доказано, что для гармонического вейвлет-преобразования $q(j) = 2^j$. После расчета порогов может быть применена стандартная *мягкая* или *жесткая* пороговая обра-

ботка вейвлет-коэффициентов и получен шумовой процесс и исходный сигнал, очищенный от шума.

После удаления шума из исходного сигнала становится возможным выявление аномальных событий. Ключевую роль здесь играет первый уровень, непосредственно следующий за шумовыми в исходном разложении (или самый первый в случае отсутствия шума в сигнале). Основная идея состоит в поиске на самом тонком уровне *нулевых* участков, соответствующих мультигармоническим и близким к ним процессам, и *ненулевых* участков, соответствующих другим типам процессов из рассматриваемого множества. Достоинством предложенного метода является возможность анализировать требуемый уровень разложения *автоматически* с помощью процедур *сегментации* (разбиения вейвлет-коэффициентов на фрагменты) и *кластер-анализа* (объединения полученных фрагментов в группы), что позволяет определять границы между процессами различного типа.

В отношении *методов спектрального анализа МИС* основное внимание уделено вопросам достижения высокого разрешения, что необходимо для выявления аномальных событий в частотной области, проявляющихся изменениями амплитуды или смещением по частоте. На примерах модельных и реальных МИС показаны основные недостатки использования методов оценивания СПМ на основе Фурье-преобразования и параметрических методов для решения данной задачи. Для оценивания СПМ предлагается метод на основе совместного использования непараметрических методов (Фурье-периодограммы) и классического дискретного вейвлет-преобразования с целью сглаживания осцилляций. В основе метода лежит использование мультипликативной модели СПМ, рассматриваемой в теории временных рядов:

$$I(f) = S(f)U(f), \quad f = 0, \dots, f_s / 2, \quad (22)$$

где $I(f)$ - оценка СПМ на основе Фурье-периодограммы, $S(f)$ - истинная СПМ, $U(f)$ - компонента ошибки с известным распределением, отличным от нормального, f_s - частота дискретизации исходного сигнала. После логарифмирования выражения (22) получаем аддитивную модель вида

$$\ln I(f) - \gamma = \ln S(f) + \varepsilon(f), \quad (23)$$

где γ - известная константа Эйлера. Задача состоит в оценивании $S(f)$ с высоким разрешением. Для оценивания $S(f)$ предлагается следующая процедура:

- 1) Из исходного МИС удаляется тренд (т.е. сигнал становится стационарным относительно среднего) и вычисляется логарифмическая периодограммная оценка СПМ;
- 2) Для логарифмической периодограммной оценки СПМ проводится мультимасштабный анализ в выбранном вейвлет-базисе и определяются уровни, для которых необходимо выполнить пороговую обработку с целью сглаживания;
- 3) Для грубых и тонких уровней вейвлет-разложения по специальным правилам рассчитываются пороги (для грубых и тонких уровней эти правила различны);
- 4) Путем расчета обратного вейвлет-преобразования от модифицированных вейвлет-коэффициентов получается сглаженная оценка $\ln I(f)$, а далее на основе формулы (23) определяется искомая оценка $S(f)$.

В работе предложены критерии для определения шумовых уровней в разложении, для которых необходимо применять пороги. Также показано, что оценки СПМ по данному методу превосходят классические по качеству и являются информативными в задачах выявления аномальных событий в частотной области.

В данной главе также рассматриваются вопросы, связанные со специфическими информативными признаками для характеристики МИС в частотной области. С этой

целью применяются т.н. *меры сложности*, характеризующие количество различных процессов в исходном сигнале. В данной работе рассмотрено применение к МИС такой меры сложности, как *спектральная энтропия*, вычисляемая следующим образом:

1) Рассчитанная СПМ сигнала нормируется таким образом, что все ее значения оказываются в пределах $[0;1]$. Нормировка осуществляется путем деления каждого значения на сумму всех значений. Тем самым становится возможной интерпретация СПМ как некоторой плотности вероятности:

2) Рассчитывается энтропия Шеннона по формуле

$$H_{\text{spec}} = -\sum_{i=1}^N S_{\text{norm}}(f_i) \log S_{\text{norm}}(f_i), \quad (24)$$

где H_{spec} - спектральная энтропия, $S_{\text{norm}}(f_i)$ - i -е значение нормированной СПМ. Спектральная энтропия позволяет характеризовать МИС в частотной области.

Четвертая глава посвящена разработке комплекса программ, предназначенного для анализа и обработки МИС на основе мультимасштабных и спектральных методов высокого разрешения, а также экспериментальным исследованиям применения разработанных методов и алгоритмов к реальным МИС, описывающим функционирование СДО.

Комплекс программ создан в среде MATLAB и может использоваться как автономно, так и в составе других комплексов. Исходные МИС загружаются из файлов в текстовом формате и mat-формате и считываются с помощью специальной функции для сохранения в память.

Комплекс программ включает в себя подсистемы предварительной обработки, классификации и анализа МИС на основе мультимасштабных и спектральных методов высокого разрешения с целью выявления аномальных событий.

Комплекс программ имеет структуру, приведенную на рис. 2. Модуль предварительной обработки позволяет удалить из сигнала шум и выделить тренд. Модуль классификации используется для расчета информативных признаков, описанных в диссертационной работе, включая меры сложности и частотно-временные образы МИС. Модуль анализа МИС на основе мультимасштабных методов состоит из нескольких подмодулей: подмодуля ДЭМ, подмодуля гармонического вейвлет-преобразования, подмодуля частотно-временного анализа на основе ДЭМ и подмодуля спектрального анализа на основе непараметрических методов и классического дискретного вейвлет-преобразования.



Рисунок 2. Структурная схема комплекса программ

На рис. 3 представлена более подробно структурная схема, соответствующая блоку 4 на рис. 2.

Комплекс программ реализовывался в среде научных и инженерных расчетов MATLAB. Система MATLAB обладает широким спектром стандартных функций работы с сигналами, развитым языком программирования высокого уровня с возможностью создания графического интерфейса пользователя GUI.

Интеграция подсистем и модулей в единый комплекс программ достигалась за счет использования взаимосвязанных информационных структур, с помощью которых происходит передача данных между подсистемами. Также использовались средства автоматизации среды MATLAB, что позволяет рассматривать подсистемы анализа и обработки как составные элементы крупной информационной системы.



Рисунок 3. Структурная схема модуля анализа МИС на основе мультимасштабных и спектральных методов высокого разрешения

При оценивании результатов экспериментов на реальных МИС использовались упомянутые в работе критерии качества. Приведено описание статистического материала вычислительного эксперимента. Проведена оценка критериев. Целью экспериментов по анализу модельных и реальных сигналов является проверка корректности и эффективности методов их обработки. В качестве примера рассмотрим МИС, показанный на рис. 4. Как видно из рисунка, исходный МИС включает в себя все 3 рассмотренных в диссертации вида процессов: вибрационные процессы, переходные процессы и ударные процессы.

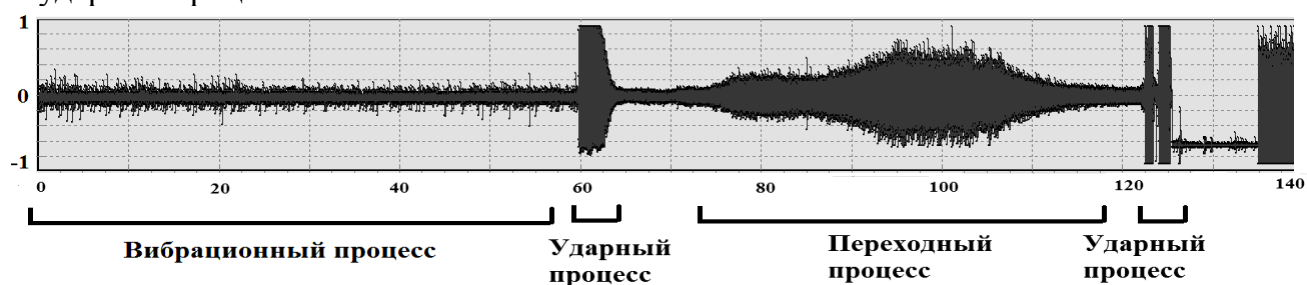


Рисунок 4. Осциллограмма реального МИС (оси - в нормированных единицах)

Рассмотрим другой МИС с аномальными событиями в соответствии с моделью (6), представляющий собой комбинацию бигармонического процесса с шумом (переходный процесс) и двух протяженных идентичных аномальных событий (рис. 5).

Смена типов процессов также свидетельствует об аномальных событиях. Кроме того, аномальные процессы наблюдаются в промежутки времени [1024; 2048] и [3072; 4096]. Покажем эффективность применения гармонического вейвлет-преобразования для данного примера посредством анализа первого уровня разложения (рис. 6).

Из рис. 6 видно, что в разложении присутствуют вейвлет-коэффициенты, соответствующие бигармоническому сигналу в шуме, и вейвлет-коэффициенты, соответствующие аномальным событиям. Количественное сравнение данных, позволяющее сделать вывод о наличии аномальных событий в исходном МИС, приведено в табл. 1.

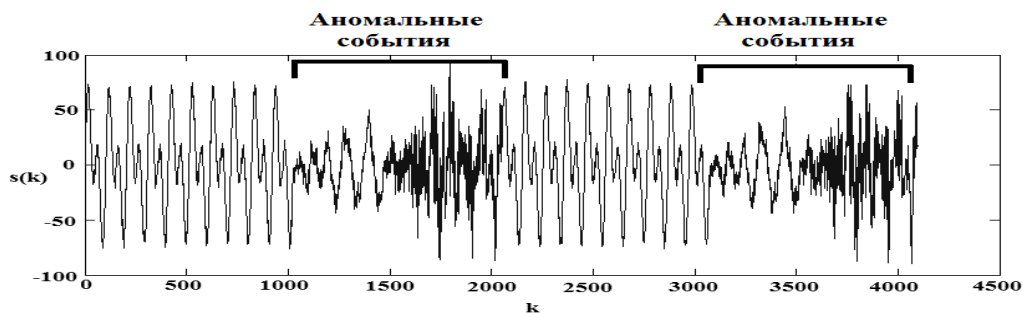


Рисунок 5. МИС с протяженными аномальными событиями

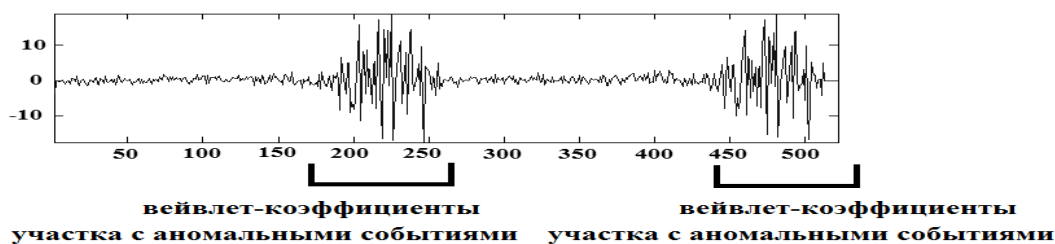


Рисунок 6. Вейвлет-коэффициенты 1-го уровня разложения сигнала на рис. 5

Таблица 1. Характеристики вейвлет-коэффициентов для участков с аномальными событиями и без аномальных событий

Номера вейвлет-коэффициентов	[1; 128]	[129; 256]	[257; 385]	[386; 512]
СКО вейвлет-коэффициентов	1.24	7.56	1.48	8.17
Энергия вейвлет-коэффициентов	289.06	421.18	267.34	403.11

В заключении подводятся итоги работы, делаются выводы об эффективности и применимости результатов, описываются дальнейшие пути развития работы.

Основные результаты работы

Итогом проведенных в диссертационной работе исследований явились следующие научные и практические результаты:

1. Разработаны адаптивные мультимасштабные методы обработки многокомпонентных измерительных сигналов на основе декомпозиции на эмпирические моды, частотно-временного анализа и гармонического вейвлет-преобразования с целью выявления аномальных событий.

2. Предложена многокомпонентная модель измерительных сигналов, параметры которой определяются на основе апостериорного базиса, полученного путем декомпозиции на эмпирические моды.

3. Разработан адаптивный метод спектрального анализа многокомпонентных измерительных сигналов на основе совмещения непараметрических методов и классического вейвлет-преобразования, обеспечивающий высокое частотное разрешение и нацеленный на выявление аномальных событий в сигналах.

4. Разработана методика анализа многокомпонентных измерительных сигналов, характеризующих состояние сложных динамических объектов, с целью выявления аномальных событий.

5. Проведено экспериментальное исследование разработанных методов на модельных и реальных МИС и приведена оценка их эффективности. Разработан и введен в эксплуатацию комплекс программ, реализующий разработанные методы.

Список публикаций по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Клионский Д.М., Орешко Н.И., Геппенер В.В. Декомпозиция на эмпирические моды и ее использование при анализе дробного броуновского движения // Цифровая Обработка Сигналов. – 2008. - № 3. – С. 37-45.
2. D.M. Klionsky, N.I. Oreshko, V.V. Geppener Applications of Empirical Mode Decomposition for Processing Nonstationary Signals (Применение декомпозиции на эмпирические моды к обработке нестационарных сигналов) // Pattern Recognition and Image Analysis: Advances in Mathematical Theory and Applications (Распознавание образов и анализ изображений: Успехи в области математической теории и приложений) – 2008 - Vol. 13, № 3. – pp. 390-399.
3. D.M. Klionsky, N.I. Oreshko, V.V. Geppener Empirical Mode Decomposition in Segmentation and Clustering of Slowly and Fast Changing Non-Stationary Signals (Декомпозиция на эмпирические моды в задачах сегментации и кластер-анализа медленно и быстро меняющихся нестационарных сигналов) // Pattern Recognition and Image Analysis: Advances in Mathematical Theory and Applications. – 2009. - Vol. 19, № 1. – pp. 14-29.
4. Д.М. Клионский, Н.И. Орешко, В.В. Геппенер Новый подход к автоматизированному выявлению шаблонов в телеметрических сигналах на основе декомпозиции на эмпирические моды // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия – История, политология, экономика, информатика. – 2009. - № 15. Вып. 12/1 – С. 118-128.
5. Д.М. Клионский, И.В. Неунывакин, Н.И. Орешко, В.В. Геппенер Декомпозиция на эмпирические моды и ее применение для идентификации информативных компонент и прогнозирования значений сигналов с использованием нейронных сетей // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2010. – №6. – С. 43-50.
6. D.M. Klionskiy, N.I. Oreshko, V.V. Geppener Spectral density estimation of telemetric data by means of a wavelet-based approach (Оценивание спектральной плотности телеметрических данных посредством подхода, основанного на вейвлетах) // Pattern Recognition and Image Analysis: Advances in Mathematical Theory and Applications – 2011. Vol. 21, № 3, pp. 497-500.
7. O.V. Mandrikova, I.S. Solovjev, V.V. Geppener, D.M. Klionskiy New wavelet-based approach intended for the analysis of subtle features of complex natural signals (Новый подход к анализу тонких особенностей сложных природных сигналов на основе вейвлетов) // Pattern Recognition and Image Analysis: Advances in Mathematical Theory and Applications – 2011, Vol. 21, № 2, pp. 300-303.
8. Д.М. Клионский, Н.И. Орешко, В.В. Геппенер Декомпозиция на эмпирические моды с параболической интерполяцией огибающих в задачах очистки сигналов от шума // Цифровая Обработка Сигналов, 2011, № 2. – С. 51-60.
9. D.M. Klionskiy, N.I. Oreshko, V.V. Geppener Application of Data Mining approach to the processing of telemetric signals (Применение методики Data Mining к обработке телеметрических сигналов) // Pattern Recognition and Image Analysis: Advances in Mathematical Theory and Applications – 2011, Vol. 21, No. 4, pp. 720-730.
10. N.I. Oreshko, D.M. Klionskiy New Techniques for the Processing and Analysis of Telemetry and Trajectory Information on the Basis of Achievements in the Realm of Time-Frequency Analysis and Wavelet Theory (Новые методики обработки и анализа телеметрической и траекторной информации на основе современных достижений в области частотно-временного анализа и теории вейвлетов) // Pattern Recognition and Image Analysis: Advances in Mathematical Theory and Applications – 2011, Vol. 21, No. 4, pp. 731-739.
11. Д.М. Клионский, Д.В. Миненков, Е.О. Петриленков, Т.А. Мотиенко Применение гармонических вейвлетов в цифровой обработке сигналов // Известия СПбГЭТУ “ЛЭТИ”. – 2011. – №7. – С. 53-61.
12. Д.М. Клионский, А. К. Большев Применение искусственных нейронных сетей в задачах обнаружения аномалий в поведении сложных динамических объектов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2011. – №11, С. 32-44.

Публикации в других изданиях

13. Д.М. Клионский, Н.И. Орешко, В.В. Геппенер, А.В. Экало Адаптивные методы в цифровой обработке сигналов // монография, изд. СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2010, 160 с.
14. О. В. Мандрикова, В.В. Геппенер, Д.М. Клионский, А.В. Экало Методы анализа и обработки сложных геофизических сигналов // монография, изд. СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2010, 258 с.