

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

**Мультифрактальный анализ сложных процессов в условиях малого
объема выборки и потери данных**

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

аспиранта 4 года обучения
направления 03.06.01 «Физика и астрономия»
физического факультета

Шихалова Глеба Максимовича

Научный руководитель
главный научный сотрудник
лаборатории № 5 ОФНС НИИ ЕН СГУ
д.ф.-м.н., профессор

_____ Павлов А.Н.

Саратов 2018

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Проблема анализа динамики сложных систем в условиях нестационарности, присутствия аддитивных шумов и ограничений объема выборки является хорошо известной и широко обсуждаемой как в радиофизике, так и в других областях естествознания. Это связано с тем, что исследования объектов различной природы по экспериментальным данным требуют совершенствования инструментария цифровой обработки сигналов, акцентируя внимание на его универсальности. Действительно, стандартный спектрально-корреляционный анализ является полезным инструментом анализа динамики сложных систем, однако в условиях нестационарности он может приводить к ошибочной интерпретации полученных результатов. Наличие помех и ограничения длины временного ряда создают сложности в изучении длительных корреляций в анализируемых сигналах при расчетах корреляционной функции. Поэтому неслучайно широкое распространение получил метод флуктуационного анализа относительно тренда (“detrended fluctuation analysis”, DFA). Другим подходом, разработанным для статистического анализа нестационарных и неоднородных процессов, является мультифрактальный анализ, основанный на вейвлет-преобразовании (метод “wavelet-transform modulus maxima”, WTMM). Этот метод является, возможно, наиболее мощным инструментом исследования нестационарных и неоднородных процессов. Он позволяет проводить изучение характеристик скейлинга в поведении спектральной плотности мощности или корреляционной функции (подобно методу DFA), но при этом обладает более широкими возможностями. К настоящему времени были выполнены многочисленные исследования, и получено большое число результатов изучения сложных систем различной природы с использованием метода мультифрактального анализа. Тем не менее, многие важные вопросы до сих пор остаются открытыми.

В частности, ранее было высказано предположение о преимуществах метода WTMM по сравнению со спектрально-корреляционным анализом не только для процессов с меняющимися во времени характеристиками, но и для стационарных процессов малой длительности, однако это предположение детально не проверялось. Крайне актуальным является повышение информативности метода мультифрактального анализа в физиологических и

медицинских исследованиях, которая позволила бы обеспечивать более конкретные сведения об изменениях структуры сигналов, происходящих при трансформации нормальных физиологических процессов в патологические. Основная проблема применения метода мультифрактального анализа в исследованиях динамики физиологических систем состоит в отсутствии очевидной взаимосвязи вычисляемых характеристик спектра сингулярностей с механизмами физиологической регуляции. Учитывая данное обстоятельство, необходимо сделать акцент на поиск путей модернизации используемого алгоритма с тем, чтобы он позволял проводить более наглядную и ясную интерпретацию наблюдаемых изменений.

До сих пор метод мультифрактального анализа применялся в исследованиях динамики сложных систем по «хорошим» данным, и не обсуждался вопрос, а как этот метод будет себя вести, если экспериментально записанный сигнал содержит сбойные участки. Если плохих сегментов немного, то они, как правило, не оказывают заметного влияния на последующий анализ сигналов, после того как эти сегменты исключаются из рассмотрения. Однако, когда артефактов оказывается много, и значительный объем данных приходится «вырезать» из экспериментальной записи, то задача сильно усложняется, так как удаление выборки большого объема может оказать существенное влияние на внутреннюю структуру анализируемого процесса, приводя к ее разрушению, что меняет вычисляемые корреляционные характеристики или другие количественные меры. Проведение более детальных исследований, направленных на модернизацию метода мультифрактального анализа и расширение возможностей его практического применения, определяет актуальность темы работы.

Цель диссертационной работы состоит в выявлении возможностей и ограничений исследования сложных режимов динамики нелинейных систем в условиях нестационарности, малого объема выборки и присутствия аддитивных помех на основе мультифрактального анализа.

Основными задачами данной работы являются:

1. Сопоставить возможности спектрально-корреляционного анализа сигналов малой длительности на основе стандартных методов расчета и альтернативных подходов, характеризующих степенные закономерности в поведении спектральной плотности мощности.

2. Предложить и протестировать модифицированный метод мультифрактального анализа, который предусматривает проведение исследований с учетом механизмов, обуславливающих изменения спектра сингулярностей.
3. Установить влияние потери фрагментов экспериментальных данных, вызванных наличием различных артефактов и сбойных участков, ошибками записи или внезапными изменениями условий эксперимента, на возможность количественного описания режима функционирования.

Объектом исследования являются сигналы различной природы, регистрируемые в условиях малого объема выборки и потери данных, вызванной удалением фрагментов с артефактами и различными искажениями, возникающими из-за изменений условий функционирования системы или сбоев регистрирующего оборудования.

Предмет исследования:

- степенные закономерности в поведении спектральной плотности мощности, анализируемые по коротким сигналам;
- методика проведения мультифрактального анализа при наличии независимых ритмических процессов различной природы;
- потеря экспериментальных данных из-за наличия сбойных участков и артефактов.

Методология и методы исследования.

В работе применялись наиболее универсальные методы анализа структуры сигналов, применимые для исследования как стационарных, так и нестационарных процессов. В качестве основного инструмента исследования был выбран метод мультифрактального анализа, применяющий непрерывное вейвлет-преобразование (метод WTMM). Для сравнения основных результатов дополнительно использовались метод анализа флуктуаций относительно тренда (метод DFA) и метод многомасштабного анализа, применяющий дискретное вейвлет-преобразование. Для предварительной обработки экспериментальных данных использовались методы вейвлет-фильтрации.

Достоверность полученных результатов базируется на применении апробированных методов анализа структуры сигналов, устойчивости применяемых алгоритмов к изменениям параметров счета, непротиворечивости

результатов и выводов диссертационной работы известным теоретическим представлениям.

Научная новизна работы:

1. Обоснованы преимущества мультифрактального анализа как альтернативного инструмента исследования, позволяющего проводить спектральный анализ сложных процессов в условиях малого объема выборки.
2. Предложен модифицированный метод мультифрактального анализа, который обеспечивает учет индивидуальных механизмов, оказывающих влияние на функционирование исследуемой системы.
3. Показано, что эффект индуцированной шумом потери мультифрактальности может быть выявлен по коротким временным рядам, содержащим около 300 отсчетов.
4. Выявлены различия диагностики режима функционирования системы при наличии сбойных участков в экспериментальных данных для коррелированных и антикоррелированных процессов. Эти различия являются общими для режимов хаотической и стохастической динамики нелинейных систем.

Теоретическая и практическая значимость исследования:

1. Установление различий эффектов потери данных при мультифрактальном анализе коррелированных и анти-коррелированных сигналов позволяет осуществить прогноз ошибки диагностики режима динамики при наличии большого числа сбойных участков в экспериментальной записи.
2. Разработанная модификация метода мультифрактального анализа, предусматривающая предварительную полосовую фильтрацию многокомпонентных сигналов, позволяет расширить возможности диагностики изменений режима динамики системы по экспериментальным данным, проводя изучение индивидуальных механизмов, обеспечивающих ее функционирование.
3. Результаты диссертации могут применяться в учебном процессе при подготовке студентов радиофизических специальностей. В настоящее время результаты используются в лабораторной работе «Мультифрактальный анализ» спецпрактикума для студентов магистратуры физического факультета Саратовского государственного университета.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Применение мультифрактального анализа для расчета показателя, характеризующего степенную зависимость функции спектральной плотности мощности, позволяет значительно снизить ошибку вычислений по сигналам малой длительности по сравнению с расчетом спектра мощности на основе финитного преобразования Фурье.
2. При изучении многокомпонентных сигналов, представляющих собой сумму ритмических процессов, генерируемых системами со слабой взаимной связью, выделение отдельных ритмических процессов с их последующим анализом позволяет обеспечить более наглядную интерпретацию результатов расчета спектра сингулярностей, установив соответствие между изменениями мультифрактальных характеристик и механизмами, вызывающими эти изменения.
3. Потеря фрагментов данных, к которым приводит наличие сбойных участков, возникающих из-за артефактов, изменений условий функционирования системы или особенностей функционирования регистрирующего оборудования, оказывает различное влияние на результаты мультифрактального анализа коррелированных и анти-коррелированных сигналов. При наличии анти-корреляций, сравнительно небольшая (до 10%) потеря данных сопровождается значительными изменениями спектра сингулярностей. Для сигналов с положительными корреляциями возможность диагностики режима функционирования сохраняется даже в условиях экстремальной потери данных (около 90% от исходной выборки).

Научно-квалификационная работа включает введение, три главы, в которых обсуждается основное содержание работы, заключение и список цитированной литературы, содержащий 108 источников. В первой главе рассматривается задача проведения мультифрактального анализа сигналов малой длительности и обсуждается возможность изучения степенных закономерностей по сигналам малой длительности. Во второй главе предлагается модифицированный метод мультифрактального анализа динамики систем с несколькими ритмическими процессами, и приводятся результаты применения этого метода для изучения динамики церебрального кровотока. В третьей главе обсуждается проблема диагностики сложных режимов динамики нелинейных систем в условиях потери данных. Полный объем работы

составляет 123 страницы, включая 40 рисунков. Список литературы содержит 108 наименований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Проведено сопоставление возможностей спектрально-корреляционного анализа сигналов малой длительности с применением стандартных методов расчета и альтернативных подходов, характеризующих степенные закономерности в поведении спектральной плотности мощности. Обоснованы преимущества мультифрактального анализа как альтернативного инструмента исследования, позволяющего проводить спектральный анализ сложных процессов в условиях малого объема выборки. Показано, что применение мультифрактального анализа для расчета показателя, характеризующего степенную зависимость функции спектральной плотности мощности, позволяет значительно снизить ошибку вычислений по сигналам малой длительности по сравнению с расчетом спектра мощности на основе финитного преобразования Фурье.
2. Предложен и протестирован модифицированный метод мультифрактального анализа, который предусматривает проведение исследований с учетом механизмов, обуславливающих изменения спектра сингулярностей. Предложенная модификация метода мультифрактального анализа, предусматривающая предварительную полосовую фильтрацию многокомпонентных сигналов, позволяет расширить возможности диагностики изменений режима динамики системы по экспериментальным данным.
3. Установлено влияние потери фрагментов экспериментальных данных со сбойными участками на возможность количественного описания режима функционирования системы. Определены различия диагностики режима функционирования системы при наличии сбойных участков в экспериментальных данных для коррелированных и антикоррелированных процессов. Эти различия являются общими для режимов хаотической и стохастической динамики нелинейных систем. Установление данных различий позволяет осуществить прогноз ошибки диагностики режима динамики при наличии большого числа сбойных участков в экспериментальной записи.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях и семинарах:

- Международный симпозиум по оптике и биофотонике «Saratov Fall Meeting - 2014» (Саратов, СГУ, 2014), «Saratov Fall Meeting - 2015» (Саратов, СГУ, 2015), «Saratov Fall Meeting - 2017» (Саратов, СГУ, 2017);
- Всероссийская молодежная конференция «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине» (Саратов, СГУ, 2015).
- Результаты диссертации обсуждались на научных семинарах кафедры радиофизики и нелинейной динамики Саратовского государственного университета и Потсдамского института исследований влияния климата (Германия).

Публикации автора по теме диссертации:

1. A.N. Pavlov, A.S. Abdurashitov, O.A. Sindeeva, S.S. Sindeev, O.N. Pavlova, G.M. Shihalov, O.V. Semyachkina–Glushkovskaya. Characterizing cerebrovascular dynamics with the wavelet–based multifractal formalism // *Physica A.* – 2016. – V. 442 – P. 149–155.
2. A.N. Pavlov, O.V. Semyachkina–Glushkovskaya, O.N. Pavlova, A.S. Abdurashitov, G.M. Shihalov, E.V. Rybalova, S.S. Sindeev. Multifractality in cerebrovascular dynamics: an approach for mechanisms–related analysis // *Chaos, Solitons & Fractals.* – 2016. – V. 91 – P. 210–213.
3. А.Н. Павлов, О.Н. Павлова, Г.М. Шихалов. Индуцированная шумом потеря мультифрактальности в динамике автоколебательных систем // *Письма в ЖТФ.* – 2015. – Т. 41, Вып. 22. – С. 89–94.
4. G.M. Shihalov, O.N. Pavlova, A.N. Pavlov. Noise–induced loss of multifractality in the dynamics of oscillating systems // *Proceedings of SPIE.* – 2016. – V. 9917 – P. 99173M.
5. A.N. Pavlov, O.N. Pavlova, Y.K. Mohammad, G.M. Shihalov. Quantifying chaotic dynamics from interspike intervals // *Proceedings of SPIE.* – 2015. – V. 9448. – P. 94481O.
6. O.N. Pavlova, A.S. Abdurashitov, M.V. Ulanova, G.M. Shihalov, O.V. Semyachkina–Glushkovskaya, A.N. Pavlov. Analysis of cerebral vessels dynamics using experimental data with missed segments // *Proceedings of SPIE.* – 2018. – V. 10717. – P. 1071725.

7. Г.М. Шихалов, О.Н. Павлова, А.Н. Павлов. Исследование эффекта индуцированной шумом потери мультифрактальности в динамике колебательных систем // Материалы Всероссийской молодежной конференции «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине». – 2015. – Саратов: Изд-во «Саратовский источник». – С. 138–140.