

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра радиофизики и нелинейной динамики

Мультифрактальный анализ нестационарных процессов

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 422 группы
направления 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии
и системы связи» физического факультета
Прокопчук Виктории Игоревны

Научный руководитель
доцент, к.ф.-м.н.

О.Н. Павлова

Зав. кафедрой
профессор, д.ф.-м.н.

В.С. Анищенко

Саратов 2019

ВВЕДЕНИЕ

Изучение динамики сложных систем по экспериментальным данным зачастую осложняется из-за присутствия нестационарности регистрируемых процессов, наличия значительного уровня помех, которые перекрываются в частотной области с информационным сигналом, и небольшого количества выборки. Данная проблема достаточно хорошо известна и многократно описывалась и обсуждалась в различных научных изданиях [1–7]. Экспериментальные исследования объектов различной природы по временным рядам требуют существования более подходящего инструмента цифровой обработки сигналов. Например, классический спектрально-корреляционный анализ является полезным инструментом изучения динамики сложных систем [8–10], но при наличии нестационарности он может приводить к ошибочному восприятию результатов исследований. Помехи и малый объем выборки обуславливают сложности в изучении эффектов длительных корреляций в анализируемых сигналах. Поэтому широко стали применяться новые подходы к их изучению, например, метод анализа флуктуаций относительно тренда (“detrended fluctuation analysis”, DFA) [11, 12]. Он является одним из наиболее востребованных в настоящее время инструментов. К числу его положительных сторон относится простота реализации алгоритма, визуализация, возможность повысить надежность оценок закономерностей спада корреляций на больших временах, где стандартная корреляционная функция приводит к большим погрешностям в условиях стохастической динамики нелинейных систем. К примеру, при больших значениях аргумента корреляционная функция принимает настолько малые значения, что она «растворяется» в шуме, и оценка закономерностей ее спада становится непростой задачей. Если необходимо проанализировать особенности поведения корреляционной функции на больших временах или, что аналогично, закономерности частотной зависимости функции спектральной плотности мощности в области очень низких частот, метод DFA становится полезной альтернативой.

Второй метод цифровой обработки сигналов, применимый для статистического анализа нестационарных процессов – основанный на вейвлет-преобразовании мультифрактальный анализ (метод “wavelet-transform modulus maxima” или WTMM). Несмотря на то, что фрактальные подходы широко известны и часто применялись в исследованиях различных систем, метод WTMM пока еще не очень часто используется исследователями. Вероятнее всего, это связано как со сложностью используемого алгоритма, так и со сложностями интерпретации результатов, требующих от исследователя наличия специфических знаний, например, понимания особенностей спектров сингулярностей для неоднородных процессов, правильной интерпретации вычисляемых величин и т.п. Метод WTMM является, возможно, наиболее мощным инструментом исследования нестационарных и неоднородных процессов. Он дает возможность проводить изучение характеристик скейлинга в поведении спектральной плотности мощности или корреляционной функции (подобно методу DFA), но это не все его возможности. Исследования, проводившиеся до этого, показали, что этот метод обладает намного более быстрой сходимостью по сравнению с корреляционным анализом.

Цель выпускной квалификационной работы состоит в тестировании модифицированного метода мультифрактального анализа, который предусматривает проведение исследований с учетом механизмов, вызывающих изменения спектра сингулярностей.

Материалы исследования. Исследования проводились на основе цифровой обработки экспериментальных данных биологической природы.

Выпускная квалификационная работа содержит введение, две главы (1. Теоретические сведения; 2. Применение модифицированного подхода), заключение и список использованных источников. Общий объем работы 40 стр.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Теоретические сведения. Выбранным инструментом исследования в данной работе является метод мультифрактального анализа на основе вейвлет-преобразования, который был предложен в работах, где представлены как теоретические основы метода, так и детальное исследование его возможностей и ограничений. Этот метод, получивший название метод WTMM ('wavelet-transform modulus maxima'), основан на непрерывном вейвлет-преобразовании анализируемой функции (сигнала) $f(x)$

$$T(s, z) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-z}{s}\right) dx, \quad (1)$$

где параметры s и z определяют масштаб и смещение вейвлета ψ . Сингулярности функции $f(x)$ обычно изучаются с помощью вещественных вейвлетов, таких как WAVE

$$\psi = x \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (2)$$

или МНАТ

$$\psi = (1 - x^2) \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right), \quad (3)$$

которые представляют собой первую и вторую производные функции Гаусса, соответственно.

На первоначальном этапе исследования динамики физиологических систем проводились на основе стандартного метода мультифрактального анализа, применяющего вейвлет-преобразование. Этот подход был применен для цифровой обработки сигналов скорости церебрального кровотока. Данные сигналы являются сравнительно небольшими по длительности, зашумленными и нестационарными, что предопределило выбор метода анализа на основе концепции вейвлетов. Экспериментальные данные были предоставлены сотрудниками кафедры физиологии человека и животных СГУ имени Н.Г. Чернышевского. Эксперименты проводились на 57 новорожденных крысах

(самцах, 2-3 дня после рождения) и предусматривали исследование реакции на сильный стресс, приводящий к разрывам кровеносных сосудов и возникновению внутричерепных кровоизлияний (интракраниальных геморрагий). В качестве модели стресса использовался перемежающийся инфразвук. Как отмечается в ранее проведенных исследованиях по данной тематике, стресс-индуцированные разрывы сосудов преимущественно происходят на следующий день после стресса.

Были проанализированы сигналы трех групп крыс – контрольной группы ($n=18$), группы с латентной (скрытой) стадией формирования интракраниальных геморрагий (4 часа после стресса, $n=16$) и группы лабораторных животных, у которых мозговые кровотечения уже появились (24 часа после стресса, $n=23$).

Скорость церебрального кровотока измерялась с помощью лазерной спекл-интерферометрии – метода, позволяющего проникать на небольшую глубину в оптическую ткань, фиксируя спекл-картины, появляющиеся вследствие рассеяния излучения, попадающего на шероховатую поверхность и оценки скорости движения подвижных частиц крови по изменению спекл-картины. Чтобы устранить проблему проникновения оптического излучения через кости черепа, в случае новорожденных возможность неинвазивного достижения церебральных сосудов была связана с двумя обстоятельствами. А именно, существенно меньшей толщиной кожного покрова и возможностью проводить анализ церебрального кровотока через незакрытый родничок, что позволяло резко сократить расстояние до кровеносных сосудов. Эксперименты проводились на анестезированных крысах (с применением изофлурана). Спекл-картины регистрировались в течение 5 минут со средней частотой 40 сканов в секунду. Проводилась предварительная обработка данных записей, так как они содержали высокий уровень шума, для фильтрации которого применялся метод усреднения контраста в пределах подвижного окна (55 x 55 пикселей) по соседним 50 сканам. Временная динамика скорости кровотока извлекалась из двух участков – области сагиттального синуса, отражающего

макроскопическую динамику церебральных сосудов (макроциркуляцию) и мелкой сети кровеносных сосудов в его окрестности (микроциркуляцию). Учитывая малую величину последних сосудов, проводимое усреднение фактически соответствовало усреднению по некоторому участку и оценку средней скорости микроциркуляции крови в выбранной области. В результате проведенных экспериментов для каждой крысы одновременно записывалось по два сигнала.

Проведенный анализ позволил выявить существенные различия между стресс-индуцированными нарушениями динамики кровотока на макро- и микроскопическом уровнях. Предыдущие исследования были сконцентрированы только на макроскопической динамике церебрального кровотока (в области сагиттального синуса), чтобы охарактеризовать развитие венозной недостаточности. С этой целью рассматривались достаточно простые характеристики, такие как диаметр сосудов и средняя скорость кровотока.

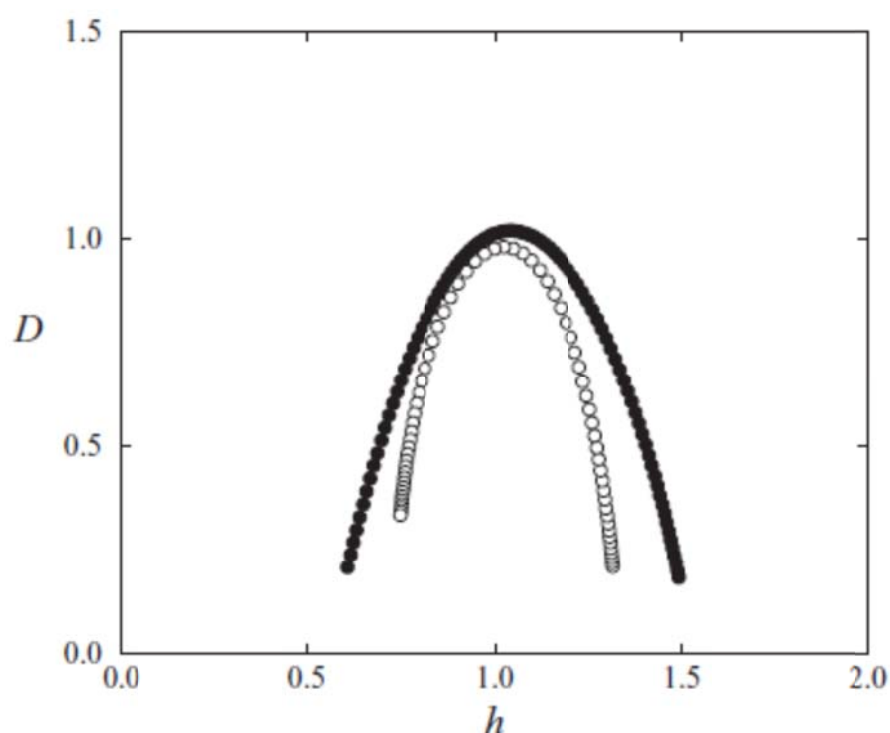


Рисунок 1 – Спектры сингулярностей, характеризующие типичные стресс-индуцированные изменения на уровне макроциркуляции (темные круги – контрольная группа, светлые – динамика через 4 часа после стресса).

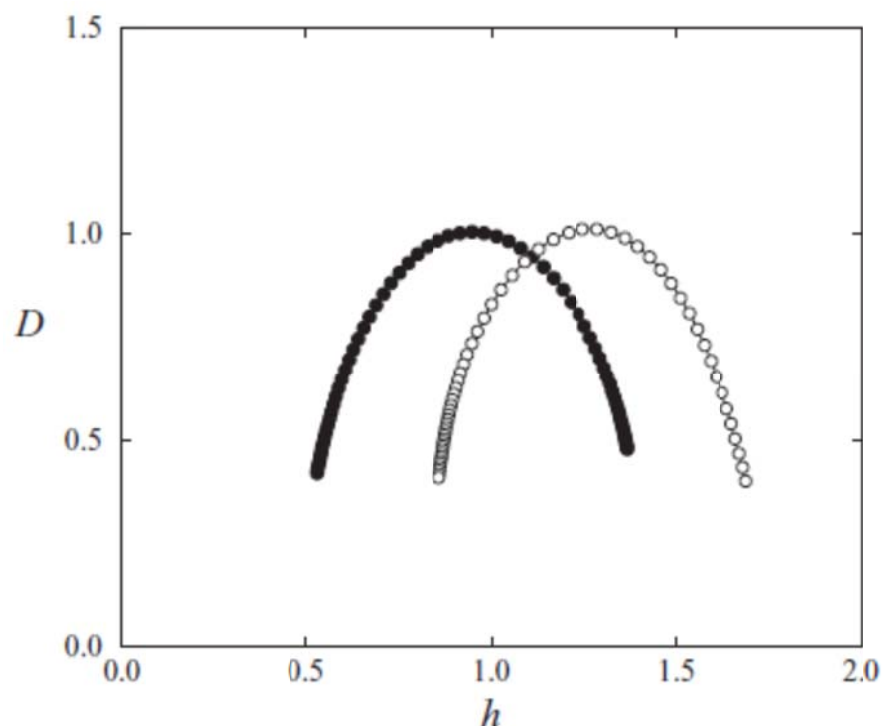


Рисунок 2 – Спектры сингулярностей, характеризующие типичные стресс-индуцированные изменения на уровне микроциркуляции (темные круги – контрольная группа, светлые – динамика через 4 часа после стресса).

Применение модифицированного подхода. Цереброваскулярная динамика, как и многие другие физиологические процессы, характеризуется четко выраженной многомасштабной структурой, в которой проявляются различные ритмические процессы, отражающие динамику, ассоциирующуюся с разными механизмами физиологической регуляции.

В данной работе тестируется модифицированный подход, который применяется не к исходным экспериментальным данным, а к сигналам, прошедшим процедуру полосовой фильтрации, позволяющую разделить динамику, ассоциирующуюся с разными механизмами физиологической регуляции. Применительно к записям скорости церебрального кровотока были выделены три частотных диапазона, и дальнейший анализ проводился для фильтрованных данных в каждом диапазоне по-отдельности:

- Диапазон I: 0.05 – 0.1 Гц.
- Диапазон II: 0.1 – 0.25 Гц.

- Диапазон III: 0.25 – 0.75 Гц.

Те же физиологические механизмы наблюдаются у человека, однако, они связаны с более низкими частотами (у лабораторных крыс, также как и других животных небольшого размера, частоты основных ритмов в несколько раз выше.

Сигналы цереброваскулярной динамики крыс, прошедшие процедуру фильтрации в указанных диапазонах, анализировались по-отдельности для выявления возможных изменений кровотока на уровне макро- и микроциркуляции, вызванных резкими перепадами периферического артериального давления. В отличие от ранее проводившихся исследований, таким образом, мы осуществляли количественное описание сложности цереброваскулярной динамики, которая ассоциируется с индивидуальными механизмами регуляции, и проводили анализ того, как фармакологически индуцированное резкое изменение артериального давления влияет на скорость кровотока в церебральных сосудах различного размера. С этой целью проводилась оценка трех значений меры сложности Δ_h для каждой крысы (ширины спектра сингулярностей), которые описывают макроскопическую динамику церебрального кровотока в сагиттальном синусе в частотных диапазонах I, II и III. Кроме того, три значения этой меры сложности Δ_h вычислялись для микроскопической динамики скорости кровотока в мелких сосудах, расположенных вокруг сагиттального синуса.

Поскольку абсолютные значения рассматриваемых мер могут сильно отличаться для разных лабораторных животных, основной акцент был сделан на относительных изменениях сложности динамики. Описанный подход к анализу цереброваскулярной динамики в нескольких различных частотных диапазонах обеспечивает дополнительные возможности выявления механизмов, ответственных за изменение мер сложности.

Полученные результаты качественно соответствуют результатам вычислений, проведенным по исходному сигналу без проведения

предварительной фильтрации (то есть в рамках стандартного подхода). Как было показано в работе, резкие изменения периферического артериального давления не приводят к значительным изменениям ширины спектра сингулярностей. Наблюдаемые вариации спектров сингулярностей сравнимы с вариациями, которые происходят при изменении параметров алгоритма. Таким образом, анализ макроскопической динамики церебрального кровотока в частотном диапазоне I не позволяет обнаружить реакции на введение фенилэфрина в макроцеребральной циркуляции.

Существенно отличающийся отклик наблюдается на уровне мелких сосудов микроцеребральной сети. Динамика скорости кровотока в частотном диапазоне I, связанная с эндотелиальными механизмами регуляции, демонстрирует четко выраженный рост степени мультифрактальности, который отражает более высокую неоднородность (сложность) временной зависимости скорости кровотока, вызванную периферической гипертензией.

Если рассматриваются другие частотные диапазоны, различия между спектрами сингулярностей, относящиеся к трем рассматриваемым физиологическим состояниям являются значительно менее выраженными. Таким образом, мы можем сделать вывод о том, что микроцеребральная динамика в частотных областях II и III демонстрирует незначительные (сопоставимые с погрешностью проводимых оценок) реакции на введение фенилэфрина. Аналогичные результаты получаются и для макроцеребральной динамики для диапазонов II и III, где также не проявляется четко выраженных откликов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проводимых исследований протестирован модифицированный метод мультифрактального анализа, который предусматривает проведение исследований с учетом механизмов, обуславливающих изменения спектра сингулярностей. Проводимая в рамках этого модифицированного подхода

полосовая фильтрация экспериментальных данных позволяет осуществлять разделение ритмических составляющих, которые связаны с эндотелиальной регуляцией, нейрогенным регуляторным механизмом и миогенным откликом гладких мышечных клеток стенок сосудов. Полученные результаты подтверждают существенно отличающиеся отклики: в то время как макроциркуляция почти не меняется при изменении периферического артериального давления, микроциркуляция характеризуется возрастающей сложностью (неоднородностью) динамики скорости кровотока. Более того, этот эффект вызван изменениями эндотелиального механизма регуляции. Таким образом, предложенный подход позволяет не только установить сам факт изменений структуры анализируемых сигналов и количественно охарактеризовать эти изменения при резких повышениях артериального давления, но и предложить возможную физиологическую интерпретацию данных изменений, которая обеспечивает более глубокое понимание наблюдаемых явлений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Хованова, И. А. Методы анализа временных рядов / И. А. Хованова, И. А. Хованов. – Саратов: ГосУНЦ "Колледж", 2001.
- [2] Daubechies, I. Ten lectures on wavelets / I. Daubechies. – Philadelphia: S.I.A.M., 1992.
- [3] Kaiser, G. A friendly guide to wavelets / G. Kaiser. – Boston: Birkhauser, 1994.
- [4] Torrence, C. A practical guide to wavelet analysis / C. Torrence, G. P. Compo // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 1998. – Vol. 79. – P. 61–78.
- [5] Cohen, A. Wavelets and multiscale signal processing / A. Cohen, R. Ryan. – London: Chapman and Hall, 1995.
- [6] Combes, J. M. Wavelets / J. M. Combes, A. Grossman, P. Tchamitchian (Eds.). – Berlin: Springer–Verlag, 1989.

- [7] Erlebacher, G. Wavelets: theory and applications / G. Erlebacher, M. Y. Hussaini, L. M. Jameson (Eds.). – New York: Oxford University Press, 1996.
- [8] Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989.
- [9] Отнес, Р. Прикладной анализ временных рядов / Р. Отнес, Л. Эноксон. – М.: Мир, 1982.
- [10] Вайнштейн, Л. А. Разделение частот в теории колебаний и волн / Л. А. Вайнштейн, Д. Е. Вакман. – М.: Наука, 1983.
- [11] Peng C.–K. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series / C.–K. Peng, S. Havlin, H. Stanley, A. Goldberger // Chaos. – 1995. – Vol. 5,– P. 82–87.
- [12] Buldyrev, S. Long–range correlation properties of coding and noncoding DNA sequences: GenBank analysis / S. Buldyrev, A. Goldberger, S. Havlin, R. Mantegna, M. Matsu, C.–K. Peng, M. Simons, H. Stanley // Phys. Rev. E. – 1995. – Vol. 51. – P. 5084–5091.