

На правах рукописи

ПАВЛОВ Алексей Николаевич

**АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ НЕСТАЦИОНАРНЫХ,  
КОРОТКИХ И ЗАШУМЛЕННЫХ СИГНАЛОВ  
НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ**

01.04.03 – радиофизика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Саратов - 2009

Работа выполнена на кафедре радиофизики и нелинейной динамики Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

Научный консультант: доктор физико-математических наук,  
профессор Анищенко Вадим Семенович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Трубецков Дмитрий Иванович  
доктор физико-математических наук,  
профессор Осипов Григорий Владимирович  
доктор физико-математических наук,  
профессор Бутковский Олег Ярославович

Ведущая организация: Саратовский филиал Института радиотехники  
и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Защита состоится 11 сентября 2009 г. в 15 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д.212.243.01 при Саратовском государственном университете им. Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, корп. 3, ауд. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Саратовского государственного университета.

Автореферат разослан “\_\_\_” июня 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Аникин В.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Терминология “вейвлетов” (от англ. *wavelet*, что в дословном переводе означает “маленькая волна”) сформировалась в 80-х годах XX века [Гроссман А., Морле Ж.]. Первоначально данный математический аппарат был предложен в качестве альтернативы классическому спектральному анализу, основанному на преобразовании Фурье. Возникновение теории вейвлетов [Мейер И., Добеши И., Малла С., Жаффар С. и др.] считается одним из важнейших событий в математике за последние десятилетия, поскольку это, пожалуй, единственная новая математическая концепция, которая сразу же после ее появления стала восприниматься в качестве инструмента *прикладных* исследований практически во всех естественных науках и многих областях техники.

В настоящее время вейвлеты широко используются при решении задач анализа и синтеза различных сигналов, для обработки изображений, для сжатия больших объемов информации и цифровой фильтрации, для распознавания образов, при изучении сильно развитой турбулентности, при решении некоторых дифференциальных уравнений и т.п. Применения вейвлетов известны в радиофизике, нелинейной динамике, акустике, оптике, физике твердого тела, сейсмологии, динамике жидкостей, биологии и медицине, экономике [Чуи Ч., Кайзер Ж., Хуббард Б., Фландрин П., Столниц Э., Веттерли М., Астафьева Н.М., Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. и др.].

Интерес к новому направлению с момента его появления был очень большим. Число ссылок на источники в сети Интернет, в которых упоминается термин “вейвлет”, уже достигло нескольких миллионов. Основной областью применения данного математического аппарата в естествознании является обработка нестационарных (во времени) или неоднородных (в пространстве) случайных процессов. Именно поэтому вейвлет-анализ представляет значительный интерес для радиофизики, так как большинство классических методов цифровой обработки сигналов применимы лишь к процессам с постоянными во времени (или пространстве) характеристиками.

По аналогии с преобразованием Фурье, вейвлет-преобразование сигнала  $x(t)$  состоит в его разложении по некоторому базису. Отличие заключается в том, что в качестве базисной выбирается “солитоноподобная”, хорошо локализованная и по времени, и по частоте функция  $\psi(t)$ , обладающая рядом характерных признаков; базис формируется путем ее перемасштабирования и сдвигов вдоль временной оси. Применение локализованных функций позволяет анализировать процессы, характеристики которых меняются во времени, и приводит к двумерной развертке сигнала  $x(t)$ , при которой время и частота воспринимаются как независимые переменные.

Важность использования в прикладных задачах базисных функций, отличных от гармонических, обсуждалась на протяжении длительного времени. Еще в 1910 году была предложена первая ортонормированная система функций с компактным носителем [Хаар А.]. В 20-х годах Мандельштам Л.И. отмечает, что для систем с переменными параметрами “*разложение Фурье перестает быть целесообразным, и место функций  $\cos$  и  $\sin$  должны занять другие функции*”. Следующий шаг был сделан в 1946 году [Габор Д.], когда была сформулирована идея “атомов” – неортогонального базиса, построенного с использованием смещенных относительно друг друга функций Гаусса. Сам термин “вейвлет” [Рикер Н.] был предложен в 1940 году. А. Гроссман и Ж. Морле в 80-х годах наделили этот термин новым смыслом, продемонстрировав возможность анализа произвольных сигналов с помощью единственной функции – *материнского вейвлета*  $\psi(t)$ , осуществляя ее перемасштабирования и смещения. Важным шагом стала разработка теории кратномасштабного анализа [Мейер И., Малла С.], предполагающей последовательное “огрубление” содержащейся в данных информации и возможность детального исследования структуры сигналов на разных масштабах наблюдения.

Наряду с анализом нестационарных процессов, вейвлеты широко используются при решении задач распознавания образов [Столиц Э., ДеРоуз Т., Салезин Д.]. Например, они помогают проводить очистку экспериментальных данных от шумов и случайных искажений. В сигналах натуральных экспериментов часто встречаются изолированные особенности, которые могут быть связаны как с самой исследуемой динамикой, так и со сбоями аппаратуры или влиянием каких-то внешних факторов. Фильтры, построенные на основе Фурье-преобразования, неэффективны для устранения изолированных особенностей, тогда как цифровая фильтрация с использованием вейвлетов позволяет проводить качественную очистку зашумленных сигналов на этапе предварительной обработки экспериментальных данных. Широкая область применения вейвлетов связана с распознаванием близких по форме сигналов на фоне шума. Примером может служить распознавание речи, когда на основе вейвлет-коэффициентов решается задача идентификации отдельных звуков или слов голосового сообщения, полученного при наличии сильных помех.

Таким образом, вейвлет-преобразование представляет собой мощный инструмент анализа, применимый к коротким, зашумленным и нестационарным случайным процессам. Поскольку такие процессы часто регистрируются в натуральных экспериментах, изучение возможностей этого инструмента и развитие методов, базирующихся на вейвлет-преобразовании, является актуальной задачей исследования структуры сигналов. Несмотря на значитель-

ные успехи теории вейвлетов и ее многочисленные применения в решении большого числа задач, в настоящее время активно используется лишь часть ее потенциальных возможностей. Многие весьма интересные разработки теоретиков только начинают находить свое применение. До сих пор остается ряд открытых вопросов, относящихся к определению существующих ограничений вейвлет-анализа. Как и любой другой метод цифровой обработки сигналов, вейвлеты имеют определенные недостатки. Известно, например, что за возможность проведения локализованного спектрального анализа, позволяющего осуществлять расчеты мгновенного спектра по коротким участкам сигнала, приходится “расплачиваться” ухудшением спектрального разрешения.

Многие исследователи ограничиваются противопоставлением вейвлет-анализа и других подходов (например, классического спектрального анализа, основанного на преобразовании Фурье). В ряде практических задач такое противопоставление оправдано, если, например, речь идет только об изучении эволюционной динамики мгновенных частот и амплитуд ритмов колебаний [Малла С., Аддисон П., Чуи Ч.]. Тем не менее, значительный интерес вызывают комбинированные подходы, базирующиеся на сочетании вейвлетов с другими методами анализа структуры сигналов. Подобное сочетание позволяет эффективнее решать самые разные задачи – от распознавания образов и количественного описания сложности нестационарных процессов до улучшения характеристик систем связи.

Детальные исследования структуры нестационарных процессов приводят к необходимости модификаций методов обработки временных рядов, которые позволили бы получать более полную информацию об анализируемых сигналах. Такие модификации представляют несомненный интерес при изучении эффектов взаимодействия ритмов колебаний в условиях нестационарных многочастотных режимов динамики, например, при выявлении синхронизации колебаний (если захват мгновенных частот или фаз колебательных процессов происходит лишь на сравнительно небольших отрезках времени) или модуляции колебаний. Для многих сигналов в природе типична нестационарность, приводящая к тому, что характеристики модуляции не являются постоянными и могут демонстрировать существенные изменения во времени. Как следствие, возникает необходимость рассмотрения нестационарных модулированных колебаний, которое должно базироваться на локализованном спектральном анализе [Аддисон П., Ватсон Дж.].

Наряду со случаем нестационарных процессов хорошо известны и другие ограничения классических методов анализа структуры сигналов, например, проблема исследования длительных корреляций в динамике нелинейных систем, если ограниченный объем выборки препятствует проведению оценок

закономерностей спада автокорреляционной функции на больших временах. Хорошей альтернативой классическому корреляционному анализу является метод анализа флуктуаций относительно тренда [Пенг К., Хавлин С., Стэнли Г.], но и он оказывается неэффективен, если речь идет о сигналах малой длительности (здесь и далее, говоря о малой длительности, мы будем подразумевать, что она является малой с точки зрения проведения оценок необходимых характеристик в рамках заданной точности). В связи с этим развитие специальных подходов, способных устранить отмеченные недостатки существующих методов анализа длительных корреляций, является актуальной задачей, имеющей как теоретическое, так и практическое значение.

Как уже отмечалось, вейвлет-анализ является эффективным способом идентификации сигналов, например, распознавания речи. Кроме того, во многих приложениях возникает очень близкая задача – потребность изучать сигналы, характеризующие динамику ансамбля некоторых элементов, и извлекать из этих сигналов информацию о динамике отдельных элементов. Такие задачи могут возникать, например, в активной радиолокации при отслеживании движения группы объектов и измерении меняющегося со временем расстояния до них. Сходная ситуация характерна для пассивной радиолокации, когда проводится регистрация собственного радиоизлучения от нескольких объектов, и радиометрии. Кроме радиофизических систем, задача выделения сигнала отдельного элемента из коллективной динамики малого ансамбля возникает при изучении процессов кодирования информации в нейронных сетях [Левицки М., Летелье Дж., Вебер П.]. Во всех этих примерах существуют похожие проблемы – нужно идентифицировать сигнал отдельного элемента некоторого ансамбля и сделать это в условиях наличия шума большой интенсивности. Применение вейвлетов для эффективного решения данных задач либо в рамках отдельного алгоритма идентификации, либо в сочетании с другими методами распознавания образов является еще одним актуальным направлением теории анализа структуры сигналов.

Вейвлет-преобразование обладает рядом полезных свойств. Одним из них является возможность проводить численное дифференцирование зашумленных сигналов путем перехода в пространство вейвлет-коэффициентов. Особенностью этого подхода является то, что производная от сигнала может быть заменена производной базисной функции, заданной в аналитической форме. Это свойство позволяет эффективно решать задачи синтеза. Совместное использование вейвлетов и техники реконструкции динамических систем представляет собой новое направление, позволяющее разрабатывать эффективные методы оценок параметров автоколебательных режимов, что открывает широкие перспективы решения задач передачи информации с применением хаотических несущих сигналов.

Сформулированный круг проблем определяет **цель диссертационной работы**, которая состоит в развитии и применении специальных методов анализа структуры сигналов, основанных на вейвлет-преобразовании и позволяющих решать задачи исследования сложной динамики колебательных систем в условиях нестационарности, наличия флуктуаций, ограниченного объема выборки и ограниченной информации о режиме функционирования.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие **основные задачи**:

1. Выявить возможности и ограничения спектрального анализа многочастотных колебательных процессов на основе непрерывного вейвлет-преобразования в условиях нестационарности.

2. Разработать методики анализа структуры сигналов на основе непрерывного вейвлет-преобразования для изучения эффектов взаимодействия ритмов колебаний нестационарных многочастотных режимов динамики, в частности, позволяющие выявлять эффекты синхронизации колебаний, возникающие на сравнительно небольших участках времени, и модуляции колебаний с меняющимися во времени характеристиками.

3. Выявить возможности и ограничения метода мультифрактального анализа, основанного на непрерывном вейвлет-преобразовании, при исследовании структуры случайных и детерминированных процессов с несколькими различными типами сингулярностей.

4. Установить типичные изменения мультифрактальной динамики последовательностей времен возврата в секущую Пуанкаре, обусловленные эффектом фазовой синхронизации взаимодействующих автоколебательных систем, функционирующих в режиме динамического хаоса.

5. Выявить возможности мультифрактального формализма, основанного на непрерывном вейвлет-преобразовании, как метода корреляционного анализа в условиях ограниченного объема выборки.

6. Разработать новые эффективные методики идентификации сигналов типа последовательности одиночных импульсов на фоне шума большой интенсивности, использующие вейвлет-преобразование.

7. Изучить возможности использования вейвлетов при решении задач исследования динамики на входе пороговых систем по выходному точечному процессу, провести сопоставление с другими методами анализа структуры сигналов.

8. Разработать новый способ детектирования сигналов в системе связи, использующей хаотические несущие сигналы, с применением дискретного вейвлет-преобразования.

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в следующем:

1. Предложена мера когерентности на основе непрерывного вейвлет-

преобразования, позволяющая характеризовать изменения во времени взаимной динамики двух нестационарных колебательных процессов в выбранной полосе частот.

2. Предложен модифицированный метод исследования структуры сигналов – двойной вейвлет-анализ, позволяющий изучать эффекты амплитудной и частотной модуляции колебаний с меняющимися во времени характеристиками.

3. Проведены исследования ошибки идентификации мгновенных частот многочастотных колебательных процессов, базирующейся на непрерывном вейвлет-преобразовании, в зависимости от степени нестационарности и спектрального разрешения.

4. Впервые установлено, что фазовая синхронизация колебаний сопровождается характерными изменениями структуры последовательностей времен возврата в секущую Пуанкаре, включающими уменьшение степени мультифрактальности и численных значений показателей Гельдера, характеризующих локальную регулярность данных последовательностей.

5. Установлено наличие общих закономерностей изменения спектра сингулярностей для случаев хаотической синхронизации автоколебательных систем и стохастической синхронизации переключений в динамике передемпфированного бистабильного осциллятора с внешним воздействием.

6. Впервые показано, что метод мультифрактального анализа, базирующийся на вейвлет-преобразовании, является эффективным способом исследования корреляционных свойств случайных и детерминированных процессов в случаях, когда малый объем выборки ограничивает надежность проведения оценок на основе стандартного корреляционного анализа.

7. Выявлены условия, при которых применение вейвлетов позволяет решать задачу идентификации сигналов типа последовательности одиночных импульсов более качественно по сравнению со стандартным алгоритмом анализа главных компонент.

8. Предложена методика уменьшения ошибки идентификации сигналов типа последовательности одиночных импульсов, базирующаяся на сочетании вейвлет-анализа и анализа главных компонент.

9. Разработан параметрический метод идентификации импульсных сигналов на основе вейвлет-преобразования, позволяющий снизить ошибку идентификации до значения, близкого к теоретическому минимуму.

10. Выявлены возможности и ограничения использования вейвлетов при анализе динамики пороговых систем с внешним воздействием; показано, что в отсутствие собственной динамики таких систем более эффективное решение задачи идентификации режима хаотических автоколебаний на входе может осуществляться на основе расчета старшего показателя Ляпунова.



11. Разработан новый способ детектирования информационных сигналов в системе защищенной передачи информации, использующей принцип модуляции параметров генератора хаоса и хаотические несущие сигналы, который основан на совместном применении реконструкции динамических систем и дискретного вейвлет-преобразования.

**Научно-практическое значение результатов работы:**

В ходе проведенных исследований был разработан (или модифицирован) ряд специальных методов анализа структуры сигналов, которые позволяют изучать особенности сложной динамики колебательных систем различной природы – радиофизических, оптических, биофизических и т.д. В частности:

- предложен двойной вейвлет-анализ, позволивший обнаружить ряд новых эффектов в сложной динамике биологических систем и предложить новый подход к изучению динамики внутриклеточных процессов (путем его применения совместно с техникой интерференционной микроскопии);
- предложена методика корреляционного анализа, имеющая преимущества по сравнению с классическим подходом в ситуации, когда ограниченная длительность сигнала не обеспечивает возможность проведения достоверных расчетов автокорреляционной функции;
- предложены методики автоматической идентификации импульсных сигналов при наличии помех, позволяющие повысить надежность распознавания спайков нейронных ансамблей при анализе внеклеточных электрических сигналов как необходимого этапа решения задач исследования процессов кодирования информации в нейронных сетях;
- предложен новый принцип детектирования информационных сообщений, передаваемых в хаотическом несущем сигнале для обеспечения защиты системы многоканальной передачи информации от несанкционированного доступа.

Результаты проведенных исследований используются в учебном процессе на физическом факультете Саратовского государственного университета при чтении спецкурса “Анализ временных рядов” и в рамках лабораторных работ специализированного практикума “Методы анализа сложных сигналов”. Часть результатов включена в учебное пособие для студентов физического факультета.

Запатентовано устройство многоканальной конфиденциальной передачи информации, использующее новый принцип детектирования информационных сигналов.

**Достоверность научных выводов работы** основывается на соответствии результатов численных экспериментов и теоретических исследований, на соответствии с результатами, которые в ряде случаев можно получить

другими методами, на устойчивости применяемых методов анализа структуры сигналов к малым изменениям численной схемы, а также на согласованности с существующими теоретическими представлениями.

### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Для исследования сигналов с нестационарной многотональной модуляцией целесообразно применение метода двойного вейвлет-анализа, в рамках которого временные зависимости мгновенных частот и мгновенных амплитуд колебаний, идентифицируемые после однократного вейвлет-преобразования, рассматриваются в качестве анализируемых сигналов для повторного вейвлет-преобразования. Он позволяет получать информацию об изменениях во времени характеристик модуляции при условии, что разность частот модулирующего и модулируемого колебательных процессов превышает спектральное разрешение выбранного вейвлета.

2. Мультифрактальный анализ, базирующийся на непрерывном вейвлет-преобразовании, позволяет изучать корреляционные свойства случайных и детерминированных процессов в ситуации, когда длительность сигнала является недостаточной для проведения оценок закономерностей спада автокорреляционной функции с требуемой точностью. В отличие от классического корреляционного анализа, мультифрактальный формализм обеспечивает возможность рассматривать в несколько раз меньший объем выборки для достижения заданной точности и применим для обработки нестационарных данных.

3. Комбинированный алгоритм автоматического распознавания форм сигналов типа одиночного импульса, предусматривающий совместное применение вейвлет-анализа и метода анализа главных компонент, при наличии помех эффективнее использования этих методов по отдельности с точки зрения погрешности разделения близких по форме импульсов. Дополнительное снижение ошибки автоматической идентификации соответствующих сигналов обеспечивается включением процедуры предварительной фильтрации с подстройкой характеристик фильтра под индивидуальные особенности формы импульсов в качестве составной части вейвлетного метода их распознавания.

4. Использование техники реконструкции динамических систем совместно с дискретным вейвлет-преобразованием в системе защищенной передачи информации, использующей принцип модуляции параметров генератора хаотических колебаний и хаотические несущие сигналы, позволяет осуществлять детектирование нескольких информационных сообщений, одновременно передаваемых в одном несущем сигнале. Наличие только одного генератора хаотических колебаний, расположенного в передающем устройстве, устраняет проблему неидентичности генераторов приемника и передатчика,

являющейся одной из ключевых для систем защищенной передачи информации, реализующих процедуру детектирования на основе эффекта синхронизации колебаний.

5. Предложена методика оценки степени когерентности, основанная на непрерывном вейвлет-преобразовании и позволяющая изучать взаимную динамику колебательных процессов в условиях нестационарности мгновенных частот колебаний.

6. Установлено, что структурные изменения хаотических сигналов, связанные с фазовой синхронизацией, приводят к изменениям спектра сингулярностей, вычисленного по последовательностям времен возврата в текущую Пуанкаре, и могут быть диагностированы на основе мультифрактального анализа. Они включают уменьшение значений показателей Гельдера и уменьшение степени мультифрактальности.

7. Показано наличие общих закономерностей в изменении спектра сингулярностей при фазовой синхронизации хаоса в динамике взаимодействующих автоколебательных систем и при стохастической синхронизации переключений в динамике передемпфированного бистабильного осциллятора с внешним воздействием.

Совокупность сформулированных положений, методов и результатов следует классифицировать как решение крупной научной проблемы, состоящей в развитии новых методов анализа структуры нестационарных, коротких и зашумленных сигналов.

**Апробация работы и публикации.** Основные материалы диссертации были доложены на научных конференциях: «Stochaos: Stochastic and Chaotic Dynamics in the Lakes» (Англия, Амблесиде, 1999), «Control of Oscillations and Chaos» (COC'2000, Санкт-Петербург, 2000), «Synchronization of Chaotic and Stochastic Oscillations» (SYNCHRO-2002, Саратов, 2002), «Physics and Control» (PHYSCON, Санкт-Петербург, 2003, 2005), «INTAS-Workshop: Synchronization of Biological Oscillators» (Германия, Потсдам, 2004), «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС, Саратов, 1998, 2001, 2004, 2007), «Complex Dynamics and Fluctuations in Biomedical Photonics» (Сан-Хосе, США, 2004, 2006, 2007, 2008, 2009), «First International Work-Conference on the Interplay between Natural and Artificial Computation» (IWINAC 2005, Испания, Лас Пальмас, 2005), «Forum of Federation of European Neurosciences Societies» (FENS, Швейцария, Вилларс, 2008), «XXV Dynamics Days Europe 2005» (Германия, Берлин, 2005), «1<sup>st</sup> BioSim Conference» (Испания, Пальма де Майорка, 2005). «Современные проблемы электроники и радиопизики СВЧ» (Саратов, 2001), ежегодной всероссийской научной школе-семинаре «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине – 2008» (Саратов, 2008).

Результаты неоднократно обсуждались на научных семинарах кафедры радиофизики и нелинейной динамики Саратовского государственного университета, научно-образовательного центра REC-006 «Нелинейная динамика и биофизика» (Саратовский государственный университет), центра динамики сложных систем Потсдамского университета (Германия, Потсдам), центра биофизики и сложных систем Датского технического университета (Люнгбю, Дания), группы статистической физики и нелинейной динамики Гумбольдтского университета (Германия, Берлин), лаборатории нейродинамики университета Комплютенсе (Испания, Мадрид).

Материалы диссертации использовались при чтении спецкурса «Анализ временных рядов» студентам кафедры радиофизики и нелинейной динамики СГУ, при подготовке учебного пособия для спецпрактикума: А.Н. Павлов, «Методы анализа сложных сигналов», Саратов: Научная книга, 2008, 120 стр.

Часть результатов обсуждалась в 3-х диссертационных работах на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, выполненных под руководством соискателя аспирантами А.Р. Зиганшиным (2005), Д.В. Думским (2005) и А.Н. Тупицыным (2009).

По теме диссертации опубликовано 62 работы (без учета тезисов докладов): 2 главы в монографиях, 1 патент и 59 статей, включая 46 статей в журналах (из них 30 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ для опубликования результатов докторских диссертаций) и 13 статей в сборниках трудов международных конференций.

Результаты работы использованы при выполнении грантов: Министерства образования и науки РФ «Ведущие учебно-научные коллективы России» (2003-2006), Совета по грантам Президента РФ «Ведущие научно-педагогические коллективы России НШ-4319.2006.2» (2005-2007), Королевского общества Лондона (1997-1999), Intas 01-2061 (2002-2005), CRDF и Министерства образования и науки РФ «Научно-образовательный центр «Нелинейная динамика и биофизика» (НОЦ REC-006)» (2000-2007), РФФИ №04-02-16769, госконтрактов с ФЦНТП № 02.512.11.2111, № 02.442.11.7244, № 02.442.11.7181, а также индивидуальных грантов фондов Intas (YSF 99-4050, 1998) и CRDF (Y1-P-06-06, 2003-2006), гранта Президента России для молодых ученых (МК-2512.2004.2, 2004-2005), гранта совместной программы DAAD и Министерства образования и науки РФ «Михаил Ломоносов» (2008).

**Личный вклад автора.** Во всех работах автор участвовал в постановке задач, принимал активное участие в проведении численных исследований и интерпретации результатов. В работах, выполненных в соавторстве, соискателю принадлежит ведущая роль в разработке и применении методов анализа структуры сигналов на основе вейвлет-преобразования, а также в объяснении и интерпретации рассматриваемых процессов и явлений (за исклю-

чением публикаций, посвященных биологическим приложениям). В публикациях, носящих характер приложений специальных методов анализа структуры сигналов к исследованиям сложной динамики биологических систем, соискатель осуществлял разработку методов анализа и проводил численные исследования. Результаты по мультифрактальному анализу, идентификации импульсных сигналов и исследованию структуры точечных процессов были частично получены совместно с аспирантами А.Р. Зиганшиным и Д.В. Думским, которые защитили диссертации под руководством соискателя, а также аспирантом А.Н. Тупицыным, представившим к защите диссертацию, также выполненную под руководством соискателя. Результаты решения прикладных задач были получены совместно со специалистами из 10 университетов и научных центров Европы и Америки, которые осуществляли постановку биологических приложений методов анализа структуры сигналов, проводили натурные эксперименты и контролировали корректность сделанных выводов по соответствующим задачам, а также с коллективом кафедры биофизики МГУ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации 367 страниц, в том числе 122 страницы рисунков. Список литературы содержит 329 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность работы, определяются цели исследования, ставятся основные задачи, раскрывается научная новизна и научно-практическое значение полученных результатов, формулируются основные положения и результаты, выносимые на защиту.

**Первая глава** диссертационной работы представляет собой краткое введение в теорию непрерывного вейвлет-преобразования, изложение границ применимости данного математического аппарата на практике и описание предложенных соискателем специальных методик анализа структуры сигналов (мера когерентности, использующая вейвлет-преобразование, двойной вейвлет-анализ).

В отличие от классического спектрального анализа, основанного на преобразовании Фурье и оперирующего с гармоническими функциями, вейвлет-анализ допускает значительное разнообразие выбора базиса, по которому проводится разложение сигнала. В рамках широко используемой интерпретации вейвлет-преобразования как метода “математического микроскопа” можно говорить о том, что выбор солитоноподобной функции  $\psi(t)$ , рассматриваемой в качестве базисной, аналогичен заданию разрешения для объекта микроскопа: если выбранное разрешение позволяет увидеть нужные

детали, то вейвлет подходит для целей проводимого исследования. Более того, что немаловажно, последующий выбор объектива с лучшим разрешением уже не дает ничего нового.

В большинстве исследований, целью которых является идентификация мгновенных частот или амплитуд ритмов колебаний, используется обладающий хорошей локализацией вейвлет Морле

$$\psi(t) = \frac{1}{\pi^{1/4}} \left( e^{j2\pi f_0 t} - e^{-(2\pi f_0)^2/2} \right) e^{-t^2/2},$$

где  $f_0$  – параметр, называемый центральной частотой. После выбора “материнского вейвлета” на его основе формируется базис путем перемасштабирования и смещения данной функции. Непрерывное вейвлет-преобразование сигнала  $x(t)$  имеет следующий вид:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt.$$

Одной из основных особенностей данного преобразования является существование локального энергетического спектра и возможность изучать временную динамику мгновенных характеристик нестационарного процесса (мгновенных частот, амплитуд и фаз). Отдельное внимание в тексте диссертации уделяется проблеме нормировки коэффициентов вейвлет-преобразования в целях корректной оценки энергий и амплитуд колебательных процессов. Обсуждаются варианты визуализации результатов преобразования в виде так называемых “скелетонов” и “хребтов” поверхности вейвлет-коэффициентов. Чтобы нагляднее представить, как вейвлеты позволяют изучать локальную структуру сигналов, на рис. 1 представлены характерные примеры (случай переключения частоты и “чирпов” – процессов с монотонным изменением частоты).

Далее обсуждаются границы применимости вейвлет-анализа, знание которых необходимо для контроля достоверности полученных результатов. К числу ограничений вейвлет-преобразования относится наличие краевых эффектов и появление интерференций, если спектральное разрешение не позволяет разделить близко расположенные частоты.

При анализе нестационарных процессов может возникнуть целесообразность модификаций методов исследования структуры сигналов, чтобы извлечь более детальную информацию из экспериментальных временных рядов. Подобные модификации имеют практическую ценность при решении задач исследования синхронизации нестационарных колебательных процессов в условиях многочастотных режимов динамики. Один из стандартных методов изучения взаимной подстройки частот основан на расчете функции

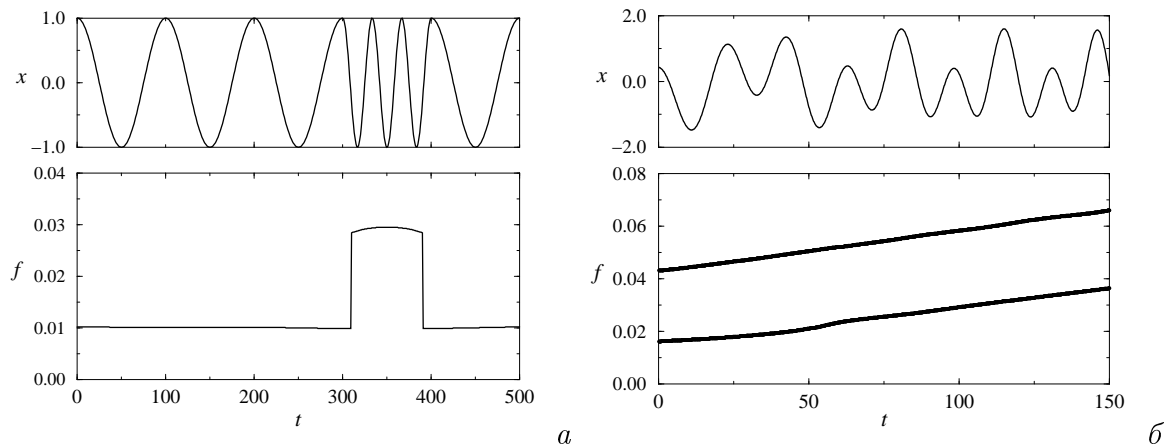


Рис. 1: Анализ процессов с меняющимися во времени характеристиками: переключения частоты (а), сумма линейных “чирпов” (б) (сверху изображены исходные сигналы, снизу – выделенные зависимости мгновенных частот ритмов колебаний)

когерентности или взаимного спектра, но этот подход оказывается неэффективен, если захват частот происходит лишь на отдельных участках экспериментальной записи, а сами частоты демонстрируют существенные вариации во времени, характерные для переходных процессов.

Для изучения нестационарной многочастотной динамики взаимодействующих автоколебательных систем в диссертационной работе предлагается следующая мера когерентности, основанная на вейвлет-преобразовании:

$$\Gamma_{\Delta}^2(t) = \frac{\max_{f \in \Delta} |E_{xy}(f, t)|^2}{\max_{f \in \Delta} E_{xx}(f, t) \max_{f \in \Delta} E_{yy}(f, t)},$$

где  $E_{xx}(f, t)$  и  $E_{yy}(f, t)$  – плотности энергии коэффициентов вейвлет-преобразования исследуемых сигналов  $x(t)$  и  $y(t)$ , а  $E_{xy}(f, t)$  – взаимная плотность энергии  $E_{xy}(f, t) = W_{xx}(f, t)W_{yy}^*(f, t)$ . Введенная мера когерентности является функцией времени, принимающей значения в диапазоне  $[0; 1]$ , которая позволяет отслеживать эволюцию взаимной динамики процессов  $x(t)$  и  $y(t)$  в выбранном диапазоне частот  $\Delta$ . Чем более синхронны ритмы колебаний в этом диапазоне, тем ближе  $\Gamma_{\Delta}$  к своему максимальному значению.

Рассматриваемая мера тестировалась на различных примерах нестационарной динамики (переходные процессы в динамике автоколебательных систем). Значительный интерес функция  $\Gamma_{\Delta}(t)$  представляет для исследования эффектов синхронизации в сложной динамике биологических систем, где типично наличие нестационарности и переходных процессов, обусловленных адаптацией объектов живой природы к постоянно меняющимся внешним условиям функционирования. Именно в подобных ситуациях наиболее ярко проявляются возможности вейвлет-преобразования как метода локализованного анализа структуры сигналов. Соответствующий пример приводится в приложении.

Другим вариантом динамики при наличии независимых частот может служить модуляция колебаний, которая встречается в функционировании самых разных систем. Наличие нестационарности может приводить к тому, что характеристики модуляции демонстрируют изменения во времени. Вследствие этого требуется рассматривать *нестационарные модулированные колебания*. Для изучения таких процессов в 1-й главе предложен модифицированный метод исследования структуры сигналов, названный двойным вейвлет-анализом.

Идея метода состоит в следующем. Временные зависимости мгновенной частоты и амплитуды модулируемого ритма колебаний, идентифицируемые после однократного вейвлет-преобразования, рассматриваются как исходные сигналы для еще одного (второго) вейвлет-преобразования, позволяющего детально проанализировать их структуру. Фактически, первое преобразование необходимо для того, чтобы перейти к мгновенным частотам и амплитудам колебательных процессов, а второе преобразование – для детального анализа этих мгновенных характеристик. Такой подход представляет интерес, когда характеристики модуляции меняются во времени.

Метод был протестирован на ряде примеров, включая хаотическую динамику автоколебательных систем, были исследованы возможности и ограничения данного подхода. Он может находить широкое применение при решении различных прикладных задач. В частности, на основе двойного вейвлет-анализа и интерференционной микроскопии предложен новый подход к исследованию сложной динамики внутриклеточных процессов. В работах, проводимых совместно с коллективами из МГУ и Датского технического университета, было впервые продемонстрировано и количественно охарактеризовано взаимодействие между отдельными процессами в форме амплитудной и частотной модуляции колебаний и высказаны предположения о возможном объяснении наблюдаемых эффектов.

Во **второй главе** диссертационной работы представлены основы мультифрактального анализа, базирующегося на непрерывном вейвлет-преобразовании. Обсуждается возможность привлечения данного математического аппарата для изучения эффектов синхронизации в динамике автоколебательных систем. Показывается, что мультифрактальный формализм является эффективным методом корреляционного анализа коротких и нестационарных процессов.

Теория мультифракталов широко используется для описания свойств самоподобия и сложного скейлинга, наблюдаемых в самых разных физических ситуациях. Важными представителями мультифракталов служат многие сигналы, регистрируемые в натуральных экспериментах, и для целого ряда практических задач несомненную ценность представляет наличие строгого



математического подхода к анализу сложной структуры процессов различной природы.

Известно несколько попыток расширить концепцию мультифракталов на случай сигналов. Одна из них основана на методе структурных функций, который достаточно часто использовался разными исследователями, особенно при изучении сильно развитой турбулентности. В начале 90-х годов был предложен более совершенный метод “максимумов модулей вейвлет-преобразования” [Мьюзи Ж., Бакри Э., Арнеодо А.], имеющий ряд существенных преимуществ. Существует мнение, что данный подход является наиболее мощным в настоящее время методом статистического описания структуры неоднородных процессов.

В рамках мультифрактального анализа исследуется локальная регулярность сигналов с помощью показателей Гельдера, а статистическое описание осуществляется в терминах спектра сингулярностей. Вычисление показателей Гельдера может производиться путем анализа степенного поведения коэффициентов вейвлет-преобразования, однако в теории мультифракталов предпочитают осуществлять расчеты на основе статистических функций, которые обеспечивают более надежные оценки вычисляемых характеристик. На первом этапе проводится расчет вейвлет-преобразования и выделение скелетона, на втором этапе строятся статистические функции и вычисляются скейлинговые экспоненты мультифрактального анализа, а на их основе – показатели Гельдера. Данный анализ часто называют методом *мультифрактального формализма*, подразумевая под этим термином подход, в рамках которого спектр сингулярностей определяется с помощью преобразования Лежандра. В диссертации обсуждаются возможности и ограничения данного метода. Отмечается возможность анализировать процессы с несколькими типами сингулярного поведения (однако в результате будет получена только верхняя огибающая истинного спектра). В целях повышения точности расчета спектра сингулярностей предлагается исключить из рассмотрения линии локальных экстремумов вейвлет-преобразования, обрывающиеся на малых масштабах.

Рассмотрено несколько примеров применения мультифрактального анализа. В качестве одного из них проводилось его тестирование с точки зрения возможности диагностики известного явления синхронизации хаоса в динамике взаимодействующих автоколебательных систем. Данное взаимодействие отражается в структуре характерных временных интервалов, таких как времена возврата в секущую Пуанкаре. Согласно ряду работ [Афраймович В.С., Заславский Г.М. и др.], распределение времен возврата динамической системы может характеризоваться мультифрактальными свойствами.

В ходе исследований, которые проводились на модели двух взаимодей-

ствующих систем Ресслера, было установлено, что при фазовой синхронизации хаотических колебаний происходит уменьшение значений показателей Гельдера и ширины спектра сингулярностей, вычисленных по последовательностям времен возврата. В рассмотренном примере (рис. 2) синхронизация хаоса может интерпретироваться как эффект потери мультифрактальности в хаотической динамике.

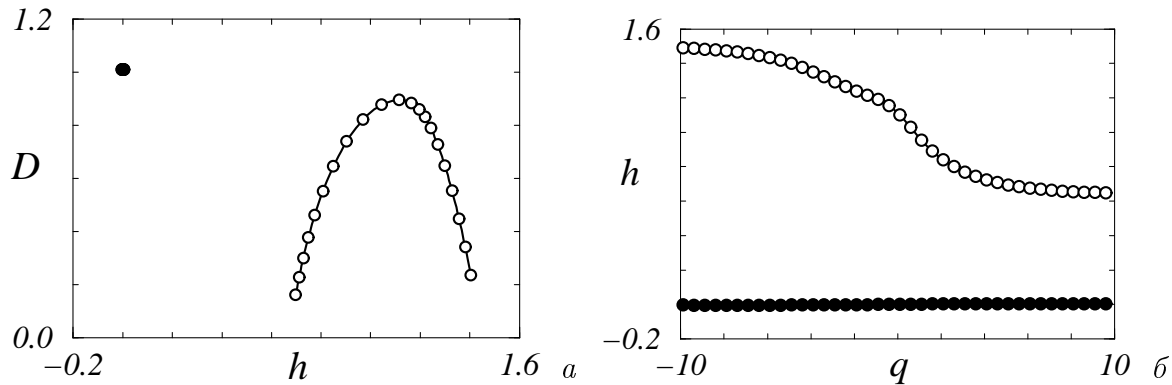


Рис. 2: Изменения спектра сингулярностей (а) и значений показателя Гельдера (б) при фазовой синхронизации хаотических колебаний (черные кружки соответствуют синхронному режиму, белые – несинхронному)

Более детальные исследования на самых разных модельных системах показали, что существует набор характерных изменений структуры последовательностей времен возврата, который включает: уменьшение степени мультифрактальности, понижение значений показателей Гельдера, уменьшение различий между гельдеровскими показателями, характеризующими локальную регулярность последовательностей времен возврата для каждой из взаимодействующих систем. Такие изменения проиллюстрированы для связанных систем Лоренца и других моделей. Далее было исследовано влияние шума на мультискейлинговую структуру последовательностей времен возврата для различных режимов динамики и отмечено сходство эффектов при хаотической синхронизации автоколебательных систем и стохастической синхронизации переключений в динамике передемпфированного бистабильного осциллятора с внешним воздействием.

С точки зрения практического применения важным аспектом является возможность использования мультифрактального формализма как альтернативного метода корреляционного анализа. Гельдеровские показатели несут информацию о корреляционных свойствах сигнала, а их расчет может проводиться по коротким и нестационарным процессам. В частности, на примере винеровского случайного процесса иллюстрируется, что расчет автокорреляционной функции (АКФ) по малой выборке приводит к существенному разбросу оценок закономерностей спада корреляций, который на порядок больше, чем для мультифрактального анализа.

Проводится сопоставление результатов мультифрактального анализа с расчетами автокорреляционной функции для процесса Орнштейна-Уленбека. На рис. 3, *а* изображена теоретически ожидаемая нормированная АКФ и результаты ее расчета по выборочным функциям длительностью 3000 точек. Наличие сравнительно короткой выборки (с точки зрения достоверной оценки закономерностей поведения АКФ) приводит в данном случае к значительным погрешностям при попытке аппроксимировать закон спада корреляций по рассчитанным оценочным характеристикам, особенно в области больших значений  $\tau$ .

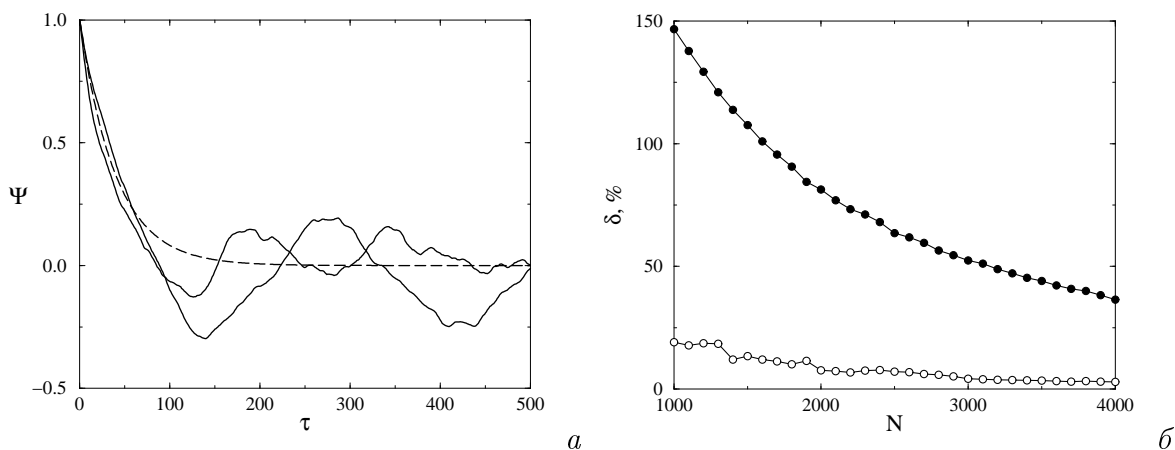


Рис. 3: Расчет АКФ по реализациям процесса Орнштейна-Уленбека (сплошная линия) и теоретически ожидаемая зависимость (пунктир) (*а*); относительная ошибка определения характеристик для классического корреляционного анализа (черные кружки) и метода мультифрактального формализма (белые кружки) в зависимости от числа точек анализируемого временного ряда (*б*)

На рис. 3, *б* проводится сопоставление классического корреляционного анализа и метода мультифрактального формализма с точки зрения дисперсии оценок вычисляемых характеристик. Для представления результатов на одном графике приводятся относительные погрешности расчета скорости спада АКФ и показателей Гельдера в зависимости от длительности выборки (результат усреднения по 200 реализациям процесса Орнштейна-Уленбека для области  $\tau > 100$ ).

Относительная погрешность расчета оцениваемых характеристик в случае мультифрактального анализа в несколько раз (иногда на порядок) меньше, чем для классической АКФ. Таким образом, метод мультифрактального анализа, базирующийся на вейвлет-преобразовании, может рассматриваться в качестве инструмента исследования корреляционных свойств в случаях, когда небольшой объем выборки экспериментальных данных ограничивает надежность проведения оценок на основе стандартного корреляционного анализа.

Аналогичные выводы можно сделать и для динамики детерминирован-

ных систем. В частности, сопоставление результатов корреляционного анализа последовательностей времен возврата в секущую Пуанкаре для хаотических аттракторов ряда модельных систем позволило убедиться в том, что для достижения сопоставимой погрешности применение метода мультифрактального формализма, основанного на вейвлет-преобразовании, позволяет ограничиться существенно меньшим объемом выборки, чем расчет огибающей АКФ.

**Третья глава** диссертационной работы посвящена проблеме идентификации сигналов типа последовательности одиночных импульсов при наличии помех с помощью вейвлетов. Соответствующие исследования были “индуцированы” работами по изучению процессов кодирования информации в нейронных сетях. Для того, чтобы проводить исследование генерируемого нейронами информационного кода на основе экспериментальных данных (записей внеклеточного электрического потенциала), необходимо вначале отсортировать спайки, установив, с каким нейроном ассоциируется тот или иной потенциал действия. Предварительный этап изучения процессов кодирования информации фактически сводится к необходимости решения *радиофизической задачи* о выделении сигнала из смеси сигнала и шума и об идентификации импульсов, имеющих незначительные различия, в присутствии помех. Отметим, что похожие задачи возникают и непосредственно в радиофизике, например, в радиолокации (при отслеживании движения группы объектов). Сходная проблема возникает при распознавании речи и выделении голосовых сообщений в условиях сильных помех. Поэтому разрабатываемые методы идентификации имеют широкую область применения, и в диссертации рассматривается достаточно общая терминология сигналов типа последовательности одиночных импульсов.

Теоретически, задача состоит в том, чтобы из экспериментальных данных выделить несколько последовательностей совпадающих по форме импульсов, каждая из которых, предположительно, генерируется каким-то одним элементом малого ансамбля. На практике эта задача является технически очень сложной из-за присутствия помех. К числу наиболее эффективных методов решения данной задачи относятся анализ главных компонент (АГК) и метод на основе вейвлет-преобразования, так называемый “вейвлетный классификатор импульсов” (ВКИ). Проводится сопоставление этих методов и сформулированы условия, при которых целесообразно пользоваться тем или иным подходом. Принципиальным моментом является их различная чувствительность к частотному диапазону флуктуаций. Например, меняя частоту среза НЧ-фильтра, можно существенно уменьшить ошибки идентификации для методов, основанных на вейвлет-преобразовании, тогда как на результаты классического метода АГК такая фильтрация повлияет

в значительно меньшей степени.

В диссертации предложены два новых способа решения задачи распознавания сигналов импульсного типа при наличии помех. Идея первой методики состоит в построении комбинированного алгоритма, предполагающего совместное применение вейвлетов и АГК. Главным недостатком распознавания образов на основе вейвлетов является сложность выбора характеристик, поскольку в результате дискретного преобразования получается набор из большого числа коэффициентов, и из общих соображений непонятно, какие из них выбирать, чтобы решить задачу идентификации сигнала. Для анализа главных компонент такой проблемы не существует, хотя этот подход обладает меньшими возможностями. Поэтому главная идея предлагаемого способа состояла в том, чтобы избавить вейвлетный метод распознавания от его главного недостатка – необходимости выбора характеристик из большого набора.

Первый шаг предлагаемого алгоритма состоит в нахождении типичных форм сигналов. С этой целью применяется обычный метод АГК для всех импульсов, полученных в эксперименте. Затем проводится усреднение форм импульсов в малой окрестности центра каждого кластера. Второй шаг предполагает проведение вейвлет-анализа найденных усредненных форм сигналов и поиск коэффициентов вейвлет-преобразования, которые наилучшим образом показывают различия между ними. Иными словами, коэффициенты выбираются не произвольно, а с учетом индивидуальных особенностей конкретных форм импульсов. На третьем шаге выбранные вейвлет-коэффициенты вычисляются для всех импульсов из экспериментальных данных, и полученные значения рассматриваются в качестве характеристик для идентификации. В результате использования такого алгоритма кластеры лучше “отделяются” друг от друга. Применение комбинированного подхода как к тестовым сигналам, так и к экспериментальным данным подтвердило, что он позволяет уменьшить ошибку распознавания сигналов.

Для более качественного решения задачи идентификации сигналов был предложен еще один метод, главная идея которого состояла во включении частоты среза фильтра в качестве одного из параметров вейвлет-преобразования. Поэтому этот метод был назван параметрическим вейвлет-анализом с адаптивной фильтрацией (ПВАФ). В предположении нормального распределения шума были проведены аналитические расчеты и получена приближенная формула для минимальной ошибки идентификации. Показано, что для обеспечения минимальной ошибки необходимо добиться максимума параметра разделения кластеров  $\Delta$ , который прямо пропорционален расстоянию между центрами кластеров в пространстве вейвлет-коэффициентов и обратно пропорционален стандартному отклонению измерительного шума.

Алгоритм ПВАФ включает процедуру предварительной фильтрации непосредственно в качестве составной части методики выбора оптимальных характеристик для разделения импульсов по группам. На тестовых примерах и в ходе анализа экспериментальных данных продемонстрировано преимущество разработанного подхода по сравнению с известными методами, такими как АГК и ВКИ. В частности, на тестовых примерах было показано, что метод ПВАФ позволяет снизить ошибку автоматического разделения сигналов по группам до значения, близкого к теоретическому минимуму. Один из таких примеров представлен на рис. 4.

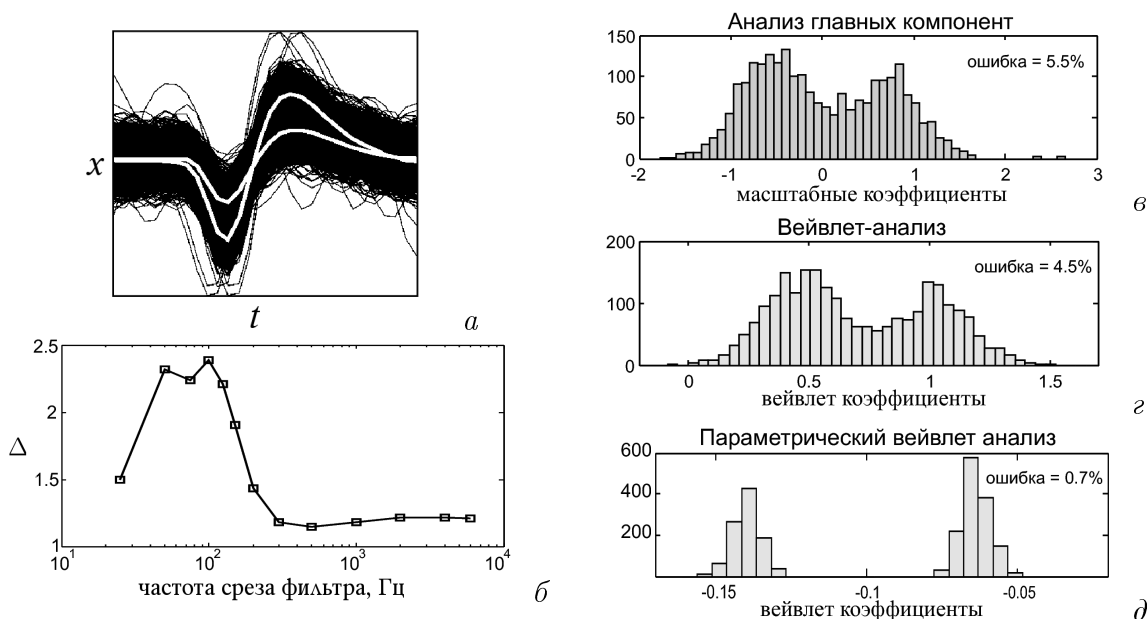


Рис. 4: Формы всех импульсов, которые необходимо разделить (а), зависимость параметра разделения кластеров от частоты среза фильтра нижних частот (б), гистограммы вычисленных характеристик для разных методов: анализ главных компонент (в), метод ВКИ (г) и предложенный метод ПВАФ (д)

Из рис. 4, б видно, что параметр разделения кластеров  $\Delta$  имеет ярко выраженный пик. При фильтрации данных с соответствующей частотой разница между импульсами в пространстве вейвлет-коэффициентов идентифицируется наиболее четко. На рис. 4, в, г, д показаны гистограммы характеристик, вычисленных с помощью разных алгоритмов. Предложенный метод ПВАФ позволил снизить величину ошибки до примерно 0.7%. Согласно теоретическим результатам (в предположении нормального распределения шума), для максимального значения  $\Delta = 2.39$  минимум величины ошибки составляет примерно 0.3%.

В четвертой главе диссертационной работы рассматривается проблема изучения особенностей динамики колебательных систем в условиях ограничения информации, доступной для анализа. Вначале проводится анализ структуры точечных процессов в рамках следующей задачи: если точеч-

ный процесс (сигнал на выходе порогового устройства) служит отражением сложного режима колебаний некоторой динамической системы с непрерывным временем, то можно ли идентифицировать состояние данной системы на основе информации, которая содержится в точечном процессе?

Рассмотрены два случая: пороговое устройство в отсутствие собственной динамики и при наличии подпороговых колебаний. Для первого случая были выбраны простейшие модели, одной из которых является модель пересечения порога, предполагающая запись интервалов времени между пересечениями фиксированного уровня входным сигналом. Для аттрактора динамической системы эти интервалы соответствуют временам возврата в секущую плоскость. Анализ динамики точечных процессов может проводиться на основе вейвлет-преобразования, однако привлечение вейвлетов не позволяет *однозначно* идентифицировать режим динамики на входе порогового устройства, и результаты анализа в значительной степени зависят от выбора порогового уровня. Смещение этого уровня приводит к довольно существенному изменению спектра мощности. В результате на основе вейвлет-преобразования удается выявить наличие характерных масштабов, но нельзя утверждать, что регистрируемые при различных пороговых уровнях точечные процессы соответствуют одному и тому же входному сигналу. Для осуществления подобной идентификации можно воспользоваться расчетами старшего ляпуновского показателя. В работе представлен метод вычисления показателя Ляпунова по точечным процессам, основанный на аппроксимации усредненной мгновенной частоты и позволяющий существенно снизить погрешность за счет уменьшения ошибок ориентации векторов. Сформулированы условия, при которых метод обеспечивает достоверные расчеты (среднее время возврата не должно превышать характерный временной масштаб, приближенно соответствующий времени Ляпунова).

Ситуация меняется, если рассматриваются пороговые системы, демонстрирующие собственную динамику (подпороговые колебания). Теперь уже расчеты динамических характеристик, таких как ляпуновские показатели, будут приводить к неправильной интерпретации результатов, так как даже при периодическом внешнем воздействии отклик может существенно варьироваться. Соответствующий пример для динамики нейрона приводится в диссертации. Применение двойного вейвлет-анализа в этом случае позволяет проводить исследование структуры подпороговых колебаний. Ценность привлечения вейвлетов важна потому, что для нейронов характерны короткие, нестационарные процессы, связанные с адаптацией, когда при одном и том же воздействии активность нейрона является максимальной вначале, но отклик быстро меняется. На основе исследования стабильности частоты отклика можно решать задачи классификации нейронов с точки зрения их

фильтрационных свойств. В диссертации отмечается, что многие нейроны можно рассматривать как фильтры с различными частотными характеристиками. В частности, были выявлены три основных варианта поведения: а) НЧ-фильтрация внешнего воздействия, б) существование “оптимальной” частоты воздействия (или полосовая фильтрация), и в) случай слабой зависимости от частоты воздействия.

Далее рассматривается другая проблема – применение хаотических несущих сигналов для защиты передаваемой информации. Она также предполагает решение задачи исследования сложных режимов динамики в условиях ограниченной информации о динамической системе, генерирующей анализируемые колебательные процессы. Сама по себе проблема разработки защищенных систем связи имеет длительную историю. Один из новых способов ее решения состоит в применении для передачи сообщений широкополосных хаотических сигналов. Интенсивные исследования в этом направлении ведутся с начала 90-х годов [Куомо К.М., Оппенгейм А.В. и др.]. В самых первых работах было предложено использовать явление хаотической синхронизации для выделения информационного сигнала из хаотического несущего. Предлагался ряд конкретных способов решения проблемы, основанных на применении идентичных генераторов хаоса в передающем и приемном устройствах – хаотическая маскировка, модуляция параметров. Однако методы, основанные на явлении синхронизации, имеют ряд принципиальных недостатков, наиболее существенным из которых является требование идентичности генераторов хаотических колебаний в приемнике и передатчике. Если параметры соответствующих генераторов будут отличаться более чем на 1–2%, то данные методы становятся неэффективными. Разработка новых, более “практичных” способов защиты информации, передаваемой по каналу связи, на протяжении многих лет проводится отечественными учеными (можно отметить, в частности, работы по данной тематике группы А.С. Дмитриева).

Важным обстоятельством для дальнейшего прогресса в области использования динамического хаоса в коммуникациях является формулировка иных принципов модуляции и детектирования информационных сообщений – чем более разнообразными являются подходы к решению данной проблемы, тем более высокая степень защиты передаваемых сообщений может быть обеспечена. В диссертации предлагается альтернативный принцип детектирования сообщений, передаваемых в хаотическом несущем сигнале: сочетание техники реконструкции динамических систем и дискретного вейвлет-преобразования. Использование реконструкции для детектирования сообщений позволяет определять текущие значения параметров генератора хаотических колебаний, путем модуляции которых передаются информацион-



ные сигналы. Дискретные вейвлеты помогают свести систему обыкновенных дифференциальных уравнений к системе алгебраических уравнений для определения параметров передающего генератора (решая при этом одну из технических проблем, связанных с необходимостью дифференцирования зашумленных сигналов). Одним из достоинств теории вейвлетов является возможность устранения некорректности операции дифференцирования зашумленных временных рядов путем перехода в пространство вейвлет-коэффициентов и замены производной от сигнала на производную от вейвлета. Это позволяет существенно снизить ошибки детектирования.

По сравнению с использованием техники реконструкции в том варианте, который был известен ранее, подход, предлагаемый в данной диссертационной работе, обеспечивает не только быстрые вычисления, но и значительно более высокую помехоустойчивость. Получен патент на устройство защищенной передачи информации. Один из примеров работоспособности метода для случая передачи графической информации представлен на рис. 5. В данном примере в одном несущем передавались три сигнала, содержащих информацию об оттенках трех цветов, формирующих цветное изображение.

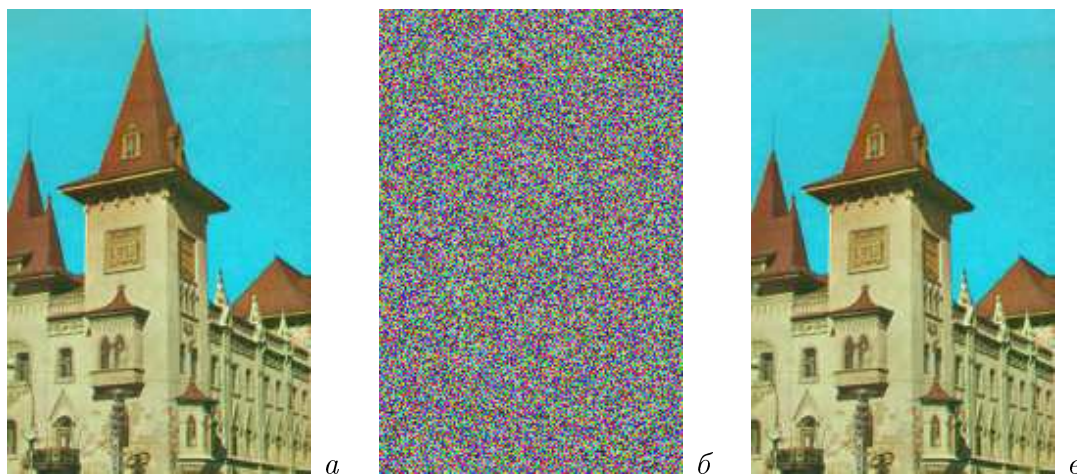


Рис. 5: Передача графической информации (цветное изображение): передаваемое изображение (а), изображение в канале связи (б), восстановленное изображение (в)

В приложении рассматривается применение вейвлет-анализа к исследованиям динамики нефронов – структурных элементов почки. С точки зрения нелинейной динамики нефрон представляет собой интересный объект, для которого переход от регулярного режима функционирования к хаотическому наблюдается при изменении состояния организма от нормы к гипертонии, и, следовательно, изучение проблемы гипертонии на микроскопическом уровне структурных элементов почки может представлять собой одно из практических приложений теории нелинейных колебаний.

Почечная авторегуляция кровотока на уровне отдельных нефронов включает два механизма, которые приводят к колебаниям с двумя независимыми

частотами – быстрый ритм, обусловленный сокращением сосудов, и медленный ритм, обусловленный задержкой в цепи обратной связи. В рамках исследований, проводившихся совместно с ведущими специалистами в области почечной авторегуляции из университетов Дании и США, с применением непрерывного вейвлет-преобразования (в том числе, методов, предложенных в данной диссертационной работе) удалось обнаружить, что при гипертонии:

- ослабляется эффект синхронизации колебаний взаимодействующих нефронов: полная синхронизация, наблюдавшаяся при нормальном артериальном давлении, сменяется эффектом частичной синхронизации;

- усиливаются эффекты амплитудной/частотной модуляции миогенной динамики более медленным ритмом колебаний; при этом сам факт наличия частотной модуляции впервые выявлен на основе вейвлет-анализа.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложена мера когерентности на основе непрерывного вейвлет-преобразования, позволяющая изучать взаимную динамику колебательных процессов в выбранном частотном диапазоне. Данная мера применима для анализа нестационарных колебательных режимов в условиях значительных изменений во времени мгновенных частот колебаний.

2. Предложен двойной вейвлет-анализ, предусматривающий использование временных зависимостей мгновенных частот и мгновенных амплитуд колебаний (идентифицируемых после однократного вейвлет-преобразования) в качестве исходных сигналов для второго вейвлет-преобразования. Данный метод позволяет детально исследовать эффекты нестационарной многотональной модуляции. Применение двойного вейвлет-анализа позволило, в частности, впервые обнаружить и количественно охарактеризовать эффекты взаимодействия ритмических процессов во внутриклеточной динамике.

3. Выявлены возможности и ограничения мультифрактального анализа, основанного на непрерывном вейвлет-преобразовании. Показано, что в целях повышения точности расчета спектра сингулярностей по временному ряду на основе метода мультифрактального формализма целесообразно исключить из рассмотрения линии локальных экстремумов вейвлет-преобразования, обрывающиеся на малых масштабах.

4. Установлено, что при фазовой синхронизации хаотических автоколебаний в динамике взаимодействующих систем происходят характерные изменения в структуре последовательностей времен возврата в текущую Пуанкаре, которые состоят в уменьшении степени мультифрактальности, уменьшении численных значений показателей Гельдера, характеризующих локальную регулярность сигналов, устранении различий скейлинговых характеристик режимов динамики каждой системы. Эффект уменьшения сте-

пени мультифрактальности (вплоть до перехода к монофрактальной динамике) наблюдается и при стохастической синхронизации переключений в динамике передемпфированного бистабильного осциллятора с внешним воздействием.

5. Мультифрактальный анализ, использующий вейвлет-преобразование, представляет собой эффективный метод исследования корреляционных свойств случайных и детерминированных процессов. Он имеет преимущества по сравнению с расчетом автокорреляционной функции при обработке сигналов малой длительности. Применение вейвлетов в качестве составной части данного метода позволяет решать задачи корреляционного анализа нестационарных случайных процессов.

6. Предложена методика уменьшения ошибки идентификации импульсных сигналов за счет специального выбора коэффициентов вейвлет-преобразования и совместного применения вейвлет-анализа и стандартного алгоритма АГК. Показано, что предложенная методика снижает ошибку идентификации импульсов по сравнению с использованием этих подходов по отдельности.

7. Предложен параметрический метод автоматической сортировки импульсных сигналов (параметрический вейвлет-анализ с адаптивной фильтрацией). Принципиальной особенностью метода является то, что он предполагает подстройку характеристик фильтра под индивидуальные особенности формы импульсов. Алгоритм ПВАФ включает процедуру предварительной фильтрации непосредственно в качестве составной части методики выбора оптимальных характеристик для разделения импульсов по группам. На основе тестовых исследований и анализа экспериментальных данных продемонстрировано преимущество разработанного подхода по сравнению с известными методами, такими как АГК и ВКИ. Показано, что предлагаемый подход позволяет снизить ошибку автоматической идентификации форм сигналов до значения, близкого к теоретическому минимуму.

8. При изучении хаотических режимов автоколебаний на входе порогового устройства, не имеющего собственной динамики, по точечному процессу вейвлет-преобразование не позволяет надежно решать задачу идентификации режима динамики при варьировании величины порога. Соответствующая идентификация может проводиться на основе расчета старшего показателя Ляпунова, для повышения точности оценки которого целесообразно применять подход, основанный на аппроксимации усредненной мгновенной частоты. В этом случае задача идентификации может быть решена при условии, что среднее значение времени возврата не превышает характерный временной масштаб, приблизительно соответствующий времени Ляпунова. При изучении пороговых систем, обладающих собственной динамикой,

кой, непрерывное вейвлет-преобразование позволяет получать информацию о подпороговых колебаниях в рамках метода двойного вейвлет-анализа.

9. Предложен метод детектирования информационных сигналов в системе защищенной многоканальной передачи информации, использующей хаотические несущие сигналы и принцип модуляции параметров генератора хаоса для передачи информационных сообщений. Данный метод основан на применении реконструкции динамических систем и дискретного вейвлет-преобразования. Его достоинством является наличие только одного генератора хаотических сигналов, расположенного в передающем устройстве, в связи с чем отсутствует проблема неидентичности генераторов приемника и передатчика, которая существенно влияет на эффективность систем связи, использующих эффект синхронизации хаотических колебаний.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Главы в монографиях

1. Janson, N. B. Global reconstruction: application to biological data and secure communication / N. B. Janson, A. N. Pavlov, V. S. Anishchenko // Chaos and its reconstruction ; ed. by Gouesbet G., Meunier-Guttin-Cluzel S. – New York: Novascience publishers. – 2003. – P. 287–317.
2. Brazhe, A. R. Interference microscopy for cellular studies / A. R. Brazhe, N. A. Brazhe, A. N. Pavlov, G. V. Maksimov, E. Mosekilde, O. V. Sosnovtseva // Handbook of research on systems biology applications in medicine. – Hershey: IGI Global. – 2009. – Chapter 37. – P. 653–669.

### Статьи

3. Павлов, А. Н. Реконструкция динамических систем / А. Н. Павлов, Н. Б. Янсон, В. С. Анищенко // Радиотехника и электроника. – 1999. – Т. 44, вып. 9. – С. 1075–1092.
4. Янсон, Н. Б. Глобальная реконструкция по нестационарным данным / Н. Б. Янсон, А. Н. Павлов, Т. Капитаниак, В. С. Анищенко // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25, вып. 10. – С. 74–81.
5. Павлов, А. Н. Реконструкция динамических систем по сигналам малой длительности / А. Н. Павлов, Н. Б. Янсон, Т. Капитаниак, В. С. Анищенко // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25, вып. 11. – С. 7–13.
6. Pavlov, A. N. Extracting dynamics from return times / A. N. Pavlov, E. Mosekilde, V. S. Anishchenko // Stochaos: stochastic and chaotic dynamics in the lakes, AIP Conf. Proc. ; ed. by Broomhead D. S., Luchinskaya E. A., McClintock P. V. E., Mullin T. – 1999. – № 502. – P. 611–616.

7. Павлов, А. Н. Вычисление старшего ляпуновского показателя по последовательности времен возврата: возможности и ограничения / А. Н. Павлов, В. С. Анищенко // Изв. вузов, Прикладная нелинейная динамика. – 1999. – Т. 7, № 4. – С. 59–74.
8. Pavlov, A. N. Extracting dynamics from threshold-crossing interspike intervals: possibilities and limitations / A. N. Pavlov, O. V. Sosnovtseva, E. Mosekilde, V. S. Anishchenko // Phys. Rev. E. – 2000. – Vol. 61, № 5. – P. 5033–5044.
9. Pavlov, A. N. Diagnostic of cardio-vascular disease / A. N. Pavlov, N. B. Janson, V. S. Anishchenko, V. I. Gridnev, P. Ya. Dovgalevsky // Chaos, Solitons and Fractals. – 2000. – Vol. 11, № 5. – P. 807–814.
10. Павлов, А. Н. Определение динамических характеристик хаотических колебаний при анализе точечных процессов / А. Н. Павлов, В. С. Анищенко // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26, вып. 15. – С. 58–64.
11. Анищенко, В. С. Сравнительный анализ методов классификации состояния сердечно-сосудистой системы при стрессе / В. С. Анищенко, Н. Б. Игошева, А. Н. Павлов, И. А. Хованов, Т. Якушева // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2000. – № 2. – С. 24–37.
12. Pavlov, A. N. Interspike and interburst intervals: Nonlinear dynamics approach / A. N. Pavlov, E. V. Silantyeva, E. S. Sof'yina, V. S. Anishchenko // Control of oscillations and chaos (COC'2000), Proc. of the Int. Conf. ; ed. by Chernousko F. L., Fradkov A. L. – 2000. – Vol. 3. – P. 445–448.
13. Pavlov, A. N. Chaotic dynamics from interspike intervals / A. N. Pavlov, O. V. Sosnovtseva, E. Mosekilde, V. S. Anishchenko // Phys. Rev. E. – 2001. – Vol. 63, № 3. – P. 036205.
14. Pavlov, A. N. Scaling features of texts, images and time series / A. N. Pavlov, W. Ebeling, L. Molgedey, A. R. Ziganshin, V. S. Anishchenko // Physica A. – 2001. – Vol. 300. – P. 310–324.
15. Павлов, А. Н. Мультифрактальный анализ временных рядов / А. Н. Павлов, А. Р. Зиганшин, В. С. Анищенко // Изв. вузов, Прикладная нелинейная динамика. – 2001. – Т. 9, № 3. – С. 39–53.
16. Pavlov, A. N. Multiscality in the dynamics of coupled chaotic systems / A. N. Pavlov, O. V. Sosnovtseva, A. R. Ziganshin, N. H. Holstein-Rathlou, E. Mosekilde // Physica A. – 2002. – Vol. 316. – P. 233–249.
17. Sosnovtseva, O. V. Bimodal oscillations in nephron autoregulation / O. V. Sosnovtseva, A. N. Pavlov, E. Mosekilde, N.-H. Holstein-Rathlou // Phys. Rev. E. – 2002. – Vol. 66. – P. 061909.
18. Pavlov, A. N. Scaling features of multimode motions in coupled chaotic oscillators / A. N. Pavlov, O. V. Sosnovtseva, E. Mosekilde // Chaos,

- Solitons and Fractals. – 2003. – Vol. 16. – P. 801–810.
19. Pavlov, A. N. Return times dynamics: role of the Poincare section in numerical analysis / A. N. Pavlov, D. V. Dumsky // Chaos, Solitons and Fractals. – 2003. – Vol. 18. – P. 795–801.
  20. Павлов, А. Н. Мультифрактальный анализ хаотической динамики взаимодействующих систем / А. Н. Павлов, О. В. Сосновцева, А. Р. Зиганшин // Изв. вузов, Прикладная нелинейная динамика. – 2003. – Т. 11, № 2. – С. 39–54.
  21. Sosnovtseva, O. V. Synchronization phenomena in multimode dynamics of coupled nephrons / O. V. Sosnovtseva, A. N. Pavlov, E. Mosekilde, N.-H. Holstein-Rathlou // Изв. вузов, Прикладная нелинейная динамика. – 2003. – Т. 11, № 3. – С. 133–147.
  22. Павлов, А. Н. Динамика времен возврата в зависимости от выбора секущей Пуанкаре / А. Н. Павлов, Д. В. Думский // Изв. вузов, Прикладная нелинейная динамика. – 2003. – Т. 11, № 6. – С. 65–74.
  23. Sosnovtseva, O. V. Bimodal dynamics of nephron autoregulation / O. V. Sosnovtseva, A. N. Pavlov, E. Mosekilde, N.-H. Holstein-Rathlou // Physics and Control (PHYSCON-2003), Proc. of the Int. Conf. – 2003. – P. 283–288.
  24. Sosnovtseva, O. V. Double-wavelet approach to study frequency and amplitude modulation in renal autoregulation / O. V. Sosnovtseva, A. N. Pavlov, E. Mosekilde, N.-H. Holstein-Rathlou, D. J. Marsh // Phys. Rev. E. – 2004. – Vol. 70. – P. 031915.
  25. Думский, Д. В. Обусловленные стрессом изменения динамики артериального кровяного давления белых крыс / Д. В. Думский, О. А. Климова, А. Н. Павлов // Изв. вузов, Прикладная нелинейная динамика. – 2004. – Т. 12, № 1–2. – С. 26–39.
  26. Павлов, А. Н. Применение двойного вейвлет-анализа для исследования эффектов модуляции в динамике нефронов / А. Н. Павлов, О. В. Сосновцева // Изв. вузов, Прикладная нелинейная динамика. – 2004. – Т. 12, № 6. – С. 105–117.
  27. Pavlov, A. N. Multimode dynamics of arterial blood pressure in healthy rats and its multifractal characterization / A. N. Pavlov, D. V. Dumsky, A. R. Ziganshin, O. A. Klimova, V. S. Anishchenko // Complex dynamics, fluctuations, chaos and fractals in biomedical photonics, Proc. of SPIE; ed. by Tuchin V. V. – 2004. – Vol. 5330. – P. 66–73.
  28. Sosnovtseva, O. V. Interference microscopy under double-wavelet analysis: a new tool to studying cell dynamics / O. V. Sosnovtseva, A. N. Pavlov, N. A. Brazhe, A. R. Brazhe, L. A. Erokhova, G. V. Maksimov, E. Mosekilde // Physical Review Letters. – 2005. – Vol. 94. – P. 218103.

29. Marsh, D. J. Frequency encoding in renal blood flow regulation / D. J. Marsh, O. V. Sosnovtseva, A. N. Pavlov, K.-P. Yip, N.-H. Holstein-Rathlou // American Journal of Physiology (Regul. Integr. Comp. Physiol.). – 2005. – Vol. 288. – P. R1160-R1167.
30. Sosnovtseva, O. V. Double-wavelet approach to studying the modulation properties of nonstationary multimode dynamics / O. V. Sosnovtseva, A. N. Pavlov, E. Mosekilde, N.-H. Holstein-Rathlou, D. J. Marsh // Physiological Measurement. – 2005. – Vol. 26. – P. 351–362.
31. Pavlov, A. N. Multifractal characterization of blood pressure dynamics: stress-induced phenomena / A. N. Pavlov, A. R. Ziganshin, O. A. Klimova // Chaos, Solitons and Fractals. – 2005. – Vol. 24. – P. 57–63.
32. Pavlov, A. N. Separation of extracellular spikes: when wavelet based methods outperform the principle component analysis / A. N. Pavlov, V. A. Makarov, I. Makarova, F. Panetsos // Lecture Notes in Computer Science ; ed. by Mira J., Alvarez J. R. – 2005. – P. 123–132.
33. Думский, Д. В. Классификация нейронных потенциалов действия на основе вейвлет-преобразования / Д. В. Думский, А. Н. Павлов, А. Н. Тупицын, В. А. Макаров // Изв. вузов, Прикладная нелинейная динамика. – 2005. – Т. 13, №5–6. – С. 77–98.
34. Dumsky, D. V. Characterization of chaotic dynamics from return times / D. V. Dumsky, A. N. Pavlov // Physics and Control (PhysCon2005), Proc. of the Int. Conf. – 2005. – P. 439–442.
35. Ziganshin, A. R. Scaling properties of multimode dynamics in coupled chaotic oscillators / A. R. Ziganshin, A. N. Pavlov // Physics and Control (PhysCon2005), Proc. of the Int. Conf. – 2005. – P. 180–183.
36. Pavlov, A. N. Double-wavelet analysis: a tool to study interaction phenomena in nonstationary dynamics / A. N. Pavlov, O. V. Sosnovtseva // Physics and Control (PhysCon2005), Proc. of the Int. Conf. – 2005. – P. 876–879.
37. Brazhe, N. A. Unraveling cell processes: interference imaging weaved with data analysis / N. A. Brazhe, A. R. Brazhe, A. N. Pavlov, L. A. Erokhova, A. I. Yusipovich, G. V. Maksimov, E. Mosekilde, O. V. Sosnovtseva // Journal of Biological Physics. – 2006. – Vol. 32. – P. 191–208.
38. Pavlov, A. N. Application of wavelet-based tools to study the dynamics of biological processes / A. N. Pavlov, V. A. Makarov, E. Mosekilde, O. V. Sosnovtseva // Briefings in Bioinformatics. – 2006. – Vol. 7. – P. 375–389.
39. Павлов, А. Н. Исследование эффектов модуляции в нестационарной динамике на основе двойного вейвлет-анализа / А. Н. Павлов, О. Н. Павлова // Письма в ЖТФ. – Т. 32, вып. 20. – С. 27–35.

40. Павлов, А. Н. Применение вейвлет-анализа в исследованиях структуры точечных процессов / А. Н. Павлов, О. Н. Павлова // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т. 32, вып. 21. – С. 11–17.
41. Павлов, А. Н. Исследование переходной фазовой динамики на основе метода переустановки фазы / А. Н. Павлов // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т. 32, вып. 24. – С. 53–61.
42. Pavlov, A. N. Wavelet-analysis in application to studying spike separation and information encoding in neuron dynamics / A. N. Pavlov, D. V. Dumsky, A. N. Tupitsyn, O. N. Pavlova, F. Panetsos, V. A. Makarov // Complex dynamics and fluctuations in biomedical photonics III, Proc. of SPIE ; ed. by Tuchin V. V. – 2006. – Vol. 6085. – P. 60850I.
43. Павлова, О. Н. Эффекты влияния низкочастотного магнитного поля на характеристики физиологического тремора / О. Н. Павлова, А. Н. Тупицын, А. Н. Павлов // Изв. вузов, Прикладная нелинейная динамика. – 2006. – Т. 14, №5–6. – С. 105–117.
44. Павлов, А. Н. Мультифрактальный анализ сложных сигналов / А. Н. Павлов, В. С. Анищенко // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177, вып. 8. – С. 859–876.
45. Sosnovtseva, O. V. Synchronization among mechanisms of renal autoregulation is reduced in hypertensive rats / O. V. Sosnovtseva, A. N. Pavlov, E. Mosekilde, K.-P. Yip, N.-H. Holstein-Rathlou, D. J. Marsh // American Journal of Physiology (Renal Physiology). – 2007. – Vol. 293. – P. F1545–F1555.
46. Pavlov, A. N. Sorting of neural spikes: when wavelet based methods outperform principal component analysis / A. N. Pavlov, V. A. Makarov, I. Makarova, F. Panetsos // Natural Computing. – 2007. – Vol. 6. – P. 269–281.
47. Pavlov, A. N. Using wavelet analysis to detect the influence of low frequency magnetic fields on human physiological tremor / A. N. Pavlov, A. N. Tupitsyn, A. Legros, A. Beuter, E. Mosekilde // Physiological Measurement. – 2007. – Vol. 28. – P. 321–333.
48. Pavlov, A. N. Tactile information processing in the trigeminal complex of the rat / A. N. Pavlov, A. N. Tupitsyn, V. A. Makarov, F. Panetsos, A. Moreno, V. Garcia-Gonzalez, A. Sanchez-Jimenez // Complex Dynamics and Fluctuations in Biomedical Photonics IV, Proc. of SPIE ; ed. by Tuchin V. V. – 2007. – Vol. 6436. – P. 64360R.
49. Павлов, А. Н. Взаимодействие ритмов в динамике структурных элементов почек / А. Н. Павлов, О. Н. Павлова, О. В. Сосновцева // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2007. – Т. 15, №2. – С. 14–28.



50. Павлов, А. Н. Мультифрактальный анализ сигналов на основе вейвлет-преобразования / А. Н. Павлов, В. С. Анищенко // Известия Саратовского университета (Физика). – 2007. – Т. 7, №1. – С. 3–25.
51. Pavlov A.N., Sosnovtseva O.V., Pavlova O.N., Mosekilde E., Holstein-Rathlou N.-H., Characterizing multimode interaction in renal autoregulation / A. N. Pavlov, O. V. Sosnovtseva, O. N. Pavlova, E. Mosekilde, N.-H. Holstein-Rathlou // Physiological Measurement. – 2008. – Vol. 29. – P. 945–958.
52. Павлов, А. Н. Анализ корреляционных свойств случайных процессов по сигналам малой длительности / А. Н. Павлов, О. Н. Павлова // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34, №7. – С. 71–78.
53. Павлов, А. Н. Динамика почечного кровотока на микро и макроскопическом уровнях / А. Н. Павлов, О. В. Сосновцева, А. А. Анисимов, О. Н. Павлова // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2008. – Т. 16, №1. – С. 3–18.
54. Makarov, V. A. Optimal sorting of neural spikes with wavelet and filtering techniques / V. A. Makarov, A. N. Pavlov, A. N. Tupitsyn // Complex dynamics and fluctuations in biomedical photonics V, Proc. of SPIE ; ed. by Tuchin V. V., Wang L. V. – 2008. – Vol. 6855. – P. 68550M.
55. Pavlov, A. N. Wavelet-analysis of multimode dynamics in living systems / A. N. Pavlov, O. N. Pavlova, A. A. Anisimov // Complex dynamics and fluctuations in biomedical photonics V, Proc. of SPIE ; ed. by Tuchin V. V., Wang L. V. – 2008. – Vol. 6855. – P. 68550I.
56. Анисимов, А. А. Вейвлет-анализ чирпов / А. А. Анисимов, О. Н. Павлова, А. Н. Тупицын, А. Н. Павлов // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2008. – Т. 16, №5. – С. 3–11.
57. Павлов, А. Н. Детектирование информационных сигналов на основе реконструкции динамических систем и дискретного вейвлет-преобразования / А. Н. Павлов // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2008. – Т. 16, №6. – С. 3–17.
58. Макаров, В. А. Сортировка нейронных спайков на основе параметрического вейвлет-анализа с адаптивной фильтрацией / В. А. Макаров, А. Н. Павлов, А. Н. Тупицын // Цифровая обработка сигналов. – 2008. – №3. – С. 26–31.
59. Sosnovtseva, O. V. Characterizing the effect of L-name on intra- and inter-nephron synchronization / O. V. Sosnovtseva, A. N. Pavlov, O. N. Pavlova, E. Mosekilde, N.-H. Holstein-Rathlou // European Journal of Pharmaceutical Sciences. – 2009. – Vol. 36. – P. 39–50.
60. Pavlov, A. N. Wavelet-based analysis of blood pressure dynamics in

- rats / A. N. Pavlov, A. A. Anisimov, O. V. Semyachkina-Glushkovskaya, V. A. Berdnikova, A. S. Kuznecova, E. G. Matasova // Complex dynamics and fluctuations in biomedical photonics VI, Proc. of SPIE ; ed. by Tuchin V. V., Wang L. V., Duncan D. D. – 2009. – Vol. 7176. – P. 71760N.
61. Tupitsyn, A. N. Separation of extracellular spikes with wavelets and neural networks / A. N. Tupitsyn, A. N. Pavlov, V. A. Makarov // Complex dynamics and fluctuations in biomedical photonics VI, Proc. of SPIE ; ed. by Tuchin V. V., Wang L. V., Duncan D. D. – 2009. – Vol. 7176. – P. 71760M.

### Патент

62. Патент 75814 Рос. Федерация, МПК Н 04 L 9/00. Устройство многоканальной конфиденциальной передачи информации / А. Н. Павлов, В. С. Анищенко ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО “Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского”. – № 2008118616/22 ; заявл. 14.05.2008 ; опубл. 20.08.2008, Бюл. № 23.

---

ПАВЛОВ Алексей Николаевич  
 АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ НЕСТАЦИОНАРНЫХ, КОРОТКИХ  
 И ЗАШУМЛЕННЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-  
 ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Автореферат

---

Ответственный за выпуск профессор, д.ф.-м.н. Вадивасова Т.Е.

Подписано в печать 19.03.09.      Формат 60x84 1/16.

Объем 2,0 п.л.      Тираж 150 экз.