

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук

Иванченко Михаила Васильевича

на диссертацию Сысоева Ильи Вячеславовича «Специализированные подходы к реконструкции ансамблей сложных колебательных систем по временным рядам», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 — Радиофизика

Задача исследования ансамблей динамических систем – одна из наиболее сложных и изучаемых в настоящее время в нелинейной динамике. В зависимости от архитектуры и вида взаимодействий ансамбли с тривиальной индивидуальной динамикой могут генерировать сложные, в том числе хаотические колебания, характерные для наблюдаемых объектов физической и биологической природы. Теоретические вопросы коллективной динамики ансамблей, динамические уравнения которых известны, проработаны достаточно хорошо. Гораздо менее исследована проблема реконструкции подобных систем, определения взаимодействий между элементами, когда основная информация о системе получается в эксперименте в виде наблюдаемых временных рядов. В связи с этим, **актуальность** диссертационной работы И.В. Сысоева не вызывает сомнений.

В работе систематически развивается набор подходов к построению разностных и дифференциальных уравнений (в том числе, дифференциальных уравнений с запаздыванием) по наблюдаемым реализациям для неавтономных и связанных систем различной природы. Совокупность предложенных алгоритмических методов и приёмов и широкий спектр рассмотренных динамических систем, для которых задача была решена, определяют **новизну** работы. Работоспособность предложенных подходов продемонстрирована в ряде радиофизических экспериментов, в частности, в задаче обработки колебательной электрической активности мозга в нормальном и патологическом режимах. Пример успешного приложения и апробации разработанных подходов на природных объектах подчёркивает **значимость** работы, в том числе, междисциплинарную. Обсуждение практической применимости предлагаемых подходов красной нитью проходит через всю работу.

Характеристика содержания работы.

В первой главе идёт речь о реконструкции ансамблей систем с запаздыванием в собственной динамике, для чего предлагается оригинальный подход, основанный на использовании специально сконструированной целевой функции. Вместо того, чтобы строить её на основе разницы (среднеквадратичной, средней по модулю или по максимальному отклонению) между наблюдаемыми и построенными на основе модели сигналами, предлагается использовать гладкость одной из нелинейных функций в уравнениях модели, не аппроксимируя её явно. Такой подход позволяет уменьшить параметризацию и смягчить требования к априорной информации об экспериментальных данных. Подход в нескольких его модификациях успешно апробируется на ансамблях модельных осцилляторов и на сигналах, полученных от экспериментальных генераторов с запаздывающей обратной

связью (ГЗОС). Также рассматривается задача реконструкции неавтономных и связанных ГЗОС в отсутствие сигнала воздействующего генератора (внешнего воздействия).

Во второй главе данный подход обобщается на другие типы динамических систем, в том числе без запаздывания в собственной динамике, но с запаздыванием в связях, на системы второго порядка, для которых экспериментально измеряема только реализация скалярной переменной, а также на ансамбли с нелинейными функциями связи, в том числе, когда параметры этих функций неизвестны.

По результатам первой и второй глав можно заключить, что представленный подход представляет значительную ценность и обладает большой общностью, пригоден для систем различной природы.

В третьей главе рассматривается еще более сложная задача, когда динамические уравнения для взаимодействующих объектов не известны. Традиционно в этом случае используются эмпирические прогностические модели в виде разностных уравнений, подходы и методы построения которых определяются свойствами экспериментальных временных рядов. В литературе такой подход получил название «причинность по Грейнджеру». В данной работе рассматривается класс систем, для которых наблюдаемые временные ряды – хаотические и имеют характерный временной масштаб. Учёт этой специфики в структуре прогностических моделей позволил автору работы существенно сократить требования к объёму экспериментальных данных, необходимых для оценки связанности. Это значительно расширяет область применимости метода причинности по Грейнджеру с использованием нелинейных разностных уравнений в качестве моделей.

В четвёртой главе разработанные ранее подходы и методы применяются в условиях различных помех и воздействий: высокочастотных шумов, общих низкочастотных помех, опосредованных взаимодействий. Автором дается положительное заключение о работоспособности его решений в целом, определены границы применимости. Любопытно, что в определенных случаях наблюдается даже улучшение качества оценки по Грейнджеру в определенном диапазоне интенсивности шума.

В пятой главе метод причинности по Грейнджеру, развитый ранее, тестируется на нестационарных данных в скользящем окне. Также рассматривается вопрос влияния фазовой синхронизации на результаты оценки связанности. Отмечается актуальность полученных результатов для обработки нестационарных сигналов, например, в задачах передачи информации, когда информационный сигнал содержится в изменяющемся во времени параметре генератора, а также при работе с переходными процессами. В значительной степени результаты главы предваряют содержание главы 6, где методика применяется для сильно нестационарных биологических сигналов.

В шестой главе представлено практическое применение разработанных методов к анализу колебательной электрической активности мозга в норме и патологии у крыс с эпилепсией и электроэнцефалограмм у детей с односторонним ДЦП. Показано, что использование предложенного подхода со всеми сделанными модификациями, при условии следования выработанным рекомендациям, позволяет из того же объёма экспериментальных данных, что и ранее, выявить значительно больше информации о взаимодействиях между подсистемами (в представленном примере — отделами мозга) при переходе между различными типами активности. В частности, можно идентифицировать ранние изменения в

операторе эволюции в сети (силе и направлении взаимодействия), которые явно ещё не проявляются в характеристиках отдельных сигналов: их спектральном составе, форме, амплитуде. Полученные результаты подчёркивают практическую важность всей выполненной работы.

К диссертации имеются следующие вопросы и замечания.

1. Насколько принципиальными являются ограничения на типы систем и связей, для которых были получены результаты первой главы: линейные связи, присутствие линейного диссипативного члена в правой части, и т.д., см. уравнение (1.1.)?
2. Применение термина «нейроосциллятор», «нейронный осциллятор» к динамическим системам ансамбля, задаваемого уравнением (2.1) некорректно, поскольку индивидуальная динамика такого элемента описывается линейным уравнением первого порядка и не может быть колебательной.
3. На стр. 91 после уравнения (2.7) делается предположение о несинхронности динамики узлов ансамбля. Насколько это предположение оправдано, и какие последствия влечет его не выполнение?
4. В третьей и четвертой главах для оценки качества реконструкции связей используются показатели чувствительности и специфичности. Как правило, эти величины зависят от выбора порога и не однозначны, поэтому для оценки качества бинарной классификации (в данном случае – наличие и направленность взаимодействия между элементами ансамбля) обычно используется ROC-анализ. Применим ли он в данном случае и каковы могли бы быть его результаты?
5. Каков потенциал применения методов машинного обучения в задаче идентификации взаимодействия элементов ансамбля?
6. В четвертой главе исследовалась работоспособность методов в условиях шума. В то же время, «собственная» хаотическая динамика систем, нерегулярность временных рядов, как неоднократно отмечается автором, не только не затрудняет, но и, в известной степени, облегчает анализ. Остается не вполне ясным, где проходит «граница» между «благоприятной» и «неблагоприятной» нерегулярностью, есть ли принципиальное отличие во влиянии динамического хаоса и стохастического процесса на результаты работы методов, или оно обусловлено частными причинами, например, разными спектральными характеристиками в конкретных рассматриваемых системах?
7. Насколько методы, адаптированные и примененные к анализу электрической нейронной активности головного мозга, описанные в шестой главе, позволяют предсказывать, осуществлять раннее детектирование эпилептического припадка в режиме реального времени?

Указанные замечания не умаляют новизну, актуальность и значимость результатов диссертационной работы И.В. Сысоева, по которой можно сделать заключение, что она представляет собою законченное и целостное исследование в области реконструкции уравнений ансамблей сложных колебательных элементов, в том числе оценки связанности

между отдельными элементами и определения их параметров по временным рядам. В рамках работы решена крупная научная задача по улучшению чувствительности и специфичности подходов к восстановлению архитектуры связей в ансамбле путём адаптации модельных уравнений к специфике экспериментальных данных, что позволяет существенно продвинуться в понимании механизмов взаимодействий в сложных системах реальной природы, в том числе сигналов мозга, как это показано в работе.

Диссертация написано ясным языком, хорошо иллюстрирована и оформлена в соответствии с установленными правилами ВАК. Основные результаты изложены в 24 статьях в научных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, в том числе в 16 статьях, индексируемых международными базами данных Web of Science и Scopus, а также доложены на различных авторитетных международных и всероссийских конференциях, школах и съездах. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Ильи Вячеславовича Сысоева соответствует требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, а её автор заслуживает присвоения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 — Радиофизика (физико-математические науки).

15.04.2019

Официальный оппонент

Иванченко Михаил Васильевич



доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий кафедрой прикладной математики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»,

603950, г. Нижний новгород, проспект Гагарина, 23.

тел. +7-910-396-1983 e-mail: mikhail.ivanchenko@itmm.unn.ru

Печать

Подпись д.ф.-м.н. Иванченко Михаила Васильевича заверяю

