

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора по научной работе
Федерального государственного
бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики Российской
академии наук» (ИПФ РАН),



член - корр. РАН
Е.А.Хазанов

«11» марта 2019 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу 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»

1. Актуальность темы.

Динамические режимы функционирования сложных систем различной природы, в том числе радиофизических, обычно регистрируются в виде временных рядов, характеризующих состояния элементов системы — последовательностей значений некоторой физической величины в дискретные моменты времени. Такие наблюдаемые данные интересны исследователям для извлечения информации о внутреннем устройстве изучаемых систем: изменениях во времени величин и направленности связей между элементами системы, режимах поведения отдельных элементов и параметрах, определяющих тип этого поведения. Таким образом, решение сформулированной в диссертации И.В. Сысоева научной проблемы — реконструкция связей и моделей элементов колебательных систем по их временным рядам — актуально и востребовано. Интерес к данной проблематике обуславливается большим количеством возможных приложений: классификация и диагностика различных режимов поведения системы (в том числе дифференция нормального и патологического поведения живых систем), извлечение информации о параметрах системы по виду динамических режимов,

выявление кластеров согласованной динамики отдельных элементов, прогноз дальнейшего поведения и другие задачи.

2. Новизна проведенных исследований и полученных результатов.

В работе рассматриваются системы различных видов, для многих из них специализированные подходы к реконструкции системы связей и собственных параметров по временным рядам коллективной динамики предложены впервые. Для хорошо известного подхода — причинности по Грейнджеру — разработан новый алгоритм реализации, основанный на использовании содержащейся в данных информации о спектральном составе колебаний, для увеличения чувствительности и специфичности получаемых выводов, что существенно расширило область применения метода. Кроме того, в диссертации сформулированы рекомендации и критерии применимости. Полученные результаты значительно расширяют, дополняют, уточняют и обобщают ранее имевшиеся представления.

3. Степень обоснованности и достоверности полученных результатов и выводов.

Объем исследований, проведенных в рамках диссертационной работы в области анализа различных подходов к реконструкции ансамблей сложных колебательных систем по временным рядам, весьма значителен. Полученные результаты сравнивались с существующими аналогами. Защищаемые положения и выводы, представленные в диссертационной работе И.В. Сысоева, достаточно хорошо аргументированы, что подтверждается использованием различных методик.

Достоверность результатов работы подтверждается их воспроизводимостью в лабораторных и численных экспериментах, а также соответствием вновь полученных результатов как уже известным из литературных источников данным, так и общим положениям теории колебаний.

4. Краткая характеристика работы.

В первой главе работы рассматривается задача реконструкции ансамблей осцилляторов с запаздыванием в собственной динамике генераторов с запаздывающей обратной связью (ГЗОС) при различном типе нелинейных функций отдельных элементов, типе связей между ними и числе элементов в ансамбле. Предложен новый подход, позволяющий восстановить как сами связи (изначально система связей считается неизвестной), так и собственные нелинейные функции всех элементов (функции восстанавливаются таблично, нет необходимости в непосредственной аппроксимации) и параметры инерционности, а также времена запаздывания в собственной динамике.

Работоспособность подхода продемонстрирована в двух радиофизических экспериментах, а также в большом числе численных экспериментов.

Во второй главе методика, разработанная в первой главе, переносится на системы другого типа, описываемые обыкновенными дифференциальными уравнениями как первого (нейроосцилляторы) так и второго (обобщённые осцилляторы ван дер Поля) порядка, в том числе при наличии запаздывания в связях и различного типа связей: линейного и нелинейного, зависящих как от переменных, так и от их производной по времени. Таким образом, показано, что методика имеет большую общность и может быть адаптирована для систем различной природы в достаточно широком диапазоне, если уравнения для отдельного узла известны с точностью до параметров нелинейных собственных функций, в том числе потенциальных функций и функций диссипации, а также функций связи, принадлежащих к известному классу (например, сигмоидных).

В третьей главе рассматривается задача оптимизации прогностических моделей, используемых в методе причинности по Грейнджеру, для определения направленной связанности по временным рядам для случая, когда измеренные временные ряды имеют один хорошо выраженный временной масштаб. В данной главе используются модели в виде отображений последования с полиномиальными нелинейностями — менее специфические, чем в предыдущих главах. Часть параметров при реконструкции вектора состояния и выборе аппроксимирующих нелинейных функций выбирается с использованием байесовского информационного критерия (критерия Шварца), а другая — с помощью дополнительных критериев, разработанных в диссертационной работе и опробованных на системах различного типа. На моделях различных связанных радиотехнических генераторов показывается, что благодаря сделанным оптимизациям удаётся качественно повысить специфичность и чувствительность подхода для выбранного типа сигналов.

В четвёртой главе результаты третьей главы обобщаются на случай наличия шумов измерений, внешней низкочастотной помехи в канале связи, а также рассматривается вопрос различения прямого и опосредованного взаимодействия. Исследование проводится на моделях ансамблей радиотехнических генераторов хаоса и генераторов с запаздывающей обратной связью. Обнаружены ряд артефактов метода, вызванных искажениями в канале связи и сформулированы рекомендации для применения метода в случае наличия потенциального опосредованного взаимодействия.

В пятой главе метод причинности по Грейнджеру адаптируется для случая диагностики связанности в скользящем временном окне. Кроме того,

рассматриваются некоторые другие обстоятельства, препятствующие детектированию связи в верном направлении: фазовая синхронизация между элементами ансамбля, малая длина временного ряда (скользящего временного окна), случайное совпадение ритмов колебаний элементов ансамбля. Показано, что и в такой ситуации можно добиться успеха и верно восстановить систему связей, если адаптировать используемые модели к специфике данных, в частности, использовать нелинейные аппроксимирующие функции, учесть временные масштабы и подобрать оптимальную размерность.

В **шестой главе** предложенные выше подходы к детектированию направленных связей в ансамблях применяются к данным нейрофизиологических экспериментов: рассматривается задача определения изменений в связанности между различными отделами мозга, сопутствующих началу эпилептических приступов определённого типа. В качестве наблюдаемых сигналов выступают локальные потенциалы мозга, измеренные внутрочерепным образом у животных-моделей. В работе выявляются принципиально новые закономерности эволюции связей за две-три секунды до начала патологической активности, которые нельзя установить с использованием ранее предложенных подходов к диагностике связанности.

5. Публикации и апробация материалов диссертации.

Материалы диссертации опубликованы в 24-х статьях в отечественных и зарубежных научных журналах соответствующего профиля, в том числе входящих в международные базы цитирования Web of Science и SCOPUS, а также представлены на 6 международных и 20 всероссийских конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

6. Значимость результатов для научных исследований.

Значимость работы заключается в возможности непосредственного использования её результатов для исследования сложных нелинейных систем различной природы: для задач радиотехники и телекоммуникаций, задач биофизики, математической биологии, для косвенного измерения параметров, диагностики режимов поведения, изменения структуры связей вследствие нарушения нормального функционирования (сбой одного или нескольких узлов в системах передачи или нарушения в канале связи, патологическая динамика в нейронных системах, например, эпилептиформная), кластеризации и классификации.

7. Замечания

1. В разделе "общая характеристика работы" (стр. 4 автореферата и стр. 7-8 диссертационной работы) выделены только два класса задач: а) случаи "не претендующие на сколько-нибудь точное воспроизведение индивидуальных

свойств подсистем"; и б) случаи, когда известны "уравнения для элементов связанных систем". Очевидно, однако, что при решении многих задач исследователи опираются на вполне адекватные гипотетические модели, архитектура которых получена из экспериментальных данных, и необходимо найти (реконструировать) величины связей между активными элементами (узлами), параметры элементов, и возможные изменения этих величин во времени. В частности, результаты по связанности таламо-кортикальных подсистем из шестой главы, казалось бы, относятся к анализу именно такого, третьего, класса.

2. В вводной части диссертации (страницы 6-9) и автореферата (страницы 3-4) приведены неполные, неточные или неверные утверждения:

- «Разработка научных основ и принципов активной и пассивной дистанционной диагностики окружающей среды, основанных на современных методах решения обратных задач — одна из фундаментальных задач радиофизики. В общем случае обратные задачи некорректны и не имеют решения».

В общем случае некорректные обратные задачи имеют бесконечное множество решений, и целью исследователя является выбор решения (например, с наибольшей вероятности отражающего свойства реконструируемой системы).

- «Поскольку элементы сложных систем в этих предметных областях сами по себе очень сложны или плохо формализованы, поэтому записать для них уравнения из общих принципов, пусть даже с неизвестными нелинейными функциями и параметрами, не представляется возможным».

В данном контексте уместным было бы упоминание, что в таких случаях оператор эволюции системы может быть реконструирован (например, в форме функции последования) путем прямого анализа данных (см., например, Molkov Ya.I. et al. Random dynamical models from time series // Phys.Rev.E, 2012, Vol. 85, P. 036216.). Для отыскания функциональной формы оператора эволюции в таком случае используются различные универсальные (в математическом смысле) аппроксиматоры, позволяющие реконструировать с требуемой точностью любую нелинейную функцию любого числа переменных (см., например, Hornik K., Stinchcombe M., and White H. Multilayer feedforward networks are universal approximators // Neural Networks. 1989. V. 2. P. 359.). Задача состоит в выборе оптимальных параметров аппроксиматора, обеспечивающих построение оператора эволюции, нелинейно-динамические свойства которого с

наибольшей вероятностью воспроизводят свойства исследуемой динамической системы.

- «Минус такого подхода в том, что малый учёт априорной и дополнительной информации об объекте может часто приводить к ложно положительным (плохая специфичность, см., например, [14]) или ложно отрицательным (плохая чувствительность, см., например, [7]) выводам о связанности. Поэтому в реальности он требует существенного доопределения, основанного на учёте специфики наблюдаемых сигналов и априорных свойств изучаемых систем».

К ложным выводам может приводить и «большой учёт» априорной или дополнительной информации, если эта информация неверна (см. следующий пункт). Поэтому одним из ключевых факторов, определяющих корректность реконструкции, является выбор критерия отбора модели, наиболее адекватной системе.

3. К сожалению, важный вопрос о выборе критерия отбора модели в диссертации обсуждается весьма фрагментарно. В многочисленных задачах, рассмотренных в диссертации, условием адекватности выбранного критерия оптимальности модели является его устраивающая автора эффективность либо преимущество лишь перед некоторыми другими критериями.

Так, в первой главе при обсуждении алгоритма выбора оптимальных параметров ансамблей связанных дифференциальных уравнений с запаздыванием по сгенерированным ими временным рядам предлагается следующая последовательность действий: «Сначала восстанавливаем по временным рядам время запаздывания τ_i каждого элемента, а затем, зная τ_i , восстанавливаем остальные параметры (ε_i и k_{ij}) и нелинейные функции f_i . Это позволяет существенно упростить решение задачи и за счёт этого добиться более высокой точности оценки параметров».

Причина такой выделенности параметра τ_i поясняется следующим образом: «время запаздывания является параметром, точность восстановления которого имеет наибольшее влияние на качество реконструкции системы. Даже небольшая погрешность его определения приводит, как правило, к неправильному восстановлению архитектуры связей в ансамбле и большим ошибкам оценки остальных параметров». По существу, автор неявно предполагает, что он знает априори верный метод поиска τ_i , *независящий* от значений других параметров. При этом обоснование верности этого метода выглядит не очень убедительно: «как показывают численные эксперименты, в общем случае эта вероятность (вероятность ошибки при отыскании верного значения τ_i – ремарка составителей отзыва) меньше». Очевидно, что в такой

ситуации имеет смысл сравнить полученный результат с результатом применения алгоритма оптимальной реконструкции сразу по *всем* параметрам (например, возможна реализация этого алгоритма, когда сначала ищется оптимум по остальным параметрам для каждого фиксированного τ_i , а затем - оптимальный выбор τ_i).

4. В шестой главе при реконструкции изучаемых процессов в случаях невозможности или трудности построения строгих математических описаний для изучаемых сложно организованных природных систем автор использует полиномиальную модель оператора эволюции, применяемого к многомерному аргументу. Хорошо известно, что число коэффициентов полинома очень быстро растет с ростом его степени и размерности аргумента, что в результате кардинально ограничивает допустимую сложность оптимальной модели. Неясно, почему автор не рассмотрел возможность использования других нелинейных аппроксиматоров, позволяющих параметризовать сильную нелинейность с помощью значительно меньшего количества коэффициентов, и, казалось бы, более подходящих для данного многомерного случая, например, перцептроно-подобного аппроксиматора.

5. Имеются некоторые неточности и опiski в изложении, например: из подписей к Рис. 10 автореферата и Рис.69.6 в диссертации трудно понять какой была длина скользящего временного окна; в уравнениях (1.1) и (1.14) неравновесные элементы называются "колебательными" и "осцилляторами", что правильно лишь для цепочки элементов, а при нулевых связях с другими элементами каждый из них будет демонстрировать монотонные переходы к стационарным состояниям; в выражении целевой функции для метода наименьших квадратов (2.27) потеряны квадрат.

Сделанные замечания не снижают теоретической и практической значимости основного содержания диссертационного исследования. Работа выстроена логично, её структура и содержание отражает цели и задачи исследования.

Диссертация И.В. Сыроева является законченной, целостной научной работой, выполненной на хорошем научном уровне. Совокупность полученных результатов можно квалифицировать как значимое продвижение в области реконструкции сложных динамических систем по экспериментальным данным (временным рядам). Достигнут заметный прогресс в части получения информации о динамических режимах элементов таких систем и их нелинейно-динамических свойствах. Разработаны практические рекомендации по

применению уже существующих и предложенных статистических критериев верификации полученных результатов.

Представленная диссертационная работа «Специализированные подходы к реконструкции ансамблей сложных колебательных систем по временным рядам» удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, а её автор, Илья Вячеславович Сысоев, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 — «Радиофизика».

Отзыв заслушан, обсуждён и утверждён на заседании научного семинара "Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях" (протокол № 29 от 14 февраля 2019 года).

Отзыв подготовили:

Фейгин Александр Маркович
доктор физико-математических наук, профессор,
зав. отделом физики атмосферы и микроволновой диагностики



Яхно Владимир Григорьевич
доктор физико-математических наук, профессор,
зав. лаб. автоволновых процессов в отделе «Радиофизические методы в медицине»,



Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
Российской академии наук» (ИПФ РАН)
Почтовый адрес: 603950, г. Нижний Новгород, БОКС — 120, ул. Ульянова, 46
Номер телефона +7(831) 436-72-91
Адреса электронной почты:
feigin@appl.sci-nnov.ru (Фейгин А.М.),
yakhno@appl.sci-nnov.ru (Яхно В.Г.)
Сайт организации: <http://www.iapras.ru>

Секретарь научного семинара,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

 /И.В. Нуйдель/