

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Масленникова Олега Владимировича «Коллективная динамика и функциональные свойства обучаемых нелинейных сетей активных элементов», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.4 – радиофизика

1. Актуальность темы диссертационного исследования

Теория нелинейных колебаний и бифуркаций, восходящая к работам школы Мандельштама–Андропова, на протяжении десятилетий развивала инструментарий анализа динамических систем — описания аттракторов, их устойчивости, бифуркационных переходов. Параллельно методы машинного обучения решали задачу синтеза — целенаправленной настройки параметров сети для выполнения заданной функции, — однако, как правило, без обращения к физическим механизмам, стоящим за сформированными вычислительными стратегиями. Между двумя подходами сохранялся концептуальный разрыв: первый не давал рецептов конструирования сетей с требуемой динамикой, второй действовал как «черный ящик».

Диссертация О.В. Масленникова направлена на преодоление этого разрыва. Обучение нелинейной сети рассматривается как управляемая деформация фазового пространства — возникновение и кризис аттракторов, перестройка бассейнов притяжения, формирование каналов переходной динамики. Такой взгляд переводит обучение нейронных сетей из категории инженерных рецептов в предмет физического исследования. Актуальность работы дополнительно подчеркивается присуждением Нобелевской премии по физике 2024 года Дж. Хопфилду и Дж. Хинтону за результаты, связавшие нейронные сети со статистической физикой. Установление закономерностей, связывающих динамику элементов, архитектуру связей, алгоритм обучения и функциональные свойства обученной сети, является открытой проблемой, значимой как для фундаментальной науки, так и для практических приложений в области нейроморфных вычислений и объяснимого искусственного интеллекта.

2. Научная новизна и достоверность результатов, положений, выводов и рекомендаций

Диссертация содержит обширный массив новых результатов, распределенных по четырем взаимосвязанным направлениям.

Динамика одиночных элементов.

Для класса двумерных быстро-медленных отображений с кусочно-непрерывной нелинейностью описан ранее не исследованный тип хаотических берстовых колебаний, в которых хаос реализуется на быстром временном масштабе вследствие граничного кризиса аттрактора быстрой подсистемы. Конструктивно доказано существование инвариантной области; получена оценка старшего показателя Ляпунова через коэффициент заполнения и показатель Ляпунова быстрой подсистемы. Для переходного хаоса в отображении лоренцевского типа с периодической модуляцией параметра выведено аналитическое выражение для вероятности выживания хаотической динамики, разделяющее монотонный и осциллирующий вклады, и построена карта времен жизни с мозаичной структурой и фрактальными границами. С позиции теории динамического хаоса эти результаты существенны: они расширяют класс известных механизмов хаотизации в быстро-медленных системах и впервые демонстрируют возможность двустороннего управления длительностью переходного хаоса посредством периодического воздействия. Коллективная динамика в сетях.

Систематическое исследование бассейновой устойчивости синхронизации берстов в сетях «малого мира» выявило немонотонную зависимость от всех существенных параметров и обнаружило корреляцию экстремумов устойчивости со скачками числа спайков в пачке —

результат, связывающий микроструктуру колебаний одиночного элемента с глобальным свойством сети. Для адаптивных спайковых сетей введен формализм гиперсети, обеспечивающий переход от непрерывной микродинамики к дискретному описанию последовательностей кластерных переключений. Аппаратная реализация на ПЛИС подтвердила теоретические предсказания. В гетерогенных и мультиплексных сетях осцилляторов обнаружены три различных механизма самоорганизации доменных структур, включая аналитически доказанный пространственный хаос в кольцах осцилляторов Баутина (через конструкцию подковы Смейла).

Резервуарные сети.

Установлен спектральный механизм формирования аттракторов при обучении методом FORCE: низкоранговая добавка к эффективной матрице связей порождает спектральные выбросы за пределами круга исходного сплошного спектра, определяющие доминирующие моды автономного режима. Инвариантность выбросов относительно инициализации и обнаруженный компенсаторный механизм (обратная зависимость дисперсии весов от дисперсии активности) раскрывают внутреннюю логику обучения. Параллельно обнаружен переходный механизм вычислений: для стимул-индуцированных задач обучение не подавляет хаос, а формирует детерминированные метастабильные маршруты, активируемые внешними импульсами. Сформулирован и количественно подтвержден принцип вычислительного соответствия, связывающий точность решения задачи с согласованностью топологии и геометрии внутреннего представления и скрытой структуры задачи; разрешен парадокс спайкового резервуара через динамическое считывание. Реализован экспериментальный электронный резервуар на цепочке генераторов ФитцХью–Нагумо с оригинальной методологией томографии ядра.

Полностью обучаемые сети.

Показано, что тип задачи определяет тип самоорганизующейся аттракторной структуры: дискретные аттракторы с архитектурой «победитель получает все» для задач выбора, непрерывное кольцевое многообразие с модульным разделением на память и управление для интеграции, кластерная организация с переключаемыми подпространствами для многозадачности. Впервые систематически установлено, что парадигма обучения (обучение с подкреплением *versus* обучение с учителем) при сопоставимой точности порождает качественно различные динамические стратегии — гибридные аттракторные архитектуры со сбалансированными популяциями в первом случае и преимущественно точечные аттракторы с несбалансированными ансамблями во втором.

Достоверность результатов обеспечивается сочетанием строгих аналитических методов (доказательство существования инвариантных областей, оценки показателей Ляпунова, конструкция подковы Смейла, устойчивость по Гершгорину), систематического численного моделирования на ансамблях с различными инициализациями, экспериментальной верификации (ПЛИС, электронный резервуар) и качественного согласования результатов для различных моделей элементов. Результаты опубликованы в 32 статьях в рецензируемых журналах, включая *Chaos*, *Physical Review E*, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, *Nonlinear Dynamics*, *Scientific Reports*, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, *Chaos Solitons & Fractals*, *Успехи физических наук*, *Известия вузов. Радиофизика*.

3. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Девять положений, выносимых на защиту, сформулированы конкретно. Положения 1–2 обоснованы аналитически и верифицированы численно. Положения 3–4 подтверждены статистическим анализом ансамблей графов и начальных условий, а также аппаратной реализацией. Положения 5–9 обоснованы систематическим численным моделированием с привлечением спектрального анализа случайных матриц, персистентной гомологии, информационно-теоретических мер, нелинейного снижения размерности и популяционного

анализа. Логика работы — от динамики элементов к коллективным режимам и далее к управляемому формированию функциональности — последовательна; выводы следуют из полученных результатов.

4. Соответствие диссертации требованиям Положения

Диссертация содержит совокупность новых результатов, составляющих крупное научное достижение в радиофизике — развитие физического подхода к теории обучаемых нелинейных сетей. Работа соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 № 842) и паспорту специальности 1.3.4 — радиофизика.

5. Личный вклад соискателя

О.В. Масленников является первым или единственным автором в большинстве ключевых публикаций (единственный автор в [A24, A29, A31]; первый автор в [A2, A3, A6–A10, A13, A15, A18–A21] и др.). Постановка задач, разработка моделей, аналитические и численные исследования, интерпретация результатов выполнены автором лично или при его определяющем участии.

6. Степень завершенности, качество изложения и опубликованность

Диссертация представляет собой завершенное исследование с четкой внутренней логикой. Классификация одиннадцати моделей элементов с иерархией предельных переходов, введенная в первой главе, обеспечивает единый язык описания на протяжении всей работы. Результаты полностью опубликованы в 32 статьях, значительная часть — в журналах первого квартала. Апробация — более 30 международных и всероссийских конференций.

При знакомстве с диссертацией возник ряд вопросов, которые хотелось бы обсудить.

1. В первой главе доказано существование инвариантной области и получена оценка старшего показателя Ляпунова для хаотического берстового аттрактора. Возникает вопрос о *природе* этого аттрактора с точки зрения современной классификации хаотических множеств: является ли он квазиаттрактором в смысле Афраймовича–Шильникова (содержащим устойчивые периодические орбиты в сколь угодно малой окрестности) или обладает свойствами псевдогиперболичности? Проводилась ли проверка методами, разработанными для верификации псевдогиперболичности?
2. Недостаточно четко разграничены результаты, относящиеся к радиофизическим моделям, и результаты, относящиеся к машинному обучению. В работе последовательно используются модели активных элементов, резервуарные сети и полностью обучаемые рекуррентные сети. Однако местами переход от радиофизической интерпретации к нейросетевой терминологии выглядит слишком быстрым. Было бы полезно более явно указать, какие выводы являются универсальными для широкого класса сетей, а какие справедливы только для выбранных архитектур, функций активации и процедур обучения.
3. В ряде разделов не хватает систематического анализа чувствительности результатов к гиперпараметрам обучения. Поскольку в работе обучение рассматривается как процесс формирования функциональной динамики, существенную роль могут играть начальные условия, скорость обучения, регуляризация, выбор функции потерь, длительность обучения и критерии остановки. В тексте представлены убедительные примеры сформированных режимов, но было бы полезно более подробно показать, насколько они воспроизводимы при варьировании этих параметров.
4. Было бы полезно дополнить сравнение обучения с учителем и обучения с подкреплением желательно более строгой процедурой контроля эквивалентности задач. Один из важных

выводов диссертации состоит в том, что парадигма обучения влияет на качественную структуру фазового пространства: обучение с подкреплением может приводить к возникновению квазипериодических аттракторов, тогда как обучение с учителем чаще формирует динамику, сводящуюся к неподвижным точкам. Однако для полной убедительности такого вывода желательно подробнее обсудить, как исключается влияние различий в функции ошибки, шуме, протоколе обучения и критериях успешности.

5. В диссертации представлен большой объём разнородных результатов, из-за чего местами затрудняется восприятие единой логической линии. Работа охватывает быстро-медленные отображения, переходный хаос, синхронизацию, адаптивные сети, резервуарные вычисления, топологический анализ, спайковые сети и обучение с подкреплением. Такой охват является достоинством докторской диссертации, но одновременно требует более явных промежуточных связей между главами, чтобы читателю было проще проследить, как результаты ранних разделов используются в последующих.

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы. Они в основном касаются уточнения границ применимости полученных результатов, расширения обсуждения воспроизводимости численных экспериментов и более явного разграничения универсальных закономерностей от свойств конкретных моделей и архитектур. Работа представляет собой завершённое научное исследование, содержащее новые результаты в области нелинейной динамики, радиофизики и анализа обучаемых рекуррентных сетей.

7. Заключение

Диссертация О.В. Масленникова представляет собой крупное самостоятельное научное исследование, в котором средствами теории нелинейных колебаний, численного моделирования и машинного обучения раскрыты динамические механизмы формирования функциональных свойств в нелинейных сетях активных элементов. Полученная совокупность результатов — от аналитической теории хаотических колебаний в быстро-медленных системах через закономерности коллективной динамики в сетях различной архитектуры до установления принципов самоорганизации аттракторных структур и функциональных модулей при обучении — составляет крупное научное достижение в области радиофизики.

Диссертация полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор, Масленников Олег Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени **доктора физико-математических наук** по специальности 1.3.4 – радиофизика.

Выражаю согласие на обработку диссертационным советом моих персональных данных, связанных с защитой данной диссертации.

доктор физико-математических наук, профессор; научная специальность 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»;
профессор факультета информатики, математики и компьютерных наук,
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»;

Казаков Алексей Олегович

e-mail: akazakov@hse.ru

Телефон: +7 (495) 771-32-32

Почтовый адрес: 603155, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, д. 25/12

Подпись Казакова А.О. заверяю

Ученый секретарь НИУ ВШЭ в Нижнем Новгороде

к.ю.н. Лушина Лариса Александровна

llushina@hse.ru



[Handwritten signature]

[Handwritten signature]
