

ОТЗЫВ

официального оппонента

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

Актуальность темы диссертационного исследования

Диссертация О.В. Масленникова посвящена одной из ключевых проблем современной радиофизики и нелинейной динамики — установлению связи между коллективной динамикой нелинейных сетей активных элементов и их функциональными свойствами, формируемыми в процессе обучения.

Теория нелинейных колебаний, развитая школой Мандельштама–Андропова, предоставляет мощный аппарат для анализа систем с фиксированной архитектурой. Однако современное развитие вычислительной нейронауки и технологий искусственного интеллекта поставило качественно новую задачу — синтеза динамических систем с заданными функциональными свойствами. Методы машинного обучения решают её алгоритмически, но физические механизмы, посредством которых обучение трансформирует фазовое пространство многомерной системы, остаются во многом непонятыми. Присуждение Нобелевской премии по физике 2024 года Дж. Хопфилду и Дж. Хинтону подчеркнуло фундаментальный физический характер этих вопросов.

Диссертация направлена на преодоление концептуального разрыва между аналитическим аппаратом нелинейной динамики и оптимизационными методами машинного обучения. Трактовка обучения как управляемого процесса формирования аттракторных структур, модификации бассейнов притяжения и создания каналов переходной динамики представляется продуктивной и своевременной. Актуальность работы усиливается практической потребностью в развитии объяснимого искусственного интеллекта и нейроморфных вычислительных архитектур.

Научная новизна и достоверность результатов

Диссертация содержит ряд существенно новых результатов, охватывающих широкий спектр задач — от динамики одиночных нелинейных элементов до механизмов формирования функциональных свойств в полностью обучаемых сетях.

На уровне индивидуальных элементов впервые описан механизм хаотических бёрстовых колебаний в дискретных быстро-медленных системах, основанный на граничном кризисе хаотического аттрактора быстрой подсистемы: сформулированы структурные условия возникновения соответствующего аттрактора, доказано существование инвариантной области и получена аналитическая оценка старшего показателя Ляпунова, устанавливающая наследование хаотических свойств от быстрой подсистемы. Для отображения лоренцевского типа получено аналитическое приближение для вероятности

выживания переходного хаоса при периодической модуляции параметра; обнаружены три качественно различных режима затухания и показано, что, в отличие от монотонно нарастающего параметра, периодическая модуляция допускает как ускорение, так и замедление выхода из хаотической области.

На уровне сетей с фиксированной и адаптивной топологией установлена оптимальность архитектуры «малого мира» для бассейновой устойчивости синхронизации хаотических бёрстов с систематически выявленными немонотонными зависимостями по всем существенным параметрам, объяснёнными искажением формы колебаний при чрезмерно сильной связи. Введён оригинальный формализм гиперсети для адаптивных сетей спайковых осцилляторов, переводящий непрерывную микродинамику в дискретное описание функциональных переключений: метастабильные кластерные конфигурации организуются в ориентированный граф, по которому в автономном режиме совершается случайное блуждание, а при стимуляции реализуется стимул-специфичный цикл; теоретические предсказания подтверждены аппаратной реализацией на ПЛИС. В гетерогенных безмасштабных и мультиплексных сетях обнаружены три механизма самоорганизованного формирования доменных структур, а для колец бистабильных осцилляторов аналитически доказано существование подковы Смейла.

Наиболее значимые результаты получены для обучаемых сетей. Установлен спектральный механизм формирования аттракторов при обучении резервуарных сетей — появление спектральных выбросов эффективной матрицы связей, определяющих доминирующие моды коллективной динамики, по аналогии с переходом через порог генерации в многомодовом автогенераторе; число выбросов коррелирует со сложностью целевого паттерна и инвариантно относительно инициализации. Сформулирован принцип согласования временных масштабов: эффективность обучения максимальна при согласовании внутреннего масштаба элементов с периодом целевого сигнала. Принципиально новым является обнаружение альтернативного переходного механизма вычислений — формирования детерминированных метастабильных маршрутов в фазовом пространстве с хаотической динамикой, при котором хаос используется как ресурс, из которого стимулами «извлекаются» нужные траектории; при этом тип задачи определяет тип формируемого динамического объекта.

Сформулированный принцип вычислительного соответствия связывает эффективность решения задачи с топологией и геометрией внутреннего представления. На задаче детекции фазовой когерентности впервые систематически сопоставлены частотный, спайковый и осцилляторный субстраты и разрешён парадокс спайкового резервуара: динамическое считывание, интерпретируемое через теорему Такенса, формирует представление с практически идеальным восстановлением фазы. Работоспособность подхода в аналоговом исполнении подтверждена реализацией физического резервуара на цепочке связанных возбудимых генераторов с разработанной методологией томографии ядра. Сопоставление фиксированных и полностью обучаемых рекуррентных сетей показало, что полное обучение формирует компактные низкоразмерные представления, причём разрыв производительности нарастает с увеличением горизонта памяти; различные типы задач приводят к качественно различным структурам фазового пространства — дискретным аттракторам, кольцевым многообразиям или переключаемым метастабильным состояниям. Особого внимания заслуживает впервые

установленный результат о влиянии парадигмы обучения: при идентичных задачах и сопоставимой точности обучение с подкреплением формирует гибридные аттракторные архитектуры со значительной долей квазипериодических аттракторов и сбалансированные популяции, тогда как обучение с учителем сводит динамику к неподвижным точкам и порождает несбалансированные ансамбли.

Достоверность результатов обеспечивается сочетанием строгих аналитических методов (доказательства существования инвариантных областей и подковы Смейла, оценки показателей Ляпунова, доказательства устойчивости методом дисков Гершгорина), систематического численного моделирования и экспериментальной верификации (ПЛИС-реализация, электронный резервуар), а качественное совпадение результатов для непрерывных и дискретных моделей свидетельствует о том, что установленные закономерности являются свойствами архитектуры как таковой. Работа опирается на публикации в ведущих рецензируемых журналах, включая Physical Review E, Chaos, Nonlinear Dynamics, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, Chaos Solitons & Fractals, Phil. Trans. R. Soc. A, Scientific Reports, Frontiers in Computational Neuroscience, Успехи физических наук, Известия вузов. Радиофизика и Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика.

Степень обоснованности научных положений

Положения, выносимые на защиту (9 пунктов), сформулированы конкретно и каждое подкреплено результатами соответствующих глав и публикациями.

Положения 1, 2 (хаотические бёрстовые колебания и управляемость переходного хаоса) обоснованы аналитически — через доказательство существования инвариантной области, вывод оценки старшего показателя Ляпунова и приближение в квазистационарном подходе — и численно верифицированы на ансамблях из 10^5 траекторий. Положения 3, 4 (бассейновая устойчивость и гиперсетевое описание) обоснованы систематическим численным исследованием многомерного пространства параметров и аппаратной верификацией на ПЛИС, причём экспериментальные осциллограммы воспроизводят теоретические предсказания. Положения 5, 6 (спектральный и переходный механизмы в резервуарных сетях) обоснованы спектральным анализом, вычислением показателей Ляпунова, проекциями на главные компоненты, топологическим анализом с бутстрапированной оценкой устойчивости и экспериментальной реализацией физического резервуара. Положение 7 (различие фиксированных и обучаемых сетей) обосновано сопоставлением на одной задаче с использованием UMAP, спектрального анализа и оценки внутренней размерности с усреднением по 10 инициализациям. Положения 8, 9 (структуры фазового пространства и влияние парадигмы обучения) обоснованы классификацией аттракторов, популяционным анализом, информационно-теоретической валидацией и методом разъединённых главных компонент на ансамблях из 50 сетей для каждого условия.

Общая логика работы — от динамики индивидуальных элементов через коллективные режимы к целенаправленному формированию функциональности при обучении — последовательна и убедительна. Иерархия предельных переходов между одиннадцатью

моделями активных элементов обеспечивает единый язык описания на протяжении всей работы.

Соответствие диссертации требованиям Положения

Диссертация соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 № 842). Работа содержит совокупность новых научных результатов, представляющих крупное научное достижение в области радиофизики — развитие физического подхода к теории обучаемых нелинейных сетей, устанавливающего связь между динамикой элементов, архитектурой сети, характером обучения и функциональными свойствами. Исследование выполнено на стыке теории нелинейных колебаний и бифуркаций, теории сложных сетей и машинного обучения. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.4 — радиофизика.

Личный вклад соискателя

Личный вклад О.В. Масленникова в представленные результаты является определяющим. Соискатель выступает первым или единственным автором в подавляющем большинстве ключевых публикаций. Постановка задач, разработка математических моделей, аналитические исследования (доказательство существования инвариантных областей, вывод оценок показателей Ляпунова, аналитическое приближение для вероятности выживания переходного хаоса), численное моделирование и интерпретация результатов выполнены автором лично или при его ведущем участии. Разработка методологии анализа обучаемых рекуррентных сетей — от спектральной диагностики до многоуровневой методики сопоставления парадигм обучения — составляет оригинальный вклад соискателя.

Степень завершенности, качество изложения и опубликованности

Диссертация представляет собой завершенное научное исследование с чётко выраженной внутренней логикой, прослеживаемой во всех четырёх главах. Введённая в первой главе классификация одиннадцати моделей активных элементов с единой терминологией обеспечивает общий язык описания. Каждая глава содержит выводы, связывающие результаты с задачами последующих глав.

Изложение в автореферате отличается ясностью, структурированностью и точностью формулировок; математические выкладки представлены корректно, терминология выдержана единообразно. Иллюстрации информативны. Диссертация объёмом 376 страниц с 95 иллюстрациями и списком литературы из 229 наименований адекватна по масштабу.

Результаты полностью опубликованы: 32 статьи в рецензируемых журналах, в значительной части — первого квартиля (Chaos — 12 статей, Physical Review E — 2, Nonlinear Dynamics, CNSNS, Chaos Solitons & Fractals, Phil. Trans. R. Soc. A, Scientific Reports, Frontiers in Computational Neuroscience, Frontiers in Network Physiology), а также в Успехах физических

наук (2), Известиях вузов. Радиофизика, Известиях вузов. Прикладная нелинейная динамика (3) и Russian Journal of Nonlinear Dynamics. Публикации охватывают период 2015–2026 гг. Степень опубликованности полностью соответствует требованиям к докторским диссертациям.

Результаты прошли широкую апробацию более чем на 30 международных и всероссийских конференциях, в том числе Dynamics Days Europe, Shilnikov Workshop, CNS, ICNN, Topical Problems of Nonlinear Wave Physics.

Замечания по содержанию работы

Вместе с тем по содержанию диссертации возникает ряд вопросов и замечаний.

1. Полученная в первой главе оценка старшего показателя Ляпунова через произведение коэффициента заполнения и среднего показателя Ляпунова хаотической быстрой подсистемы опирается на усреднение по интервалу значений медленной переменной, в котором существует хаотический аттрактор. Однако траектория полной системы проводит в различных участках этого интервала неодинаковое время — в частности, вблизи бифуркаций быстрой подсистемы движение замедляется. В связи с этим возникает вопрос о критичности способа усреднения: равномерное усреднение по медленной переменной может не совпадать со средним по времени, фактически определяющим показатель Ляпунова полной системы. Влияние такого расхождения, особенно вблизи границы существования хаотического аттрактора быстрой подсистемы, в работе не обсуждается. Желательно было бы также увидеть количественную оценку погрешности предложенной аппроксимации, без которой остаётся неясной область её количественной применимости.

2. Формализм гиперсети продемонстрирован на сети малого размера. Вопрос об обобщении подхода на сети большего размера, где число кластерных конфигураций растёт комбинаторно и гиперсеть быстро становится практически необозримой, в диссертации не рассматривается; для реальных нейронных сетей такой подход в исходной форме неприменим. Соответственно, требуется процедура редукции — сокращения числа вершин гиперсети без потери существенной динамики. Обсуждение возможных критериев такой редукции отсутствует, что оставляет открытым вопрос о практической применимости метода к крупномасштабным адаптивным сетям.

3. Показано, что динамическое считывание, основанное на конкатенации нескольких последовательных векторов состояний, обеспечивает практически идеальное восстановление фазы. Однако при этом размерность вектора признаков кратно возрастает по сравнению со статическим считыванием и заметно превосходит размерность признаков осцилляторного резервуара. Возникает вопрос: не объясняется ли наблюдаемое улучшение просто увеличением размерности пространства признаков? Соответствующая нормировка в работе не приводится, тогда как корректное сравнение требовало бы либо фиксации общей размерности, либо использования метрик, её учитывающих.

Указанные замечания носят дискуссионный характер и не снижают общей высокой оценки работы.

Заключение

Диссертация Масленникова Олега Владимировича представляет собой крупное самостоятельное научное исследование, в котором на основе методов теории нелинейных колебаний и бифуркаций, численного моделирования и машинного обучения установлены динамические механизмы формирования функциональных свойств в нелинейных сетях активных элементов. Совокупность полученных результатов составляет крупное научное достижение в области радиофизики.

Диссертация полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», а её автор, Масленников Олег Владимирович, заслуживает присуждения учёной 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.

Официальный оппонент:

Куркин Семен Андреевич

доктор физико-математических наук, доцент;
специальность: 05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

главный научный сотрудник научно-исследовательского Института прикладного искусственного интеллекта и цифровых решений, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова;

117997, г. Москва, Стремянный пер., д. 36

Телефон: + 79270557770

Электронная почта: Kurkin.SA@rea.ru

