

## ОТЗЫВ

### ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, профессора Кащенко Сергея Александровича на диссертацию Андреева Юрия Вениаминовича «Нелинейная и хаотическая динамика в задачах обработки и передачи информации», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика

#### **Актуальность темы диссертации**

В настоящее время вопросы передачи, обработки и хранения информации как с теоретической точки зрения, так и с точки зрения разработки различных прикладных систем уже много лет не теряют своей актуальности. А в последние 5-10 лет информационно-коммуникационные технологии развиваются с головокружительной скоростью. В связи с этим актуальность темы диссертационной работы Ю.В. Андреева сложно переоценить.

Диссертационная работа посвящена решению целой группы проблем в области передачи и обработки информации на основе нелинейной и хаотической динамики. Одной из целей диссертации является разработка новых принципов и методов хранения и обработки информации. В этой области автор развил новый подход к задачам записи информации, заключающийся в кодировании ее с помощью траекторий (циклов, периодических орбит, хаотических аттракторов) нелинейных динамических систем и использовании динамики этих систем для реализации базовых функций обработки (поиск, извлечение, распознавание и т.д.).

В области передачи информации с помощью динамического хаоса за последние 30 лет были предложены тысячи схем передачи. Однако для большей их части использование динамического хаоса или хаотических колебаний не даст заметных преимуществ перед традиционными схемами передачи или перед традиционным типом несущих колебаний. В этой области трудно найти ситуации, в которых применение динамического хаоса давало бы неоспоримые преимущества. Диссертанту удалось найти несколько таких приложений и доказать, что хаотические системы (хаотические колебания) обеспечивают им уникальные характеристики. Это задача разделения зашумленной суммы сигналов на составляющие, это уникальные характеристики распространения хаотических радиоимпульсов в многолучевой среде и уникальные характеристики коллективного режима излучения ансамбля хаотических излучателей.

Таким образом, анализируя постановку работы, можно заключить, что тема диссертации, ее цели и задачи являются вполне актуальными и соответствуют специальности.

#### **Содержание**

Диссертационная работа Ю.В. Андреева состоит из введения, шести глав и заключения. Во введении обосновывается актуальность работы, сформулирована цель и задачи исследований, приведены положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** представляет собой аналитический обзор литературы, посвященной исследованию нелинейной динамики информационных процессов в биологических нейронных системах, поиску взаимосвязей теории динамического хаоса с информационными процессами, анализу возможных принципов записи и хранения информации в динамических системах, а также вопросам реализации искусственных информационных систем на основе идей нелинейной динамики. По итогам рассмотрения был сделан вывод об общности закономерностей информационных процессов в нелинейных системах со сложной динамикой и о возможности реализации механизмов обработки информации в динамических системах другой природы.

Во **второй главе** обосновывается идея кодирования информационных последовательностей (блоков) динамическими, а не статическими аттракторами динамических сис-

тем. Сделан вывод, что это позволяет увеличить емкость и плотность записи, снять ограничения на точность вычислений значений динамической системы и получить свойство ассоциативности за счет динамики системы: стартуя с начальных условий на аттракторе, можно восстановить всю траекторию и, соответственно, весь информационный блок. В главе 2 изложены принципы и основные алгоритмы записи информации на циклах отображений. Для этого предложен метод синтеза кусочно-линейных отображений различной размерности с заданными предельными циклами в фазовом пространстве. При этом устойчивость циклов является регулируемым параметром. Предложены три подхода к извлечению записанной информации из динамической системы: по начальным условиям, путем управления устойчивостью соответствующего информационного цикла и с помощью синхронизации внешним временным рядом. Определены условия, при которых предпочтительно применять эти подходы.

Выполнены оценки информационной емкости системы памяти на основе циклов отображения и проанализированы ограничения записи. Предложен метод специального кодирования записываемой информации, полностью снимающий ограничения записи. Метод основан на расширении алфавита и замене повторяющихся фрагментов новыми символами. Он приводит к устранению избыточности, сжатию, а главное, обеспечивает «записываемость» информации. В результате разработана регулярная процедура записи произвольных конечных информационных блоков на циклах одно- или многомерных кусочно-линейных отображений.

Для того чтобы осознано использовать синтезированные отображения для обработки информации, проведено исследование динамики отображений с записанной информацией в зависимости от параметра, регулирующего устойчивость информационных циклов. Исследование почему-то проведено только для одномерных отображений, случай многомерных отображений остался без внимания. Тем не менее, для одномерных отображений было показано, что разрушение устойчивости предельного цикла при увеличении параметра сопровождается рождением особого хаотического аттрактора типа цикла интервалов, локализованного в окрестности этого предельного цикла. При дальнейшем увеличении параметра циклы интервалов теряют устойчивость, и рождается глобальный хаос.

Таким образом, во второй главе диссертации создана теория записи информации на динамических аттракторах отображений.

В **третьей главе** предложены и исследованы приложения этой теории к задачам обработки информации. Построена модель адаптивной «динамической» памяти, которая представляет собой отображение с информационными блоками, записанными на неустойчивых циклах, вследствие чего в фазовом пространстве системы формируется скелет периодических траекторий, вокруг которого реализуется режим глобального хаоса. Предложен алгоритм, в котором при появлении на «входе» системы одного из записанных блоков происходит стабилизация соответствующего этому блоку предельного цикла и, соответственно, происходит сходимости фазовой траектории к этому циклу. При снятии «внешнего воздействия» этот цикл постепенно снова теряет устойчивость, и система возвращается в режим глобального хаоса. Эта модель соответствует основной гипотезе о роли хаоса в живых системах как «случайной» динамической основы, из которой в ответ на внешнее воздействие могут возникать регулярные движения, после чего система возвращается к хаотическому поведению и снова готова к переключениям на те или иные циклы.

Показано, что хаотические аттракторы типа циклов интервалов также могут использоваться для представления информации. Реализованы функции хаотического сканирования памяти, распознавания искаженной или неполной информации, доступ к информации с помощью хаотической синхронизации и т.п. Практическая значимость разработанных моделей показана на примере создания электронных библиотек и прототипов информационно-поисковых систем с развитыми поисковыми возможностями.

Вторая половина диссертации Ю.В. Андреева посвящена проблемам передачи информации, в которых хаотическая динамика обеспечивает уникальные возможности.

В четвертой главе задача разделения зашумленной суммы хаотических колебаний решается с использованием базовых механизмов рождения хаоса («растяжение и складывание»). Предложен метод, основанный на итерировании уравнений хаотических источников в обратном времени и отборе нужных ветвей. В этой задаче автор еще раз продемонстрировал взаимосвязи динамического хаоса и теории информации, в частности, существование порога разделения по уровню шума, вытекающего из описания разделяемых хаотических колебаний как информационных последовательностей. Моделирование показало высокую, близкую к предельной, эффективность предложенного метода.

В пятой и шестой главах исследованы задачи, в которых хаотические колебания обеспечивают необычные свойства благодаря неотъемлемой характеристике хаотических колебаний – быстроспадающей автокорреляционной функции. Как показано автором, при многолучевом распространении сверхширокополосных хаотических колебаний это проявляется в отсутствии интерференции, более того, в усилении мощности хаотических колебаний на входе приемника за счет переотражений. При коллективном излучении сверхширокополосных хаотических колебаний ансамблем хаотических источников независимость излучаемых колебаний приводит к появлению свойств, сближающих данные радиосистемы с оптическими: суммирование мощности, отсутствие дополнительной направленности излучения за счет суммирования колебаний и т.п. Анализ автора показал, что с помощью практически любых других применяемых в настоящее время сигналов подобные характеристики не могут быть обеспечены.

### Научная новизна и практическая значимость

Несомненным научным достижением диссертационной работы Ю.В. Андреева является решение задачи записи информационных последовательностей на динамических аттракторах (периодических траекториях и хаотических аттракторах) одномерных и многомерных отображений. Идеи использования динамических объектов для хранения информации рассматривались и ранее<sup>1</sup>. Однако авторы ранних работ скептически оценивали возможность практического использования периодических орбит, составляющих «скелет» хаотического аттрактора. В частности, высказывались мнения, что периодические траектории имеют малую информационную емкость, а аттракторы имеют фрактальные бассейны притяжения, вследствие чего для предсказания конечного аттрактора требуется высокая точность задания начальных условий. Предполагалось, что в моделях памяти можно хранить не более нескольких образов.

Ключевая идея данной диссертационной работы заключается в том, что эффективность естественных систем обработки информации связана не столько с их структурной сложностью, сколько с возможностью реализации в них сложного, в том числе хаотического поведения. Именно поэтому для реализации модели памяти были выбраны отображения. Простота этой динамической системы, ее высокая вычислительная эффективность, а также совокупность предложенных алгоритмов представления данных позволили осуществить запись практически неограниченного объема информации, отработать вопросы записи и извлечения, реализовать широкий круг функций обработки. Цикл работ, посвященных записи и обработке информации с помощью динамических аттракторов отображений, оказал большое влияние на работы по исследованию и моделированию информационных процессов в мозге и в значительной степени способствовал тому, что концепция динамических принципов обработки информации мозгом стала общепринятой.

---

<sup>1</sup> Николис Дж. Динамика иерархических систем. – М.: Мир, 1989.

Grebowicz C., Ott E., Yorke J. Fractal Basin Boundaries, Long-Lived Chaotic Transients, and Unstable-Unstable Pair Bifurcation // Phys. Rev. Lett., 1983, vol. 50, p. 935.

Tsuda I., Koerner E., and Shimizu H. Memory dynamics in asynchronous neural networks // Progress of Theoretical Physics, 1987, vol. 78, pp. 51–71.

Результаты этой части работы могут найти применение при разработке информационно-поисковых систем, систем документооборота, на информационных серверах, в издательском деле (электронные книги, учебники) и т.п.

В работе впервые разработан метод разделения суммы хаотических колебаний на компоненты, непосредственно использующий динамику хаотических источников. Распространение этого подхода на хаотические системы с непрерывным временем позволит говорить об одновременной передаче нескольких хаотических несущих в общем канале радиосвязи.

Впервые отмечено практическое отсутствие интерференционной картины при многолучевом распространении сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов. Обнаружено и всесторонне исследовано явление многолучевого усиления мощности хаотических колебаний на входе приемника, что можно рассматривать как научное достижение.

Также в работе впервые аналитически, путем моделирования и экспериментально исследована структура поля излучения ансамбля источников сверхширокополосных хаотических колебаний.

Можно заключить, что совокупность результатов исследований по использованию хаотической динамики в задачах передачи информации внесла значительный вклад в решение проблемы создания сверхширокополосной беспроводной инфраструктуры связи.

### **Достоверность и обоснованность результатов диссертации**

Достоверность результатов, научных выводов и положений обусловлена применением обоснованных аналитических и численных методов и (в части результатов) подтверждена физическими экспериментами.

### **Вопросы и замечания**

1. В главе 4 оценка порога разделения по уровню шума делается на основании объема информации, суммарно производимой отображениями. Известно, что суммирование информационных потоков сопровождается потерей информации. Учитывался ли этот эффект при оценке порога разделения?

2. Имеются отдельные стилистические недочеты и повторы.

### **Заключение**

Несмотря на эти замечания, можно заключить, что диссертационная работа Ю.В. Андреева «Нелинейная и хаотическая динамика в задачах обработки и передачи информации» выполнена на высоком уровне. Это законченная научная работа на актуальную тему, научными достижениями которой являются по меньшей мере решение крупной научной проблемы хранения и обработки информации с использованием хаотической динамики нелинейных динамических систем, а также обнаружение нового радиофизического явления усиления мощности сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов в многолучевой среде. Кроме того, значительный вклад в решение проблемы создания сверхширокополосной беспроводной инфраструктуры связи внесли результаты исследований, связанных с использованием хаотической динамики в задачах передачи информации.

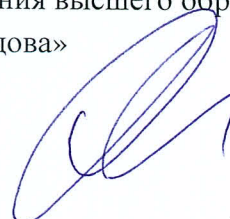
Диссертация оформлена в соответствии с правилами ВАК. Материалы диссертации опубликованы в ведущих российских и зарубежных реферируемых научных журналах и доложены на тематических российских и международных научных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа отвечает критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемых ВАК РФ к диссертациям, представленным на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Содержание диссертации соответствует специальности. Считаю, что автор работы Юрий Вениаминович Андреев заслужи-

вает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика (физико-математические науки).

### Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, профессор, первый проректор федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ярославский государственный университет имени П.Г. Демидова»



С.А. Кашенко

28.01.2019 г.

Подпись Кашенко Сергея Александровича заверяю



Кашенко Сергей Александрович  
доктор физико-математических наук,  
профессор, специальность 01.04.03  
«Дифференциальные уравнения, динамические системы и оптимальное управление».  
150003, г. Ярославль, ул. Советская, д. 14, тел. +7 (4852) 79-77-90, [kasch@uniyar.ac.ru](mailto:kasch@uniyar.ac.ru)