

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора ИПФ РАН по
научной работе, д.ф.-м.н.



М.Ю. Глявин

«26» декабря 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН) 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 диссертационной работы

Актуальность диссертационной работы Ю.В. Андреева связана с запросом на практическое использование хаотической динамики для решения насущных научно-технических задач, который возник в начале 1990-х гг. и остается важным по сей день. Пожалуй, самым активно развиваемым направлением приложения хаоса стали информационные технологии, а именно задачи обработки и передачи информации. Интерес к хаосу в информационных технологиях во многом связан с обнаружением хаоса в работе мозга и с надеждами, что системы обработки информации на основе хаотической динамики смогут обеспечить высокую эффективность. Автору данной диссертационной работы удалось подтвердить эти надежды и построить простые и действительно эффективные модели памяти на основе динамических аттракторов систем с дискретным временем.

Существенный вклад сделан автором также в приложении хаоса к задачам передачи информации, в которых достаточно остро стоит вопрос создания сверхширокополосной беспроводной инфраструктуры связи. Решению этой задачи посвящена вторая часть данной диссертационной работы. Автору удалось найти такие радиофизические приложения, в которых хаотические системы и хаотические колебания обеспечивают неоспоримые уникальные характеристики, которые не могут быть обеспечены другими типами сигналов.

Научная новизна и достоверность полученных результатов

Диссертация Ю.В. Андреева состоит из введения, шести глав и заключения.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, приведены цели и задачи диссертационного исследования, научная новизна, практическая значимость работы и степень достоверности результатов исследования, а также список положений, выносимых на защиту.

В первой главе диссертации проведен достаточно подробный аналитический обзор научно-технической литературы, посвященной исследованию вопросов обработки информации в биологических нейронных системах, моделированию таких систем, а также вопросам реализации искусственных информационных систем на основе идей нелинейной динамики.

Во второй главе созданы основы теории записи информации на динамических аттракторах систем с дискретным временем и реализованы базовые функции обработки информации (запись, хранение, извлечение) с помощью нелинейной динамики. Для

этого предложен метод синтеза отображений различной размерности с заданными предельными циклами в фазовом пространстве. Продемонстрирована возможность ассоциативного доступа к записанной информации, т.е. извлечения информации по малому фрагменту. Выполнены оценки информационной емкости записи и проанализированы ее ограничения. Предложены решения по увеличению предельной емкости записи путем синтеза многомерных отображения, а также путем специального кодирования записываемой информации. Автор предложил три различных подхода к извлечению записанной информации: по начальным условиям, путем управления устойчивостью отдельных информационных циклов и с помощью синхронизации внешним временным рядом. Определены условия, при которых предпочтительно применять эти подходы. Исследована динамика одномерных кусочно-линейных отображений с записанной информацией в зависимости от параметра s , регулирующего устойчивость информационных циклов. Показано, что при увеличении параметра при $s = 1$ происходит бифуркация потери устойчивости предельных циклов отображения, которая сопровождается рождением устойчивых хаотических интервальных циклов в окрестности точечных информационных циклов. При дальнейшем увеличении параметра s интервальные циклы теряют устойчивость и возникает хаотический режим, охватывающий все фазовое пространство. Выявленные режимы в следующей главе автор использует в задачах обработки информации.

Третья глава диссертации посвящена приложениям разработанной в главе 2 теории записи информации на динамических аттракторах одномерных и многомерных отображений к задачам обработки информации. Показана возможность записи информации на хаотических аттракторах типа циклов интервалов. Реализация в динамической системе с записанной информацией глобального хаотического режима позволяет осуществить новый способ обработки информации – хаотическое сканирование памяти, основанное на явлении перемежаемости. Также показано, что такие системы могут работать как фильтр новизны, т.е. при предъявлении запроса отличать записанные информационные блоки от новых. На основе отображения с записанной информацией предложена модель «кратковременной» и «долговременной» памяти, характерной для живых систем. На модельном примере показана возможность использования метода хаотической синхронизации для доступа к записанной информации по запросу.

Областями применения разработанной технологии обработки информации на основе метода записи на циклах и хаотических аттракторах отображений являются информационно-поисковые системы, системы документооборота, информационно-аналитические службы, системы поиска плагиата, рубрикаторы (классификаторы), цифровые архивы неструктурированной информации, информационные серверы, издательское дело (электронные книги, учебники) и т.п.

В четвертой главе предложен и исследован метод разделения хаотических сигналов, основанный на знании динамики источников, порождающих хаотические колебания. Метод основан на итерировании уравнений, обратных к уравнениям, описывающим динамику хаотических источников (итерирование в обратном времени). Он характеризуется экспоненциальной сходимостью и обеспечивает эффективное разделение хаотических сигналов не только при отсутствии, но и при наличии аддитивного гауссовского шума на пути суммарного сигнала к наблюдателю. Обнаружен пороговый эффект разделения, заключающийся в том, что существует значение отношения сигнал/шум в канале $S/\Pi_{\text{вх}}$, ниже которого сигналы не разделяются, а выше которого они могут быть разделены с заданной точностью. Показано, что наличие такого порога связано с информационным содержанием хаотических сигналов. Разработана процедура оценки предельного порогового значения отношения $S/\Pi_{\text{вх}}$. Эта оценка может использоваться в качестве эталонного значения при численной оценке эффективности конкретных алгоритмов разделения.

Эффективность предложенного метода подтверждена путем численного моделирования. По мнению автора, описанный подход к разделению сигналов на основе знания их динамики может найти применение при организации множественного доступа в системах передачи информации на хаотических сигналах.

В пятой главе с единых позиций исследованы явления, связанные с распространением сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов в многолучевой среде. Теоретически и экспериментально показано, что в многолучевой среде сложение СШП сигнала прямого луча на входе приемника с отраженными лучами не приводит к возникновению интерференции. Это связано с тем, что лучи в точке приема являются некоррелированными, благодаря быстроспадающей автокорреляционной функции хаотических сигналов. Автором предсказано, обнаружено и исследовано явление многолучевого усиления хаотических сигналов (увеличение мощности сигнала на входе приемника) в многолучевой среде. Выявлены условия, при которых может наблюдаться многолучевое усиление хаотических радиоимпульсов. Численные и экспериментальные исследования показали, что для сигналов частотного диапазона $F = 3-5$ ГГц коэффициент многолучевого усиления составляет от 5 до 15 дБ. Исследован вопрос о возможности наблюдения данных эффектов для других типов СШП сигналов. Показано, что обнаруженные эффекты отсутствия интерференции и многолучевого усиления возможны почти исключительно для СШП хаотических сигналов.

В шестой главе исследованы характеристики ансамбля СШП прямохаотических излучателей. Использование таких ансамблей позволило решить актуальную проблему увеличения дальности передачи информации на сверхширокополосной хаотической несущей за счет организации коллективного режима излучения радиосигналов. Так как сигналы независимых излучателей в силу их хаотической природы являются некоррелированными, энергетические характеристики излучения ансамбля СШП хаотических передатчиков, как показано в диссертации, существенно отличаются от характеристик как узкополосных ансамблей, так и СШП ансамблей, использующих другие типы СШП сигналов с фиксированной формой волны. Показано, в частности, что если все излучатели ансамбля одинаковы, а их антенны одинаково ориентированы, то плотность мощности поля пропорциональна количеству элементов ансамбля N , соответственно, отношение сигнал/шум в точке приема в N раз больше, чем для одного передатчика, поэтому применение ансамбля обеспечивает увеличение дальности передачи (в свободном пространстве) в \sqrt{N} раз по отношению к дальности одного передатчика. Аналитически выведены выражения для энергетической диаграммы направленности и для границы дальней зоны ансамбля СШП хаотических излучателей. В частности, показано, что при использовании ненаправленных антенн диаграмма всего ансамбля в дальнем поле также является ненаправленной. Это свойство также резко отличает ансамбль СШП хаотических излучателей от ансамблей излучателей других СШП сигналов (сверхкоротких импульсов). Анализ показал, что обнаруженные свойства ансамблей СШП прямохаотических передатчиков – суммирование мощности, ненаправленная ЭДН при использовании ненаправленных антенн, близкая граница дальней зоны – являются уникальными, так как они опираются на некоррелированность (некогерентность) сигналов излучателей ансамбля, и не могут наблюдаться при использовании других типов сигналов (узкополосных или СШП сигналов с фиксированной формой). Эти свойства ансамбля СШП хаотических излучателей могут успешно решать задачу увеличения дальности связи в многоэлементных системах (например, беспроводных сетях связи, в коллективах роботов и т.д.).

В заключении подводятся итоги работы.

Все изложенные в диссертации результаты получены впервые. Достоверность научных выводов диссертации определяется использованием обоснованных методов проведения теоретических и экспериментальных исследований, согласованностью

результатов математического и физического моделирования, воспроизводимостью экспериментальных данных, полученных в различных сериях измерений, а также непротиворечивостью известным из литературы данным (в тех случаях, когда такое сопоставление возможно).

Практическая значимость работы заключается в том, что:

- решена научная задача записи информационных последовательностей на периодических траекториях и хаотических аттракторах одномерных и многомерных отображений. Это открывает возможность создания различных функций обработки информации в динамических системах, включая функции ассоциативной памяти, фильтра новизны, распознавания, классификации, автоматической рубрикации и др.;
- решена задача разделения суммы хаотических сигналов на компоненты, с использованием хаотической динамики формирующих эти сигналы динамических систем, открывающий новые подходы к одновременной передаче информационных сигналов на нескольких хаотических несущих в общем канале связи;
- проведено комплексное исследование особенностей распространения сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов в многолучевой среде, в результате которого обнаружено практическое отсутствие замираний этих сигналов при многолучевом распространении;
- обнаружено и исследовано явление многолучевого усиления, проявляющееся в усилении мощности сигнала на входе приемника в многолучевой среде по отношению к свободному пространству;
- предложено решение научно-технической проблемы увеличения дальности беспроводной передачи информации с помощью сверхширокополосных прямохаотических систем связи в условиях ограничений на спектральную плотность мощности излучения одного устройства; разработан и апробирован метод увеличения дальности сверхширокополосной прямохаотической связи за счет использования коллективного режима некогерентной передачи информации многоэлементным ансамблем прямохаотических передатчиков. Указанные результаты вносят существенный вклад в решение проблемы создания сверхширокополосной беспроводной инфраструктуры локального и более широкого уровня.

В целом, полученные в диссертации результаты могут быть использованы при проведении исследований в организациях, занимающихся теоретическими и прикладными исследованиями хаотической динамики нелинейных систем, включая ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (гор. Москва), Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (гор. Москва), МГУ им. М.В. Ломоносова (гор. Москва), ИПФ РАН (гор. Нижний Новгород), ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (гор. Санкт-Петербург), а также в учебном процессе ВУЗов: МФТИ (гор. Москва), МГУ им. М.В. Ломоносова (гор. Москва), ННГУ им. Н.И. Лобачевского (гор. Нижний Новгород), СГТУ им. Гагарина Ю.А. (гор. Саратов), СНИГУ им Н.Г. Чернышевского (гор. Саратов) и др.

Замечания

Диссертация Ю.В. Андреева написана достаточно ясно и подробно, однако к ней имеется несколько вопросов и замечаний:

1. Во второй главе в разделе, посвященном исследованию динамики отображений с записанной информацией, рассматриваются бифуркации только одномерных систем. Для многомерных отображений результаты не приведены. Вместе с тем, как следует из диссертации, для записи больших объемов информации требуются именно многомерные отображения и знание их динамики может быть важным.

2. В методе разделения сигналов (глава 4) эффективность разделения (отношение сигнал/шум в разделенных сигналах) оценивается не на всем временном интервале.

Почему не принимается во внимание участок сходимости в конце временного интервала?

3. Эффекты, полученные в главах 5 и 6 для систем на сверхширокополосных хаотических сигналах, по-видимому, будут наблюдаться также для случайных и шумоподобных сигналов, ведь для них также характерна быстроспадающая автокорреляционная функция. В чем тогда преимущество хаотических сигналов?

Сделанные замечания, однако, не являются принципиальными и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Диссертация Ю.В. Андреева является законченной научной работой, выполненной на высоком научном уровне. Совокупность изложенных в диссертации результатов позволяет сделать вывод о том, что автором открыто новое направление обработки информации с помощью нелинейных динамических систем с использованием хаотической динамики; обнаружено и исследовано новое радиофизическое явление многолучевого усиления хаотических радиоимпульсов в многолучевой среде; кроме того, полученные во второй части диссертации результаты вносят существенный вклад в решение проблемы создания сверхширокополосной беспроводной инфраструктуры связи локального уровня.

Материалы диссертации достаточно полно опубликованы в ведущих российских и зарубежных реферируемых научных журналах и доложены на тематических российских и международных научных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

По своему научному уровню, новизне полученных результатов и практической значимости диссертация Ю.В. Андреева «Нелинейная и хаотическая динамика в задачах обработки и передачи информации» полностью соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Андреев Юрий Вениаминович, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 - Радиофизика.

Отзыв заслушан, обсужден и утвержден на заседании научного семинара отдела нелинейной динамики (протокол № 3, от 19 декабря 2018 года).

Отзыв подготовил

Некоркин Владимир Исаакович

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий отделом нелинейной динамики, заместитель руководителя Отделения нелинейной динамики и оптики по научной работе

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

Адрес электронной почты: vnekorkin@appl.sci-nnov.ru

Сайт организации: <http://www.iapras.ru>

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

/В.В. Клиньшов/