

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Бутусова Дениса Николаевича

на диссертацию Любченко Дмитрия Олеговича на тему «Сложные динамические режимы, отвечающие концепции грубости и концепции хрупкости, в приложении для средств коммуникации», представленную по специальности 1.3.4 – «Радиофизика»

Актуальность диссертационного исследования

Интерес исследователей и инженеров к приложениям теории хаоса возрастает по мере открытия все новых особенностей и свойств хаотических систем.

Динамические системы со сложным и хаотическим поведением находят применение в генерации псевдослучайных последовательностей, криптографии, радиоэлектронном противодействии и широкополосной связи. Однако практическая реализация подобных систем требует обеспечения их робастности — устойчивости динамики к параметрическим расстройкам, внешним возмущениям и шуму. На протяжении десятилетий данная задача оставалась нетривиальной для решения: несмотря на доказанную структурную устойчивость гиперболических аттракторов (Смейла-Вильямса, Плыкина и др.), их физическая реализация долгое время ограничивалась искусственными математическими конструкциями. Большинство реально наблюдаемых хаотических режимов оказывались неробастными — чувствительными к сколь угодно малым вариациям параметров, что формализуется в концепции «квазиаттрактора». Прогресс в данной области был достигнут благодаря методу манипулирования фазами автоколебаний, предложенных С.П. Кузнецовым, позволившему реализовать гиперболическую динамику в физических радиотехнических и механических системах. Параллельно развивался класс грубых странных нехаотических аттракторов (например, аттрактор Ханга–Отта), сочетающих фрактальную структуру с устойчивостью к параметрическим вариациям, и исследовались экстремальные режимы, такие как экстремальная мультистабильность — сосуществование бесконечного множества аттракторов, чувствительное к изменению начальных условий, параметров и склонное к

самопроизвольному переключению при накоплении ошибок округления. Несмотря на низкую робастность, такие системы открывают новые возможности для криптографии и защищенной связи в случае использования соответствующих численных методов при реализации моделей приемника и передатчика.

Таким образом, параллельное изучение грубых и негрубых («хрупких» в терминологии автора диссертации) динамических режимов в хаотических системах имеет теоретическую и прикладную ценность: грубые динамические режимы способны обеспечить надежность технических устройств связи, а «хрупкие» режимы теоретически позволяют создать новые подходы к сокрытию информации при ее передаче. К таким подходам относятся, например, стеганографические системы.

Диссертационная работа посвящена исследованию вопросов нарушения полной синхронизации между передатчиком и приемником из-за параметрической расстройки, возникающей в реальных системах связи и способам их преодоления, основанным на оригинальных математических моделях и подходах.

Таким образом, можно заключить что диссертационная работа Любченко Дмитрия Олеговича является **актуальным исследованием** как с точки зрения теории моделирования и синхронизации хаотических систем, так и в контексте развития инженерных приложений теории хаоса, в частности, хаотических систем связи и шифрования данных.

Основные результаты и научная новизна диссертации

Автором диссертационной работы предложены новые математические модели генераторов хаотических сигналов с экстремальной мультистабильностью, адаптированные для применения в системах хаотической связи. Разработанные в работе модели системы связи на базе генераторов грубых режимов представляют собой математическую основу для решения задач широкополосной коммуникации с повышенной устойчивостью к расстройке параметров генераторов. Результаты, полученные автором при исследовании процесса синхронизации между передатчиком и приемником, вносят значительный вклад в теорию синхронизации нелинейных динамических систем. Предложенная новая модель системы связи на основе экстремальной мультистабильности в диссипативных системах задает новое направление в разработке систем защиты информации с повышенным уровнем

скрытности. Показаны преимущества применения грубых генераторов по сравнению с негрубыми в системах передачи информации в условиях неидентичности передатчика и приемника и в присутствии спектральных искажений в канале связи. **Достоверность полученных результатов** подтверждается корректностью использованных математических моделей и методов, согласованностью данных, полученных различными численными методами, их воспроизводимостью при изменении параметров моделирования, а также соответствием результатов теоретическим представлениям о грубой и «хрупкой» динамике.

Заявленные результаты диссертационного исследования Любченко Д.О. *оригинальны* и обладают *научной новизной*.

Цель диссертационной работы, ее структура и содержание

Заявленная соискателем *цель диссертационного исследования* – исследование особенностей динамических и статистических закономерностей, присущих сложным режимам поведения систем, обладающих свойством грубости, и систем, обладающих свойством «хрупкости», а также изучение вопросов применения таких систем при создании средств коммуникации. Цель работы сформулирована корректно, содержит указание на потенциальную область применения результатов исследования.

Рассматриваемая диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемых источников и публикаций по теме диссертации. Объем основного текста диссертации 172 страницы, работа включает 66 рисунков и 2 таблицы. Список источников содержит 168 наименований.

Во введении автором обоснована актуальность диссертации, сформулированы научная новизна и практическая значимость исследования. Обозначены цель и задачи диссертации. В соответствии с выбранной методологией определены объект и предмет исследования, выбраны применяемые методы моделирования и анализа хаотических систем, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведена информация об изданиях, в которых опубликованы результаты диссертационного исследования с указанием личного вклада автора.

В первой главе диссертации приводится математическое описание хаотических генераторов, обладающих свойством грубости. Глава посвящена

решению проблемы нарушения полной синхронизации между передатчиком и приёмником из-за неизбежной в реальных условиях расстройки по параметрам. Анализируются две модели генераторов грубых режимов: модель генератора гиперболического хаоса Кузнецова и генераторов на базе странной нехаотической динамики Жалнина-Кузнецова. В главе предложен и проанализирован метод расшифровки, эффективный для грубых режимов гиперболического хаоса и генераторов со странной нехаотической динамикой для передатчика и приемника, обладающих разными параметрами. Выдвинута гипотеза об однородности локальных статистических характеристик грубых систем.

Вторая глава диссертационной работы посвящена исследованию однородности решений с применением локальных статистических характеристик и доказательству соответствующей гипотезы. Для анализа и выявления специфических свойств исследуемых динамических режимов, автор применяет расчет спектра показателей Ляпунова, построение фазовых портретов и анализ спектральных плотностей мощности. Соискатель показывает, что системы на основе грубых аттракторов обладают высокой устойчивостью и робастностью, сохраняя значения старшего показателя Ляпунова при численном моделировании процесса однонаправленной синхронизации. Автор рассматривает устойчивость динамических режимов хаотических осцилляторов как в условиях расстройки по параметрам, так и в условиях частотных искажений. В главе производится оценка сохранности качественной структуры аттрактора приёмника относительно аттрактора передатчика, исследуются статистические закономерности локальных характеристик при расстройках по параметрам. Автор делает вывод, что выдвинутая гипотеза численно подтверждается однородностью значений старшего показателя Ляпунова и корреляцией между передатчиком и приёмником. В главе описано фундаментальное ограничение для рассматриваемых модельных систем: даже сколь угодно малая частотная рассогласованность приёмника или частотное искажение сигнала вблизи основной несущей приводит к потере однородности локальных характеристик.

В третьей главе автор диссертации детально описывает процесс синтеза и анализа математических моделей динамики частицы в математическом бильярде с геометрией типа волновода с «гофрированной осциллирующей границей.

Математическая модель представлена в виде возвратного отображения, описывающего данный бильярд при диссипативном ударе о гофрированную стенку. Достоверность полученной модели динамики частицы подтверждается тем, что в консервативном пределе и при условии стационарности стенки оно сводится к хорошо известному консервативному отображению Теннисона-Либермана-Лихтенберга. В главе показано, что введение даже минимальной диссипации меняет динамику системы, приводя к возникновению в системе множества различных аттракторов. В главе приводится пример построения упрощённых моделей, сохраняющих ключевой эффект разделения режимов, в виде диссипативных возвратных отображений, однонаправленно управляемых гамильтоновыми отображениями.

В четвертой главе диссертации описаны результаты разработки и анализа новой схемы скрытой хаотической связи, основанной на предложенных в предыдущих главах моделях приемников и передатчиков с неустойчивостью динамических режимов. В главе обоснован механизм возникновения экстремальной мультистабильности в диссипативных системах, управляемых гамильтоновыми отображениями. Проводится параметрический поиск с целью установления области существования хаотических решений. Описан теоретический концепт двухканальной схемы защищённой коммуникации с примерами передачи простейших сигналов.

В заключении автор формулирует основные результаты работы, определяет их соответствие задачам диссертационного исследования, обобщает и систематизирует полученные новые знания о динамике и синхронизации хаотических систем, а также проводит сравнение с известными достижениями в области нелинейной динамики и хаотических систем связи. Соискатель демонстрирует при этом высокую осведомленность о современном состоянии предметной области диссертации.

Диссертация написана грамотным научным языком, хорошо оформлена и иллюстрирована, внутренне непротиворечива и целостна. Экспериментальные результаты диссертационного исследования вполне согласуются с теоретическими положениями работы.

Автореферат *полностью соответствует* содержанию диссертации. Недостоверных сведений о публикации или апробации результатов диссертационного исследования в автореферате *не содержится*.

Результаты диссертационного исследования были внедрены в процесс научных исследований в рамках НИР РНФ № 21-12-00121 «Радиофизическое моделирование сложного поведения систем различной природы и размерности в рамках универсальных подходов нелинейной динамики и теории колебаний». В тексте диссертации и автореферата *содержатся предложения* по дальнейшему внедрению полученных автором результатов.

Степень опубликованности и апробации результатов диссертации

По результатам диссертационного исследования автором опубликовано 28 статей в рецензируемых изданиях, в том числе 5 работ в журналах из перечня ВАК и высокорейтинговых международных изданиях. *Апробация результатов* проводилась более чем на 10 международных и всероссийских конференциях и может считаться достаточной. *Личный вклад соискателя* подробно описан в автореферате с корректным разграничением результатов между соискателем и соавторами статей по теме диссертации.

Замечания по диссертационной работе

По диссертационной работе можно сделать следующие замечания:

1. В качестве численного метода для дискретизации дифференциальных уравнений, описывающих хаотические осцилляторы в главах 1 и 2, автор выбрал «широко апробированный метод Рунге-Кутты 4-го порядка» (цит., с.8). В то же время, с учетом современных достижений вычислительной математики и теории моделирования хаотических систем, данный выбор не вполне очевиден и недостаточно обоснован в тексте работы. Вопросам корректного применения численных методов интегрирования при моделировании хаотических систем посвящено множество работ, напр. известная статья Роберта Корлесса и Кристофера Эссекса «Численные методы могут подавлять хаос?» (Phys. Lett. A, 1991). Известно, что несимметричные методы численного интегрирования приводят к нарушению динамики дискретных моделей непрерывных хаотических систем, создавая т.н. искусственную диссипативность. Это может потенциально влиять и на

«хрупкость»\робастность дискретных моделей. В диссертации вопрос выбора численного метода не поднимается, экспериментальная проверка на сохранение режимов (напр., построение шаговых бифуркационных диаграмм, диаграмм с продолжением, оценка динамики фазового объема на больших временах моделирования) не проводится. Неясно, рассматривал ли соискатель вопросы, связанные с ограничениями разрядной сетки при реализации систем связи на вычислителях с ограниченной разрядной сеткой.

2. В диссертации не обсуждаются проблемы обработки и кондиционирования хаотических сигналов, также представляющие собой существенный технологический барьер на пути создания хаотических систем связи. Рассогласование по параметрам приемника и передатчика, рассматриваемое автором, это один из примеров из множества сложностей, возникающих при практической реализации хаотических систем коммуникации. Не менее острыми являются, например, проблема нелинейных фазовых искажений хаотического сигнала при прохождении различных сред и их границ, задача восстановления полностью утраченной части сигнала или разреженных данных, часто решаемая при помощи каскада синхронизированных осцилляторов или возвратной симметричной синхронизации, задача выделения нескольких хаотических сигналов из фонового шума при малом отношении «сигнал\шум». Позволяют ли предлагаемые автором подходы эффективно решать указанные выше проблемы?

3. Третья глава диссертации представляет собой существенный теоретический интерес с точки зрения изучения математических бильярдных режимов ускорения частиц, однако концептуально она слабо связана с остальной диссертацией, представляя собой отдельную ветку диссертационного исследования. Математический аппарат в главе также отличен от предыдущих двух: автор от дифференциальных уравнений переходит к возвратным отображениям. Не вполне ясно, каково реальное значение описанных в этой главе результатов для хаотических систем связи. Если смысл в том, что необходимо синтезировать экстремально мультистабильные дискретные отображения для хаотических систем связи, то данную задачу можно решить, не прибегая к столь изощренным математическим упражнениям.

4. Автор диссертации справедливо отмечает, что «прямое количественное сравнение эффективности хаотических систем с традиционными методами коммуникации затруднено» (с.19), однако при этом дает следующее объяснение: «это связано со значительным разнообразием подходов к модуляции и демодуляции хаотических сигналов, а также тем, что возможности и принципы построения таких систем связи изучены ещё не полностью». Означает ли это утверждение, что сравнивать еще нечего, т.к. полнофункциональные хаотические системы связи еще не разработаны? Если да, то почему?

5. Известно, что существенным технологическим ограничением при создании реальных хаотических систем связи выступает сложность практической реализации приемника и передатчика. Из диссертации неясно, какую именно реализацию генераторов выбирает в итоге автор: аналоговую, цифровую, гибридную? Если речь идет о цифровой реализации, то достижение идентичности дискретных приемника и передатчика представляет собой относительно простую задачу. Если же речь об аналоговой схеме, как упомянуто в главе 4 работы, то установление в ней значений параметров (и особенно начальных условий), оптимальных для наблюдения хаотической экстремальной мультистабильности, представляет собой едва ли не более сложную инженерную задачу, чем синхронизация и обеспечение устойчивости режимов. Проводил ли автор физические эксперименты с подобными схемами? Как именно реализовать в аналоговом виде дискретное отображение (4.1-4.2)? Одни только тригонометрические функции, присутствующие в обоих компонентах модели, ставят перед дерзнувшим подойти к такой системе схемотехником нетривиальную задачу. Не будет ли создание генератора с экстремально мультистабильными режимами колебаний чрезмерно сложной задачей с точки зрения схемотехнической реализации?

Указанные недостатки и замечания *не снижают* общей значимости и достоверности полученных в диссертационном исследовании научных результатов и выводов.

Заключение

Диссертационная работа Любченко Дмитрия Олеговича на тему «Сложные динамические режимы, отвечающие концепции грубости и концепции хрупкости, в

приложении для средств коммуникации» соответствует паспорту специальности 1.3.4 – «Радиофизика» и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития нелинейной динамики, теории и приложений динамического хаоса.

Диссертация **соответствует** требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, указанным в п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор, Любченко Дмитрий Олегович, **заслуживает** присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – «Радиофизика».

Заведующий кафедрой систем автоматизированного проектирования ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», доктор физико-математических наук по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», доцент

БЗ
24.02.2026

Бутусов Д.Н.

Адрес: 197022, субъект Российской Федерации: Санкт-Петербург, город Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, дом 5, литера Ф.
Телефон: +7(950) 008-71-90.
E-mail: dnbutusov@etu.ru.

Подпись Бутусова Д.Н. заверяю:

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮЩЕГО
НАЧАЛЬНИК ОДС
Т.Л. РУСЯЕВА



24.02.2026