

На правах рукописи

Рыбин Вячеслав Геннадьевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ГЕНЕРАТОРОВ ХАОТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ
ПОЛУЯВНЫХ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ С УПРАВЛЯЕМОЙ
СИММЕТРИЕЙ**

Специальность 1.2.2. Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» на кафедре систем автоматизированного проектирования.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Бутусов Денис Николаевич

Официальные оппоненты: **Осипов Григорий Владимирович**,
доктор физико-математических наук, доцент,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»,
кафедра теории управления и динамики систем,
заведующий кафедрой

Логинов Сергей Сергеевич, доктор технических
наук, доцент, Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Казанский национальный
исследовательский технический университет им. А.Н.
Туполева-КАИ», кафедра электронных и квантовых
средств передачи информации, профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Северо-Кавказский
федеральный университет», г. Ставрополь

Защита состоится 03 июля 2024 года в 14.00 на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.038.03, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» по адресу: Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, ауд. 554/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУТ по адресу Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1 и на сайте www.sut.ru.

Автореферат разослан 03 мая 2024 года

Ученый секретарь
диссертационного совета 99.2.038.03,
канд. техн. наук, доцент

А.Г. Владыко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы исследования. Хаотические динамические системы, обладая высокой чувствительностью к изменению параметров, эргодичностью и шумоподобностью порождаемых сигналов используются при разработке датчиков, систем обнаружения дефектов силовых машин, криптографических алгоритмов и др. Одним из важных приложений теории хаоса являются защищенные системы связи, использующие хаотические сигналы, обладающие сходными с шумом спектральными и статистическими характеристиками и непредсказуемыми на больших интервалах времени. Важными отличиями хаотических сигналов от шумов выступают их детерминированность, повторяемость и управляемость свойств, достигаемые за счет наличия системы уравнений, определяющих динамику. Преимуществами хаотических сигналов являются простота управления режимами колебаний хаотического генератора, возможность генерации множества ортогональных сигналов со схожими статистическими характеристиками и способность к синхронизации двух и более генераторов хаотических сигналов. Применение хаотических сигналов создает потребность в новых математических и компьютерных моделях генераторов таких сигналов, обладающих высокой степенью адекватности непрерывным прототипам, большим пространством параметров и способным поддерживать заданный режим колебаний на длительных интервалах времени.

Можно выделить следующие проблемы, возникающие при создании генераторов хаотических сигналов, применяемых в хаотических системах связи (ХСС):

1. При разработке когерентных хаотических систем связи, основанных на синхронизации приемника и передатчика, предъявляются высокие требования к скорости и точности синхронизации. Для решения данной проблемы требуется создать новые математические и компьютерные модели генераторов хаотических сигналов, а также соответствующие процедуры оптимизации коэффициентов синхронизации.

2. Существующие способы модуляции хаотических сигналов не позволяют создать полнофункциональные системы связи на их основе вследствие известных сложностей с выбором пространства параметров (ключей) нелинейной системы. Так, модуляция на основе изменения параметра может приводить к выходу генератора из заданного хаотического режима колебаний, что негативно отражается на скрытности передачи данных. Таким образом, существует потребность в новых способах модуляции хаотических сигналов, лишенных данного недостатка.

3. Нехватка специализированных методов и средств генерации и обработки хаотических сигналов. При этом подходы, используемые в системах на основе гармонических сигналов не всегда применимы в случае ХСС вследствие широкополосности и нерегулярности хаотических сигналов. Для решения данной проблемы требуется создать специализированные алгоритмы генерации и обработки хаотических сигналов.

4. Необходимость применения специализированных методов и инструментов анализа свойств генераторов хаотических сигналов и основных характеристик проектируемой ХСС, как правило, отсутствующих в средах моделирования и разработки систем связи.

Таким образом, можно сделать вывод что широкое внедрение приложений теории хаоса в инженерную практику ограничено, в том числе, нехваткой цифровых устройств генерации, модуляции и обработки хаотических сигналов.

Актуальность диссертационной работы заключается в решении проблемы синтеза цифровых моделей генераторов хаотических сигналов путем создания новых средств математического и компьютерного моделирования хаотических систем в приложении к когерентным ХСС. Для решения обозначенной проблемы предложен новый способ модуляции хаотических сигналов на основе управления симметрией конечно-разностных схем, полученных полуявными численными методами интегрирования, вносящий минимальные изменения в динамику дискретной хаотической модели при кодировании полезной информации. Разработаны математические и исполняемые модели приемника и передатчика, реализующие как известные способы модуляции хаотических сигналов, так и перспективный алгоритм модуляции на основе управляемой симметрии, и более полно воспроизводящие динамические режимы колебаний непрерывной системы-прототипа. Созданы алгоритмы и программные средства оптимизации коэффициентов синхронизации, позволяющие повысить характеристики перспективных когерентных хаотических систем связи.

Значимость вышеперечисленных научных результатов в контексте проблематики предметной области образует актуальность диссертационного исследования.

Степень разработанности темы диссертации. Точкой отсчета для изучения приложений хаотических систем к задачам связи является классическая работа К. Шеннона, вышедшая в 1947 г., ключевым результатом которой было открытие того факта, что шумоподобный сигнал с максимальной энтропией приводит к оптимизации

пропускной способности канала. Разработка и исследование способов компьютерного моделирования и построения исполняемых моделей хаотических систем отражены в работах ряда отечественных и зарубежных ученых: Бутусова Д.Н., Жукова К.Г., Каримова А.И., Кузнецова Н.А., Островского В.Ю. Симметричные геометрические численные методы интегрирования исследовались Касасом Ф., Дальквистом Г., Хайрером Э., Ваннером Г. Основоположниками хаотической синхронизации традиционно считаются Кэрролл Т. и Пекора Л., впервые описавшие это явление в 1990 г. Эти работы были продолжены Йовичем Б., Курцем Ю., Парком Дж. и Строгатцем С. Прикладные исследования в области синхронизации генераторов хаотических сигналов проводили Белых В.Н., Дмитриев А.А., Леонов К.Н., Макаренко А.В., Матросов В.В., Москаленко О.И., Осипов Г.В., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. и др. Диссертационная работа опирается на труды ряда авторов в области применения генераторов хаотических сигналов в системах передачи информации: Андреева Ю.В., Гавришева А.А., Дмитриева А.С., Каримова Т.И., Кислова В.Я., Короновского А.А., Кузьмина Л.В., Лазарева В.А., Леонова К.Н., Логинова С.С., Семерника И.В., Панаса А.И. Среди исследователей когерентных ХСС можно выделить Курияна А., Боккаллетти С., Целиковского С., Сердейру Х., Чуа Л. Метрики, связанные с оценкой обнаруживаемости, а также характеристик генераторов хаотических колебаний исследовались Куомо К., Дидье Х., Дьюровичем И., Хаслером М., Каддумом Г., Кеннеди М., Парлитцем У., Пересом Г. и др.

Анализ предметной области показывает, что многие описанные в литературе ХСС обладают низкой производительностью в условиях зашумления канала передачи данных. Это приводит к потребности в эффективных генераторах хаотических колебаний. В частности, очевидно, что для создания практически применимых ХСС необходимо разработать новые способы модуляции-демодуляции, основанные на эффективных алгоритмах манипуляции хаотическими сигналами в зашумленной среде при минимальном искажении и деградации динамики генерирующей системы при долгосрочном моделировании.

Объектом исследования являются цифровые генераторы хаотических сигналов. **Предметом исследования** являются математическое и программное обеспечение систем компьютерного моделирования генераторов хаотических сигналов в приложении к хаотическим системам связи.

Цель диссертационной работы – повышение адекватности математического и компьютерного моделирования, а также основных характеристик цифровых генераторов хаотических сигналов, применяемых в хаотических системах связи.

Задачи диссертационной работы

В процессе выполнения работы решены следующие **научно-технические задачи**:

1. Разработка нового способа модуляции хаотических сигналов, основанного на особых свойствах полуявных численных методов интегрирования и конечно-разностных схемах с управляемой симметрией фазового пространства.

2. Разработка семейства математических и исполняемых моделей генераторов хаотических сигналов, позволяющих реализовать новый способ модуляции и обладающих большей степенью адекватности непрерывным прототипам.

3. Создание алгоритмов и программных средств компьютерного моделирования и исследовательского проектирования генераторов хаотических сигналов.

4. Экспериментальная оценка характеристик разработанных моделей генераторов хаотических сигналов в составе хаотических систем связи с использованием компьютерного и полунатурного моделирования.

Научная задача: разработка математического и программного обеспечения генераторов хаотических сигналов на основе полуявных численных методов интегрирования с управляемой симметрией.

Научная новизна результатов исследования.

1. Разработан новый способ модуляции хаотических сигналов, использующий особые свойства полуявных симметричных численных методов интегрирования. Предложенный способ модуляции основан на свойстве управляемой симметрии полуявной конечно-разностной схемы и вносит минимальные искажения в динамику дискретного нелинейного осциллятора при кодировании информации.

2. Предложены математические и исполняемые модели хаотических генераторов широкополосных сигналов, реализующие авторский способ модуляции хаотических сигналов с управлением симметрией дискретных конечно-разностных схем и обладающие большей адекватностью непрерывным прототипам, чем решения, полученные с помощью явных и неявных методов численного интегрирования. Создание подобных генераторов расширяет список эффективных методов модуляции хаотических сигналов при создании ХСС, и позволяет повысить качество решений в области когерентных ХСС.

3. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для оптимизации коэффициентов синхронизации при разработке приемников и передатчиков хаотического сигнала, применяемых в когерентных ХСС, а также новый способ оценки

различимости сигналов при модуляции для когерентных ХСС на основе модифицированного метода возвратных преобразований.

Теоретическая значимость работы. Диссертационная работа вносит вклад в теорию численного моделирования нелинейных динамических систем, предлагая новые математические модели хаотических осцилляторов с управляемой симметрией конечно-разностной схемы. В работе также изложен новый способ управления фазовым пространством дискретных хаотических отображений при проектировании генераторов хаотических колебаний с заданными характеристиками, получены новые знания о влиянии коэффициента симметрии на динамику дискретных хаотических осцилляторов.

Практическая значимость работы. В работе предложен новый эффективный способ модуляции хаотических сигналов, превосходящий по соотношению «различимость-скорость передачи» способы, применяемые в настоящее время. Разработаны алгоритмы оценки свойств генераторов хаотических сигналов в составе когерентных ХСС, которые могут быть использованы для повышения характеристик перспективных ХСС.

Практическая реализация и внедрение результатов работы. Разработанное программное обеспечение внедрено в научно-производственный процесс ООО «НПФ «Модем» и используется при подготовке бакалавров по направлению 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» в рамках учебного процесса кафедры САПР СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Диссертационные исследования выполнены в рамках гранта Российского научного фонда, договор №20-79-10334 от 27.07.2020, НИР «Защищенные системы связи на основе хаотических отображений с управляемой симметрией».

Методология и методы исследования. В работе используются положения теории подобия и моделирования, теоретические основы нелинейной динамики, методы анализа нелинейных систем, методы оптимизации, технологии разработки виртуальных приборов и полунатурное моделирование. В основе предложенного способа модуляции лежит дискретизация моделей непрерывных систем полуживыми численными методами интегрирования с управляемыми геометрическими свойствами.

Научные положения, выносимые на защиту

1. **Способ модуляции хаотических сигналов** на основе управления симметрией полуживых конечно-разностных моделей нелинейных динамических систем.

2. Математические и исполняемые модели хаотических генераторов широкополосных сигналов, реализующие способ модуляции хаотических сигналов на основе управляемых свойств полуживных симметричных **численных методов интегрирования**.

3. Алгоритмы и программное обеспечение для оценки характеристик генераторов хаотических колебаний, оптимизации коэффициентов синхронизации и оценки различимости сигналов при передаче данных для решения задач построения хаотических систем связи.

Достоверность научных результатов. Достоверность результатов работы подтверждается результатами компьютерного и полунатурного моделирования, экспериментами с исполняемыми моделями генераторов хаоса и имитационным моделированием. Предложенные средства оценки характеристик ХСС апробированы при создании прототипа ХСС в рамках НИР РФ № 20-79-10334 от 27.07.2020 «Защищенные системы связи на основе хаотических отображений с управляемой симметрией». Экспериментальные результаты диссертационного исследования хорошо согласуются с теоретическими положениями работы.

Апробация результатов работы. Результаты работы апробировались на следующих международных конференциях: XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM) (Санкт-Петербург, Россия, 2020); 10th, 11th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO) (Будва, Черногория, 2021, 2022); Mathematics and its Applications in New Computer Systems (MANCS) (Ставрополь, Россия, 2021).

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы опубликованы в 27 научных трудах, из них 3 публикации в рецензируемых научных изданиях из перечня, рекомендованного ВАК Минобрнауки РФ (2 работы из которых опубликованы в изданиях, соответствующих искомой специальности), 14 публикаций, индексируемых в международной базе данных SCOPUS, в том числе 7 статей в журналах первого квартала по системе Web of Science. Имеется 9 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, 1 отчет о НИР.

Соответствие паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует пунктам 3, 5 и 6 паспорта научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Проведенные исследования соответствуют формуле специальности.

Личный вклад автора. Автором предложен новый способ модуляции хаотических сигналов, использующий свойство управляемой симметрии полуживных симметричных численных методов интегрирования, созданы математические и исполняемые модели хаотических генераторов, реализующих новый способ модуляции хаотических сигналов на основе управляемой симметрии, разработаны алгоритмы и программное для оптимизации коэффициентов синхронизации генераторов хаотических колебаний, и новый способ оценки различимости сигналов при модуляции для когерентных ХСС на основе модифицированного метода возвратных преобразований. Перечисленные результаты получены автором лично.

Структура и объем диссертации. Диссертация работа состоит из введения, 4 глав с выводами, заключения и 2 приложений. Текст изложен на 172 листах, содержит 79 рисунков, 4 таблицы, список литературы состоит из 133 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы актуальность и новизна диссертации, сформулированы цели и задачи исследования. Определены объект и предмет исследования, выбран методологический аппарат исследования, а также изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена особенностям математического и компьютерного моделирования генераторов хаотических сигналов. Изложена классификация систем передачи цифровых сообщений на основе динамического хаоса. Описаны распространенные подходы к моделированию технических систем, использующих хаотические сигналы, проанализированы их недостатки с точки зрения инструментов моделирования. Рассмотрена типовая структура обобщенной когерентной ХСС, определены место и роль в ней генераторов хаотических сигналов. Сформулированы требования к математическому аппарату, используемому при синтезе цифровых моделей генераторов хаотических колебаний.

Показано, что одним из существенных барьеров для масштабного применения ХСС в реальных приложениях выступает недостаток эффективных с точки зрения соотношения «различимость-скорость передачи» способов модуляции хаотических сигналов и соответствующих им математических моделей приемников и передатчиков. Рассмотрены основные способы модуляции, используемые при разработке когерентных ХСС. Анализ недостатков исследованных способов модуляции

показывает необходимость создания не только эффективного способа модуляции, но и реализующих его математических моделей генераторов хаотических сигналов, обладающих высокой степенью адекватности непрерывным прототипам.

В главе представлены основные характеристики ХСС, используемые при оценке качества генераторов хаотических колебаний: помехоустойчивость, оцениваемая через расчет процента битовых ошибок, различимость сигналов при модуляции, пропускная способность канала связи и скорость передачи данных. Кратко изложен модель-ориентированный подход к созданию ХСС, инкорпорирующий в единую концепцию разработанные в диссертационном исследовании новые исполняемые модели генераторов хаотических сигналов, а также процедуры оценки различимости сигналов при модуляции, помехозащищенности и скорости передачи данных. Глава завершается обоснованием актуальности диссертационного исследования, уточненной постановкой цели и задач исследования.

Вторая глава посвящена математическому обеспечению цифровых генераторов хаотических колебаний. Приведены основные требования к математическим и исполняемым моделям генераторов хаотических сигналов. В качестве метода дискретизации непрерывных моделей хаотических систем выбран композиционный полуявный метод интегрирования (КД). В отличие от неявных методов, используемых в распространенных средствах моделирования и ориентированных на достижение максимальной устойчивости моделей, метод КД хорошо подходит для моделирования хаотических систем, поскольку он предотвращает смещение хаотических траекторий дискретной системы на периодические или квазихаотические орбиты во время моделирования при ограниченной длине разрядной сетки. Также, в отличие от полностью неявных методов он не подавляет хаотический режим колебаний как в консервативных, так и в диссипативных системах.

Запишем метод КД - Ψ с размером шага интегрирования h , как:

$$\Psi_h = \Phi_{h/2} \circ \Phi_{h/2}^* \quad (1)$$

Формула (1) представляет собой композицию пары опорных сопряженных Д-методов $\Phi_{h/2}$ и $\Phi_{h/2}^*$, взятых с половиной шага $h/2$. В дискретный момент времени t_n , когда решение x_n уже известно, можно применить пару методов $\Phi_{h/2}$, чтобы получить x_{n+1} .

Имея динамическую систему порядка $N \geq 2$:

$$\dot{x} = f(x), x = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T, \quad (2)$$

Ее можно разбить на N частей, например, для случая $N = 2$:

$$\begin{aligned}\dot{u} &= f_u(u, w); \\ \dot{w} &= f_w(u, w),\end{aligned}\tag{3}$$

Тогда метод $\Phi_{h/2}$ имеет вид:

$$\begin{aligned}u_{n+\frac{1}{2}} &= u_n + \frac{h}{2} \cdot f_u(u_n, w_n); \\ w_{n+\frac{1}{2}} &= w_n + \frac{h}{2} \cdot f_w\left(u_{n+\frac{1}{2}}, w\right),\end{aligned}\tag{4}$$

Сопряженный с $\Phi_{h/2}$ метод $\Phi_{h/2}^*$ описывается следующим уравнением:

$$\begin{aligned}w_{n+1} &= w_{n+\frac{1}{2}} + \frac{h}{2} \cdot f_w\left(u_{n+\frac{1}{2}}, w_{n+1}\right); \\ u_{n+1} &= u_{n+\frac{1}{2}} + \frac{h}{2} \cdot f_u(u_{n+1}, w_{n+1}).\end{aligned}\tag{5}$$

Метод (4) является полностью явным, а выражения сопряженного метода (5) содержат одномерную неявность. Одним из свойств метода КД является то, что в нем может существовать лишь одномерная диагональная неявность, которая может быть разрешена с помощью метода простых итераций, что позволяет обойтись без организации вычислительно затратных итераций метода Ньютона.

В главе показано, что применение полуявных алгоритмов численного интегрирования для синтеза конечно-разностных схем генераторов хаотических колебаний позволяет повысить адекватность дискретной модели хаотической системы непрерывному прототипу. В главе описаны результаты серии экспериментов по долгосрочному моделированию дискретного генератора хаотических колебаний на основе системы Буали, синтезированного разными методами численного интегрирования при стандартных значениях параметров и для начальных условий $(x_0, y_0, z_0) = (1.2, 1, -0.02)$. В качестве метрики был выбрана динамика фазового объема системы в первом приближении, то есть объем куба, в который вписывается аттрактор. Оценка изменения объема фазового пространства дискретных моделей системы Буали, полученных разными методами численного интегрирования, показана на рисунке 1.

По результатам экспериментов, показанным на рисунке 1 можно сделать вывод, что лучше всего сохраняет динамику исходной системы дискретная модель, полученная полуявным методом КД. Данный генератор демонстрирует практически полное отсутствие изменения фазового объема наравне с эталонным решением, полученным с помощью метода Дормана-Принса (DOPRI78) 8го порядка точности. Решение, полученное полуявным методом средней точки, претерпело небольшое уменьшение фазового объёма. Методы Эйлера-Кромера, а методы явной и неявной средней точки демонстрируют существенную деградацию исходной динамики при долгосрочном моделировании.

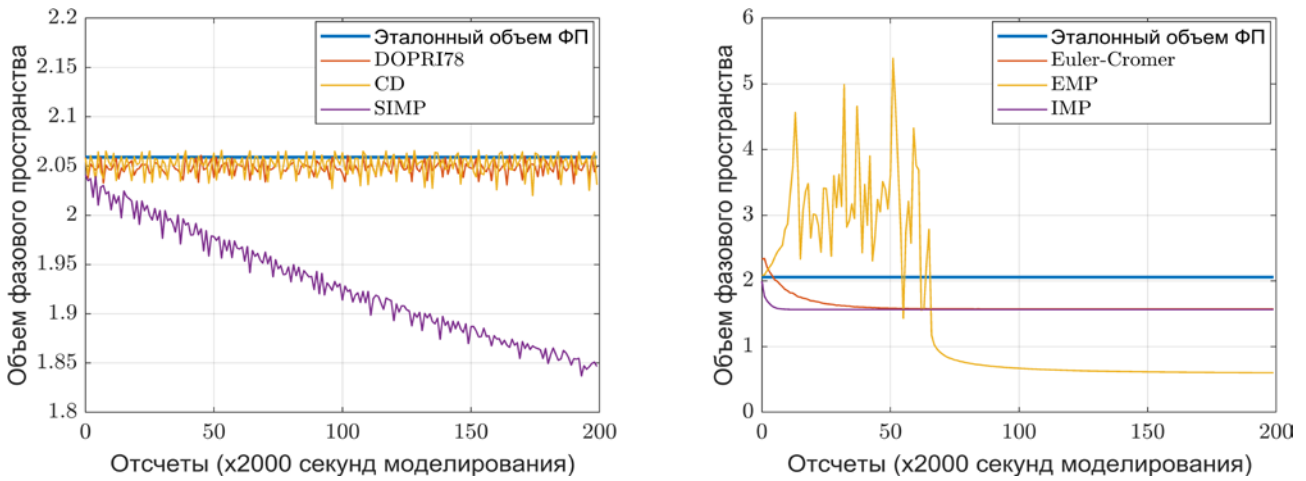


Рисунок 1 – Оценка изменения объема фазового пространства при моделировании системы Буали различными численными методами интегрирования

Деление шага по времени h пополам в уравнении (1) – частный случай более обобщенной формулы адаптивного интегратора. В диссертационном исследовании вводится коэффициент симметрии конечно-разностной схемы s и его применение к размеру шага h , для разбиения на две сопряженные части:

$$\begin{aligned} h_1 &= h \cdot s; \\ h_2 &= h \cdot (1 - s). \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом было сформулировано семейство композиционных самосопряженных полуявных методов с переменной симметрией или методов КДПС:

$$\Psi_{h,s} = \Phi_{h_1} \circ \Phi_{h_2}. \quad (7)$$

Эти методы обеспечивают аффинное преобразование фазового пространства дискретной системы без нарушения хаотического режима при изменении s . Графическая интерпретация метода КДПС представлена на рисунке 2.

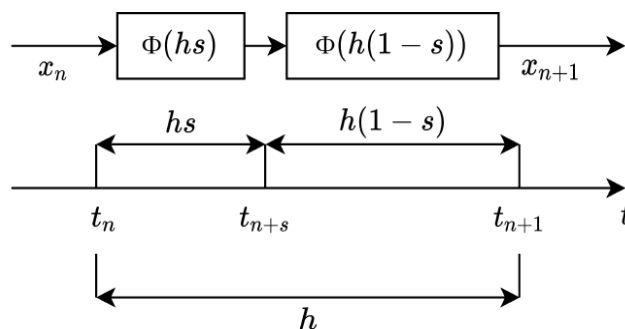


Рисунок 2 – Графическая интерпретация одного шага метода КДПС

В главе приведены результаты анализа численной устойчивости метода КДПС, которые подтверждают предположение о возможности управления численной устойчивостью полуявных конечно-разностных схем через изменение коэффициента

симметрии. Показано, что слабо обнаруживаемое методами анализа динамических систем изменение коэффициента симметрии влечет за собой существенное нарушение процесса синхронизации, что может быть использовано для реализации нового эффективного способа модуляции сигналов в когерентных ХСС – модуляции на основе управляемой симметрии (МУС). Схема ХСС на основе предлагаемых генераторов с МУС показана на рисунке 3.

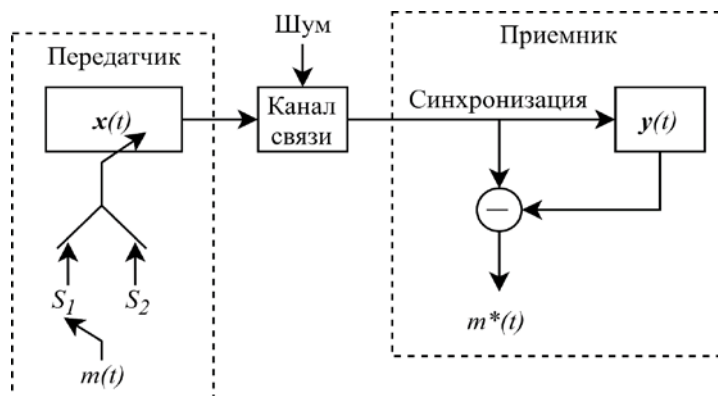


Рисунок 3 – Схема ХСС на основе модуляции коэффициента симметрии

В главе описаны математические модели приемника и передатчика хаотических сигналов, реализующие новый способ модуляции. Глава завершается выводами о требованиях к программному обеспечению для моделирования и оценки характеристик генераторов хаотических сигналов.

В третьей главе диссертационной работы описано программное обеспечение для моделирования и исследования генераторов хаотических колебаний. Приведены способы оценки свойств генераторов хаотических колебаний, и программные средства анализа характеристик ХСС, реализующих эти способы. Предлагаемые инструменты оценки характеристик ХСС включают новые алгоритмы оценки различимости сигналов при модуляции в ХСС, способы и основные инструменты анализа и тестирования характеристик дискретных генераторов хаотических сигналов, используемых в качестве источника несущего сигнала, а также алгоритмы оценки и визуализации характеристик ХСС на основе предложенных генераторов хаотических сигналов при различных уровнях шума в модели тракта передачи данных. Результаты моделирования элементов когерентных ХСС показывают, что использование дискретных генераторов хаотических колебаний, основанных на предложенном способе МУС, несущественно влияет на общую нелинейную динамику системы и ХСС, использующие МУС, могут обладать большей скрытностью по сравнению с системами, основанными на параметрической модуляции.

В главе предложен алгоритм оптимизации параметров синхронизации генераторов хаотических колебаний, позволяющий повысить производительность передачи данных за счет минимизации времени синхронизации. В качестве способов оценки различимости сигналов при модуляции в диссертационной работе исследовано несколько алгоритмов анализа хаотических сигналов. Показано, что ни один из рассмотренных способов оценки не позволяет комплексно оценить искомые характеристики ХСС. Для решения данной проблемы предложена новая модификация метода возвратных преобразований, основанная на комбинированном анализе амплитудных и фазовых изменений динамики сигнала. В главе произведен выбор критериев для сравнения прототипов ХСС в рамках диссертационного исследования, а именно: оценки помехоустойчивости, которая выражается в значении процента битовых ошибок для заданного уровня шума в канале связи, оценки различимости сигналов при модуляции, которая рассчитывается с использованием инструментов спектрального анализа, рекуррентного анализа и анализа на основе численных возвратных преобразований.

Стандартный алгоритм возвратных преобразований (англ. Return Map – RM) основан на нахождении разности, а также среднего значения локальных экстремумов сигнала:

$$A_m = \frac{X_m + Y_m}{2}, B_m = X_m - Y_m, C_m = \frac{X_{m+1} + Y_m}{2}, D_m = Y_m - X_{m+1}; \quad (8)$$

где X_m и Y_m – m -ые максимумы и минимумы сигнала, соответственно. Недостаток стандартного RM-анализа заключается в невозможности обнаружения и визуализации сдвига сигнала по фазе, что делает его непригодным для оценки проектируемых ХСС с точки зрения возможности распознавания фазового хаоса. Для устранения этого недостатка предложены новые разновидности алгоритмов RM-анализа, учитывающие изменение фазовых характеристик сигнала, и программные средства на их основе.

Ключевое отличие предлагаемого алгоритма фазового RM-анализа от классического амплитудного RM-анализа заключается в том, что для вычисления значений A , B , C , и D используются расстояния между соседними экстремумами W_1 и U_1 или расстояния между соседними максимумами и минимумами W_2 и U_2 :

$$\begin{aligned} W_{1,m} &= T(Y_m) - T(X_m), U_{1,m} = T(X_m) - T(Y_{m-1}); \\ W_{2,m} &= T(X_m) - T(X_{m-1}), U_{2,m} = T(Y_m) - T(Y_{m-1}). \end{aligned} \quad (9)$$

Расчет специальных переменных для фазового RM-анализа происходит, как:

$$A_m = \frac{W_m + U_m}{2}, B_m = W_m - U_m, C_m = \frac{W_{m+1} + U_m}{2}, D_m = U_m - W_{m+1}. \quad (10)$$

Для того, чтобы ориентация графиков фазового RM-анализа была идентичной таковой для графиков амплитудного RM-анализа, необходимо построить график A от $-B$ и C от $-D$ для анализа соседних экстремумов, а также график $-A$ от B , $-C$ от D для анализа расстояний между максимумами и минимумами. Пример графиков для амплитудного и фазового RM-анализа сигнала, передаваемого в канале ХСС, реализованной методом переключения хаотических режимов с использованием системы Лоренца-Чена с модуляцией сигнала в виде переключения между осцилляторами с параметрами a , равными 0.8 и 1, представлен на рисунке 4.

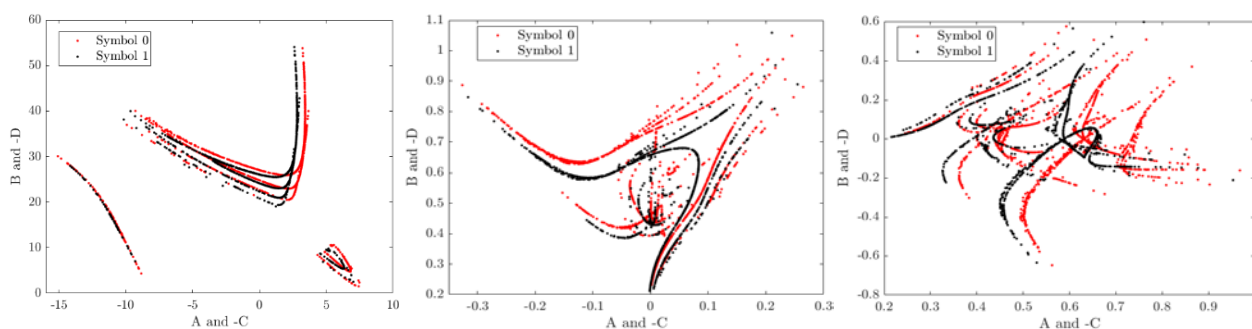


Рисунок 4 – Результаты применения амплитудного (слева) и фазового RM-анализа: расчет на основе соседних экстремумов (по центру) и расчет на основе расстояний между максимумами и минимумами (справа)

Одним из недостатков известных алгоритмов RM-анализа является отсутствие количественной оценки разницы между двумя разными графиками. Традиционно используемые оценки геометрических размеров и распределения точек на графиках имеют крайне низкую точность. Для расчета разницы между графиками предлагается использовать подход на основе двумерных гистограмм, при котором графики, полученные в результате RM-анализа, разбиваются на ячейки заданных размеров, в результате чего получаются два псевдоизображения, интенсивность цвета которых зависит от количества точек, попавших в отдельную ячейку. Далее находится разница между двумя 2D-гистограммами по формуле:

$$\theta(x) = \begin{cases} x, & \text{если } x \geq \epsilon \\ 0, & \text{если } x < 0. \end{cases} \quad \epsilon \in \mathbb{N};$$

$$\Delta_{i,j} = |X_{i,j} - Y_{i,j}| \cdot |\theta(X_{i,j}) - \theta(Y_{i,j})|, \quad i, j \in [1, N]; \quad (11)$$

$$D = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\theta(\Delta_{i,j})}{\theta(X_{i,j}) + \theta(Y_{i,j})},$$

где θ – ступенчатая функция Хевисайда, N ($N \times N$) – разрешение двумерной гистограммы, а ϵ – порог отсеивания редких точек, влияющих на вычисление разницы между двумерными гистограммами. Использование порога ϵ снижает

чувствительность количественного расчета разницы к наличию случайных выборок, шума или преднамеренного размытия сигнала.

Предложенный метод анализа и его алгоритмическая реализация позволяют комплексно оценить различимость сигналов при модуляции в исследуемой ХСС, обладая большей чувствительностью к малым изменениям несущего сигнала, чем традиционно применяемые алгоритмы анализа.

В главе также описана программная реализация процедур оценки различимости сигналов и помехозащищенности, проектируемой ХСС с использованием модифицированного возвратного преобразования и алгоритма подсчета битовых ошибок. Приведены конечно-разностные и исполняемые модели цифровых передатчиков и приемников хаотического сигнала, реализующие несколько способов модуляции хаотических сигналов, включая предложенный способ модуляции на основе управляемой симметрии конечно-разностной схемы генератора. Показано, что новый способ модуляции на основе полуявных численных методов интегрирования обеспечивает меньшую различимость сигналов по сравнению с модуляцией параметров и переключением хаотических режимов, при условии одинаковой помехоустойчивости.

Описан разработанный программный модуль оптимизации параметров синхронизации, обеспечивающий снижение времени синхронизации дискретных моделей хаотических систем и соответствующее повышение характеристик технических решений на их основе. Предложенное программное обеспечение позволяет автоматизировать процесс моделирования и разработки генераторов хаотических колебаний в структуре ХСС с учетом требований к техническим характеристикам системы. Входными данными программного комплекса являются имитационная модель генератора хаотических сигналов, параметры разрядности ЦАП/АЦП, заданный тип шумового сигнала и уровня сигнал/шум, требования к скорости и различимости сигналов при модуляции. Выходными данными программного комплекса являются результаты анализа характеристик элементов проектируемой ХСС в виде оценок различимости сигналов при модуляции, помехоустойчивости и пропускной способности канала связи в проектируемой ХСС. Экспериментально показано, что применение предложенных средств генерации и модуляции хаотических сигналов в структуре перспективных ХСС позволяет снизить их различимость при передаче в зашумленном канале, при этом повысить устойчивость к помехам и скорость передачи по сравнению с известными решениями в области когерентных ХСС.

Четвертая глава содержит результаты экспериментальной оценки эффективности разработанных методов и средств моделирования генераторов хаотических сигналов в контексте разработки ХСС. Эксперименты включают в себя пример имитационного моделирования и исследование характеристик модели когерентной ХСС, основанной на предложенных генераторах хаотических сигналов.

Для экспериментальной проверки теоретических положений диссертационной работы был создан стенд имитационного моделирования и оценки характеристик ХСС. Экспериментальный стенд состоит из двух частей – виртуального стенда, реализованного в среде разработки виртуальных приборов NI LabVIEW, и аппаратных средств на основе модулей быстрого прототипирования NI MyRIO.

Сравнительный анализ процедур оценки различимости сигналов при разных способах модуляции приведен на рисунке 5.

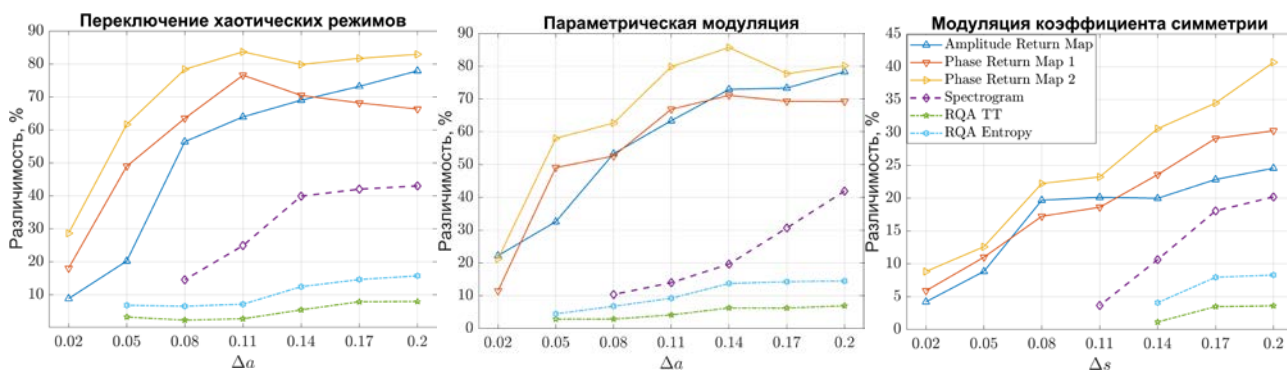


Рисунок 5 – Оценка различимости сигналов при различных типах модуляции: переключения хаотических режимов, параметрической модуляции и модуляции коэффициента симметрии

Экспериментально показано, что при малых разбросах значений параметров/коэффициентов симметрии оценить различимость сигналов с использованием рекуррентного и спектрального анализа не всегда возможно, т.е. с точки зрения этих способов анализа такие сигналы практически неразличимы между собой. При этом анализ на основе численных возвратных преобразований позволяет различить подобные сигналы, что подтверждает перспективность применения данного подхода.

Сравнительный анализ эффективности разных способов модуляции хаотических сигналов приведен на рисунке 6. Численные оценки эффективности методов модуляции представлены в таблице 1, зеленым цветом отмечены результаты для предлагаемого способа модуляции на основе управляемой симметрии.

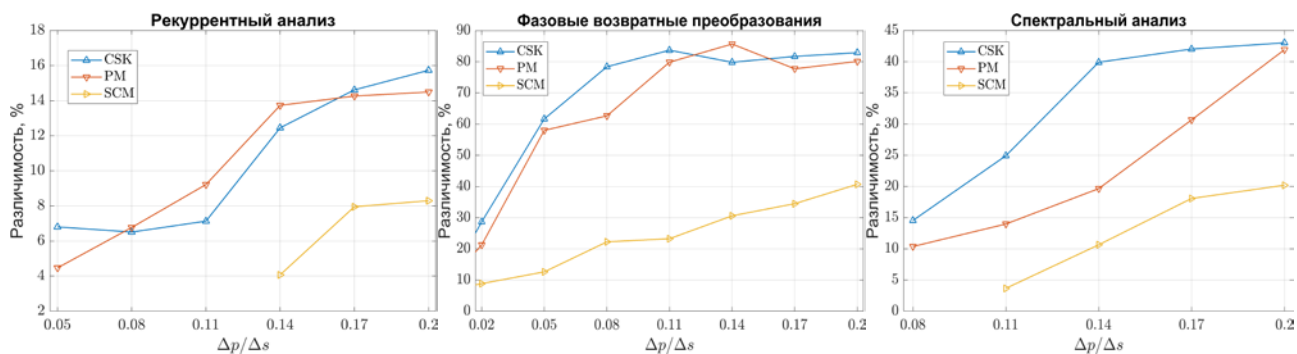


Рисунок 6 – Оценка способов модуляции с точки зрения различимости сигналов с использованием анализа энтропии рекуррентных преобразований, фазовых возвратных преобразований и спектрального анализа.

Таблица 1 – Сравнение различимости сигналов для различных способов модуляции.

Метод атаки	Вид модуляции	Разница при Δa или $\Delta s = 0.2, \%$	Преимущество МУС, %
Фазовый метод возвратных преобразований	CSK	82.93	42.24
	PM	80.12	39.43
	МУС	40.69	–
Спектральный анализ	CSK	43.02	22.83
	PM	41.92	21.73
	МУС	20.19	–
Время захвата при рекуррентном анализе	CSK	15.73	7.44
	PM	14.49	6.20
	МУС	8.29	–

В ходе полунатурных экспериментов с моделями ХСС подтверждена гипотеза, что использование предложенных в диссертации генераторов хаотических сигналов с модуляцией на основе управляемой симметрии обеспечивает более низкую различимость сигналов при модуляции по сравнению с ХСС, использующими традиционные типы модуляции. Обнаружено, что наиболее полно данный эффект проявляется при использовании в качестве приемника и передатчика исполняемых моделей на основе конечно-разностных моделей консервативных хаотических систем с управляемой симметрией за счет большей адекватности полуживных конечно-разностных моделей непрерывному прототипу.

Экспериментально подтверждено, что вариация коэффициента симметрии не оказывает существенного влияния на скорость синхронизации хаотических осцилляторов, что позволяет использовать широкий диапазон значений данного коэффициента на практике, увеличивая тем самым пространство параметров генератора сигнала. Показано, что коэффициент синхронизации оказывает

существенное влияние на скорость передачи данных в моделях ХСС. Обнаружено, что при наличии в системе связи шума оптимальный коэффициент синхронизации отличается от такового для случая, когда шум отсутствует. Таким образом, подтверждена практическая полезность разработанной подпрограммы оптимизации коэффициентов синхронизации в контексте дополнительной оценки свойств и улучшения характеристик ХСС.

С помощью разработанных компонентов и средств моделирования ХСС создан и исследован виртуальный прототип ХСС, использующий предложенные генераторы хаотических сигналов с различными типами модуляции. Проведена оценка производительности и устойчивости к помехам прототипа когерентной ХСС в условиях цифрового шума, порождаемого ЦАП/АЦП, и аддитивного шума в канале передачи данных. При тестировании использовались следующие критерии: число битовых ошибок и различимость сигналов при модуляции, оцениваемая методом численных возвратных преобразований. Показаны преимущества предлагаемой архитектуры генераторов хаотических сигналов, а также нового способа модуляции на основе управляемой симметрии конечно-разностной схемы.

Глава завершается выводами о соответствии экспериментальных результатов работы теоретическим положениям, целям и задачам исследования.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы, сделаны выводы о применимости предложенных методов, моделей и программных средств к задачам разработки ХСС и обозначены направления дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Разработан новый способ модуляции хаотических сигналов, использующий особые свойства полувывных симметричных численных методов интегрирования.
2. Предложены математические модели генераторов хаотических сигналов, реализующие новый способ модуляции хаотических сигналов с управлением симметрией дискретных конечно-разностных схем.
3. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для оценки характеристик исполняемых моделей хаотических систем связи и оптимизации коэффициентов синхронизации в когерентных хаотических системах связи.

4. Предложен и программно реализован новый способ оценки различимости сигналов при модуляции в когерентных ХСС на основе модифицированного метода фазовых возвратных преобразований.

5. Получено экспериментальное подтверждение основных положений диссертации. Подтверждена высокая адекватность дискретных математических моделей генераторов хаотических сигналов непрерывным прототипам, а также эффективность предлагаемого нового способа модуляции хаотических сигналов. Показано, что использование управляемой симметрии позволяет расширить пространство параметров генератора хаотических колебаний.

Предложенный способ модуляции может использоваться в технических системах, основанных на хаотических сигналах. Использование математического аппарата полуявных методов численного интегрирования для создания моделей генераторов хаотических сигналов позволяет повысить адекватность моделирования, устойчивость к дрейфу динамических режимов при долгосрочном моделировании и замедлить процесс деградации хаотических колебаний. Предложенный способ оценки различимости сигналов позволяет численно оценить разницу между динамикой хаотических колебаний при наличии как амплитудных, так и фазовых изменений.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Рыбин В.Г.** Хаотические системы связи с модуляцией сигнала на основе управляемой симметрии полуявных конечно-разностных моделей // Труды учебных заведений связи. – 2024. – Т. 10. – № 1. – С. 6–16 (спец. 1.2.2).

2. Бутусов Д.Н., Кобызев Н.П., Пестерев Д.О., Тутуева А.В., **Рыбин В.Г.** Методы бифуркационного и рекуррентного анализа нелинейных динамических систем на примере мемристивной цепи // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2019. – Т. 19, – № 1. – С. 126–133 (спец. 1.2.2).

3. Тутуева А.В., Бутусов Д.Н., Копец Е.Е., **Рыбин В.Г.**, Давидчук А.Г. Полуявные многошаговые методы Адамса—Башфорта—Мултона при решении жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений // Изв. вузов. Приборостроение. – 2021. – Т. 64. – № 8. – С. 599–607.

Публикации в изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS

4. **Rybin V.G.**, Butusov D.N., Babkin I.A., Pesterev D.O., & Arlyapov V.A. Some Properties of a Discrete Lorenz System Obtained by Variable Midpoint Method and Its Application to Chaotic

Signal Modulation // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2024. – T. 34. – № 01. – C. 2450009.

5. Babkin I.A., **Rybin V.G.**, Andreev V.S., Karimov T.I., Butusov D.N. Coherent chaotic communication using generalized Runge-Kutta method // Mathematics. – 2024. – T. 12. – № 7. – C. 982.

6. **Rybin V.G.**, Karimov T.I., Bayazitov O.O., Kvitko D.V., Babkin I.A., Shirin K.V., Kolev G.Y., Butusov D.N. Prototyping the symmetry-based chaotic communication system using microcontroller unit // Applied Sciences. – 2023. – T. 13. – № 2. – C. 936.

7. **Rybin V.G.**, Babkin I.A., Kvitko D.V., Karimov T.I., Nardo L., Nepomuceno E., Butusov D.N. Estimating Optimal Synchronization Parameters for Coherent Chaotic Communication Systems in Noisy Conditions // Chaos Theory and Applications. – 2023. – T. 5. – № 3. – C. 141-152.

8. Ostrovskii V.Y., **Rybin V.G.**, Karimov A.I., Butusov D.N. Inducing multistability in discrete chaotic systems using numerical integration with variable symmetry // Chaos, Solitons & Fractals. – 2022. – T. 165. – C. 112794.

9. Voznesensky A.S., Butusov D.N., **Rybin V.G.**, Kaplun D.I., Karimov T.I., Nepomuceno E. Denoising chaotic signals using ensemble intrinsic time-scale decomposition // IEEE Access. – 2022. – T. 10. – C. 115767-115775.

10. **Rybin V.G.**, Butusov D.N., Rodionova E.A., Karimov T.I., Ostrovskii V.Y., Tutueva A.V. Discovering chaos-based communications by recurrence quantification and quantified return map analyses // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2022. – T. 32. – № 09. – C. 2250136.

11. **Rybin V.G.**, Kolev G.Y., Kopets E.E., Dautov A.M., Karimov A.I., Karimov T.I. Optimal synchronization parameters for variable symmetry discrete models of chaotic systems // 2022 11th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). – IEEE, 2022. – C. 1-5.

12. Tutueva A.V., Moysis L., **Rybin V.G.**, Zubarev A.V., Volos C., Butusov D.N. Adaptive symmetry control in secure communication systems // Chaos, Solitons & Fractals. – 2022. – T. 159. – C. 112181.

13. Tutueva A.V., Moysis L., **Rybin V.G.**, Kopets E.E., Volos C., Butusov D.N. Fast synchronization of symmetric Hénon maps using adaptive symmetry control // Chaos, Solitons & Fractals. – 2022. – T. 155. – C. 111732.

14. Karimov T.I., **Rybin V.G.**, Druzhina O.S., Ostrovskii V.Y., Protasova D.A. Revealing Chaos-Based Steganographic Transmission by the Recurrence Quantification Analysis // International Conference on Mathematics and its Applications in new Computer Systems. – Cham : Springer International Publishing, 2021. – C. 385-392.

15. **Rybin V.G.**, Tutueva A.V., Karimov T.I., Kolev G.Y., Butusov D.N., Rodionova E.A. Optimizing the synchronization parameters in adaptive models of Rössler system // 2021 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). – IEEE, 2021. – C. 1-4.

16. Karimov T.I., **Rybin V.G.**, Kolev G.Y., Rodionova E.A., Butusov D.N. Chaotic communication system with symmetry-based modulation // Applied Sciences. – 2021. – Т. 11. – № 8. – С. 3698.

17. Ostrovskii V.Y., Tutueva A.V., Andreev V.S., **Rybin V.G.** Phase bifurcation analysis of nonlinear dynamical systems // 2020 XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). – IEEE, 2020. – С. 88-91.

Зарегистрированные программы для ЭВМ

18. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ №2018660169, Программа построения динамических карт нелинейных систем на основе старшего показателя Ляпунова, дата регистрации: 17.08.2018, авторы: Бутусов Д.Н., Пестерев Д.О., **Рыбин В.Г.**, Копец Е.Е.

19. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ №2018660424, Программа исследования симметричности дискретных моделей хаотических систем, дата регистрации: 23.08.2018, авторы: Горяинов С.В., Козак М.Н., Андреев В.С., Копец Е.Е., **Рыбин В.Г.**

20. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ №2019616796, Программа моделирования и анализа хаотических переходных процессов в нелинейных системах, дата регистрации: 29.05.2019, авторы: Островский В.Ю., Красильников А.В., **Рыбин В.Г.**

21. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ №2019617202, Программа расчета ляпуновского спектра для нелинейных динамических систем, реализованных полужавными алгоритмами интегрирования, дата регистрации: 04.06.2019, авторы: Бутусов Д.Н., Пестерев Д.О., **Рыбин В.Г.**, Тутуева А.В.

22. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ №2019666875, Программа построения фазовых и комбинированных бифуркационных диаграмм, дата регистрации: 16.12.2019, авторы: Островский В.Ю., **Рыбин В.Г.**, Каримов А.И., Каримов Т.И., Бутусов Д.Н.

23. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ №2020617462, Программа визуализации областей мультстабильности на параметрических диаграммах нелинейных динамических систем, дата регистрации: 08.07.2020, авторы: Островский В.Ю., Тутуева А.В., Каримов А.И., **Рыбин В.Г.**

24. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2023616256, Программа для расчета наибольшей Ляпуновской экспоненты с использованием распределенных вычислений на основе технологии CUDA, дата регистрации: 23.03.2023, авторы: **Рыбин В.Г.**, Ширнин К.В., Пестерев Д.О., Бабкин И.А., Трубина А.А., Колев Г.Ю.

25. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2023616798, Программа для расчета Ляпуновских показателей с использованием распределенных вычислений на основе технологии CUDA, дата регистрации: 03.04.2023, авторы: **Рыбин В.Г.**, Бутусов Д.Н., Ширнин К.В., Квитко Д.В., Федосеев П.С.

26. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2023615744, Программа для построения одномерных и двумерных бифуркационных диаграмм с использованием

распределенных вычислений на основе технологии CUDA, дата регистрации: 17.03.2023, авторы: **Рыбин В.Г.**, Бутусов Д.Н., Островский В.Ю., Ширнин К.В., Баязитов О.О.

Отчеты о НИР

27. Рыбин В.Г. защищенные системы связи на основе хаотических отображений с управляемой симметрией: отчет о НИР / СПбГЭТУ «ЛЭТИ» Т.И. Каримов, В.С. Андреев, А.В. Зубарев, Д.О. Пестеров, В.Г., Рыбин, О.С. Дружина, Е.А. Родионова, К.В. Ширнин. Санкт-Петербург, 2020. 31 с.