

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

На правах рукописи

Рыбин Вячеслав Геннадьевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ГЕНЕРАТОРОВ ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ОСНОВЕ
ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ С УПРАВЛЯЕМОЙ СИММЕТРИЕЙ**

Специальность 1.2.2. Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
к.т.н., доц. Бутусов Д.Н.

Санкт-Петербург – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	6
1 ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ХАОТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ.....	17
1.1 Роль генераторов хаотических сигналов при создании хаотических систем связи.....	17
1.2 Особенности моделирования систем, использующих хаотические сигналы.....	20
1.2.1 Системы связи на основе хаотической маскировки.....	23
1.2.2 Системы связи на основе переключения хаотических режимов.....	24
1.2.3 Системы связи на основе модуляции параметра бифуркации.....	26
1.2.4 Некогерентные хаотические системы связи.....	28
1.2.5 Требования к моделям генераторов хаотических колебаний в когерентных ХСС.....	30
1.2.6 Способы оценки характеристик хаотических систем связи.....	32
1.3 Математическое и компьютерное моделирование при модель- ориентированном проектировании хаотических систем связи.....	35
1.3.1 Модель-ориентированное проектирование систем, использующих хаотические сигналы.....	35
1.3.2 Исследовательское проектирование как перспективный способ разработки наукоемких изделий.....	38
1.3.3 Методика модель-ориентированного проектирования хаотических систем.....	41
1.4 Выводы по главе. Постановка задачи исследования.....	43
2 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГЕНЕРАТОРОВ ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНЫХ СХЕМ С УПРАВЛЯЕМОЙ СИММЕТРИЕЙ.....	46

2.1	Численные методы интегрирования с управляемой симметрией.....	47
2.1.1	Полуявные численные методы интегрирования	48
2.1.2	Оценка адекватности конечно-разностных моделей хаотических систем, полученных полуявными методами интегрирования.....	50
2.1.3	Управление симметрией фазового пространства дискретных моделей генераторов хаотических сигналов	55
2.1.4	Области устойчивости полуявного метода интегрирования.....	57
2.2	Способы синхронизации хаотических динамических систем	61
2.3	Оптимизация параметров синхронизации дискретных хаотических систем, полученных полуявными численными методами интегрирования	63
2.3.1	Процедура оптимизации параметров синхронизации	63
2.4	Способ модуляции хаотических сигналов на основе управления коэффициентом симметрии.....	65
2.5	Синтез конечно-разностных схем генераторов хаотических сигналов	66
2.5.1	Дискретные модели генераторов хаоса на основе диссипативной хаотической системы	67
2.5.2	Дискретные модели генераторов хаотических колебаний на основе консервативных хаотических систем.....	68
2.6	Выводы по главе	70
3	КОМПЛЕКС ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ХАОТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	72
3.1	Имитационная модель хаотической системы связи.....	73
3.2	Оптимизации параметров синхронизации для задач хаотических систем связи	77
3.3	Виртуальный прибор для оценки потенциальной скорости передачи данных.....	79

3.4	Сохранение хаотического режима колебаний при изменении симметрии в дискретных моделях, полученных полуявными численными методами	80
3.5	Алгоритмы оценки различимости сигналов при модуляции для хаотических систем связи.....	82
3.5.1	Методы спектрального анализа.....	83
3.5.2	Методы рекуррентного анализа	85
3.5.3	Метод численных возвратных преобразований	87
3.6	Программные средства оценки различимости сигналов	92
3.6.1	Программная реализация алгоритма спектрального анализа	92
3.6.2	Виртуальный прибор рекуррентного анализа	93
3.6.3	Программная реализация численных возвратных преобразований	93
3.7	Метрика различимость-помехоустойчивость как инструмент анализа моделей хаотических систем связи	95
3.8	Виртуальный прибор для оценки помехозащищенности канала связи и построения плоскости COVERTY-BER.....	96
3.9	Выводы по главе	97
4	Экспериментальная оценка разработанных средств моделирования хаотических систем связи.....	99
4.1	Тестовая среда для постановки вычислительных экспериментов...	101
4.1.1	Применение конечно-разностных моделей генераторов хаотических колебаний в хаотических системах связи.....	103
4.1.2	Исполняемые модели генераторов и приемников хаотических сигналов	105
4.2	Оценка характеристик модели хаотической системы связи, использующей генераторы сигналов с управляемой симметрией.....	110
4.3	Оптимизация параметров синхронизации в моделях хаотических систем связи	115

4.4	Исследование и оценка пропускной способности канала в моделях хаотических систем связи.....	120
4.5	Исследование свойств моделируемой ХСС с точки зрения помехозащищенности	122
4.6	Анализ разработанных инструментов оценки различимости сигналов	125
4.6.1	Спектральный анализ	126
4.6.2	Рекуррентный анализ.....	127
4.6.3	Экспериментальная оценка средств анализа на основе численных возвратных преобразований.....	129
4.6.4	Сравнение метрик оценки различимости сигналов хаотических систем связи	131
4.6.5	Сравнение способов модуляции когерентных хаотических систем связи	134
4.7	Плоскость COVERTY-BER как инструмент оценки помехоустойчивости хаотических систем связи.....	137
4.8	Выводы по главе	139
	Заключение.....	142
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	146
	ГЛОССАРИЙ.....	147
	Список литературы	148
	Приложение А.....	162
	Приложение Б	164

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертационной работы. Прогресс в области нелинейной динамики и теории хаоса породил множество приложений хаотических систем в технике, начиная с высокочувствительных датчиков и криптографических алгоритмов и заканчивая системами связи и эхолокации. Вместе с тем, использование широкополосных сигналов в технике привело к появлению ряда новых научных проблем. Так, генерация, передача, прием и обработка широкополосных сигналов потребовали создания специального математического и программно-аппаратного обеспечения. Возникла потребность в новых способах математического и компьютерного моделирования генераторов сигналов, ширина спектра которых сравнима с центральной частотой. Одним из наиболее перспективных направлений в области защищенной связи является разработка широкополосных систем передачи данных, обеспечивающих высокий уровень скрытности и защищенности передаваемой информации за счет меньшей обнаруживаемости сигналов на фоне шума в канале передачи данных. Развитие средств вычислительной техники привело к тому, что сегодня у разработчиков систем связи появилась возможность применения технологий, которые еще недавно были труднореализуемыми в силу технологических ограничений, и одним из таких подходов является использование хаотических несущих сигналов. Такие сигналы имеют много общего со случайными (шумообразными) последовательностями, обладая похожими спектральными и статистическими свойствами и будучи непредсказуемыми для наблюдателя на больших интервалах времени. Важным отличием хаотических сигналов от шумообразных псевдослучайных последовательностей выступает их детерминированность и управляемость за счет наличия системы определяющих дифференциальных или алгебраических уравнений. В качестве ключевых преимуществ хаотических сигналов можно выделить возможность динамического управления режимами колебаний хаотического генератора, простота генерации и получения с одного

генератора нескольких ортогональных сигналов и, что имеет особую важность для настоящего исследования, возможность синхронизации двух генераторов хаотических сигналов.

Тем не менее, предполагаемые изменения в архитектуре защищенных систем связи, связанные с применением когерентных схем, и предполагаемая замена применяемых опорных сигналов на хаотические, влекут за собой потребность в новых средствах и инструментах моделирования и проектирования генераторов хаотических сигналов, в том числе, реализующих перспективные способы модуляции хаотических сигналов.

Одним из быстро развивающихся направлений в области защищенной передачи информации является когерентная цифровая связь на основе детерминированного хаоса. Применение хаотической динамики для генерации сигналов позволяет получить несущие сигналы, сходные с шумом по спектральным и статистическим характеристикам, что обеспечивает высокую скрытность передачи данных, а детерминизм порождающей их системы повышает устойчивость к перекрестной помехе в случае передачи сигнала в средах с множественным переотражением сигнала, например, в звукоподводной связи или гидролокации.

В то же время, известен ряд существенных проблем, связанных с созданием и практическим применением устройств когерентной широкополосной связи на основе хаотических сигналов:

1. Одним из ключевых барьеров для развития хаотических систем связи (ХСС) являются особенности взаимодействия хаотического сигнала с шумом. В случае когерентных систем, основанных на синхронизации приемника и передатчика, требуется синхронизировать их за детерминированный отрезок времени, вследствие чего предъявляются повышенные требования к скорости и точности синхронизации. Все вышеперечисленное требует разработки новых способов и средств моделирования хаотических систем связи, включая математические и компьютерные модели приемников и передатчиков в составе

ХСС, а также процедуры оптимизации синхронизированных структур на основе последних.

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

3. Нехватка специализированных методов и средств обработки и генерации хаотических сигналов. При этом подходы, используемые при разработке традиционных систем связи 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. Потребность в специализированных методах и инструментах оценки характеристик разрабатываемых и существующих систем на основе динамического хаоса, а также сравнения с традиционными подходами.

Таким образом, можно сделать вывод что существующий уровень развития средств математического и компьютерного моделирования хаотических систем не позволяет эффективно решать обозначенные выше проблемы предметной области, что сдерживает широкое внедрение приложений теории хаоса в инженерную практику.

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 хаотическим системам связи. В диссертации 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. В работе предложены новые алгоритмы и программные инструменты компьютерного моделирования генераторов хаотических сигналов, обеспечивающие повышенную адекватность конечно-разностных схем непрерывным прототипам, а также возможность управления свойствами фазового пространства дискретных систем через изменение симметрии применяемого дискретного оператора.

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 связи [1]. За прошедшее время шумоподобные, в т.ч. хаотические сигналы, стали естественными кандидатами на роль несущих сигналов при реализации многопользовательских систем связи [2, 3, 4]. Теоретический анализ потенциала хаотических систем в области цифровой связи описан Хаслером и Шиммингом в 2002 году [5]. Некоторые из известных подходов к организации связи на основе хаоса обеспечивают те же преимущества, что и классические решения на основе широкополосных сигналов, включая уменьшение затухания в изменяющихся во времени каналах, сопротивление помехам при низкой вероятности перехвата [6] и

связь с высокой степенью конфиденциальности [7]. Кроме того, важным свойством является возможность снижения уровня помех и уменьшения отношения пиковой мощности к средней, т.к. несущие на основе хаоса превосходят известные типы сигналов со схожим распределением при разработке многопользовательских широкополосных систем связи [8, 9], а также звукоподводных систем. В то же время, существует ряд нерешенных проблем предметной области, связанных с синтезом математических и исполняемых генераторов хаотических колебаний с требуемыми характеристиками, которым и посвящена данная диссертационная работа.

Объектом исследования в настоящей диссертационной работе выступают генераторы хаотических колебаний, применяемые в составе когерентных хаотических систем связи. Такие системы можно условно разделить на два класса:

1. Когерентные хаотические системы связи: системы, в которых на стороне приемника присутствует один или несколько хаотических генераторов, которые подлежат синхронизации с сигналом передатчика, передающимся по каналу связи [10, 11, 12].

2. Некогерентные хаотические системы связи, в которых выполняется восстановление данных путем обнаружения особенностей и паттернов сигнала в канале связи без необходимости наличия информации о состоянии канала или синхронизации с сигналом на стороне приемника [2, 13].

В когерентных хаотических системах связи, основанных на переключении хаотических режимов (CSK), прямой последовательности для расширения спектра (DS-CDMA) и в системах с хаотической символьной динамической (CSD) модуляцией [2, 3, 14, 15], требуется применение хаотической синхронизации на стороне приемника для восстановления точной хаотической последовательности при демодуляции передаваемых битов [16, 17, 18]. В таких системах происходит замена обычных двоичных последовательностей, таких как коды Голда или псевдошума (PN), на хаотические последовательности. Несмотря на хорошие корреляционные свойства, коды Голда могут быть восстановлены с помощью линейной регрессии из-за их короткой линейной сложности [19, 20]. Эту

уязвимость можно преодолеть, используя хаотические сигналы вместо обычных последовательностей псевдошума или кодов Голда, поскольку хаотические сигналы можно рассматривать как непериодические сигналы с бесконечным числом состояний [21]. Данная особенность требует введения в состав программного обеспечения проектирования и моделирования ХСС дополнительных модулей анализа характеристик генераторов хаотических сигналов, определяющих скрытность и защищенность передачи данных.

Отметим, что некоторые варианты когерентных систем связи, основанных на хаотической синхронизации, демонстрируют низкую производительность в условиях высокого зашумления канала передачи данных [2, 22]. Это выдвигает соответствующие требования к средствам компьютерного моделирования генераторов хаотических колебаний в составе ХСС. В частности, очевидно, что для создания практически применимых ХСС необходимо иметь в составе средств моделирования типовые модели блоков модуляции-демодуляции, реализующие эффективные алгоритмы манипуляции хаотическими сигналами в зашумленной среде при минимальном искажении динамики генерирующей системы. Из вышеизложенного можно сформулировать цель и задачи диссертационного исследования.

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, за счет создания специализированного математического и программного обеспечения на основе полуявных численных методов интегрирования с управляемой симметрией.

Задачи диссертационной работы

Исходя из поставленной цели исследования, в процессе выполнения работы необходимо решить следующие **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 оценки характеристик генераторов хаотических сигналов в приложении к хаотическим системам связи.

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

Научная новизна и соответствие паспорту специальности

В рамках проведенного диссертационного исследования получены следующие основные результаты, обладающие научной новизной:

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 новый 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 предложен новый способ оценки различимости сигналов на основе модифицированного метода возвратных преобразований.

Теоретическая и практическая значимость работы

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 результатов работы

Практическая значимость работы связана с созданием нового способа модуляции хаотических сигналов, вносящего минимальные искажения в динамику дискретного нелинейного осциллятора при кодировании информации. Применение эффективных алгоритмов оценки свойств генераторов хаотических сигналов на основе комбинации амплитудных и фазовых численных возвратных преобразований способствует повышению характеристик систем, использующих хаотические сигналы. Новая комбинированная метрика различимость-целостность может служить для оценки характеристик ХСС в рамках процесса модель-ориентированного проектирования. С инженерной точки зрения значимостью также обладают предложенные универсальные алгоритмы цифровой генерации

хаотических сигналов, позволяющие реализовать и сравнивать как известные, так и перспективные способы модуляции.

Внедрение и реализация результатов исследования

Разработанное программное обеспечение внедрено в научно-производственный процесс ООО «НПФ «Модем». Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры САПР СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и используются при подготовке бакалавров по направлению 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника».

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».

На базе предложенных в диссертационной работе решений разработано программное обеспечение для моделирования и исследования генераторов хаотических колебаний в составе ХСС, включающее распределенные алгоритмы построения фазовых и параметрических диаграмм высокой размерности и модуль анализа свойств хаотических сигналов. Компоненты программного обеспечения зарегистрированы в реестре программ для ЭВМ и используются в научной и образовательной деятельности кафедры САПР СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Методология и методы исследования

В работе используются положения теории подобию и моделирования, теоретические основы нелинейной динамики, геометрические численные методы интегрирования, а также методы анализа нелинейных систем. В основе предложенного способа модуляции лежит дискретизация моделей непрерывных систем полуживыми численными методами интегрирования с управляемыми геометрическими свойствами. Также в работе использованы методы оптимизации, технологии разработки виртуальных приборов, имитационное и полунатурное моделирование.

Научные положения, выносимые на защиту

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

2. **Математические и исполняемые модели** хаотических генераторов широкополосных сигналов, реализующие способ модуляции хаотических сигналов на основе управляемых свойств полуявных 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.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность научных результатов

Достоверность результатов работы подтверждается результатами компьютерного и полунатурного моделирования, а также результатами вычислительных экспериментов с исполняемыми моделями генераторов хаоса. 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». Эксперименты с компьютерными и полунатурными моделями ХСС показывают, что с помощью предложенных моделей генераторов сигналов с новым способом модуляции возможно существенно снизить различимость хаотических сигналов и повысить помехозащищенность ХСС. Экспериментальные результаты диссертационного исследования хорошо согласуются с теоретическими положениями работы.

Апробация результатов работы

Результаты работы апробированы на следующих международных конференциях:

1. XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Санкт-Петербург, Россия, 27-29 мая, 2020;

2. 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Будва, Черногория, 7-11 июня 2021;

3. Mathematics and its Applications in New Computer Systems (MANCS), Ставрополь, Россия, 13-15 декабря, 2021;

4. 11th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Будва, Черногория, 7-11 июня 2022.

Публикации

Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы опубликованы в 27 научных трудах, из них по теме диссертационной работы 27, среди которых 3 публикации в ведущих рецензируемых изданиях из перечня рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 14 публикации, индексируемые в международной базе данных SCOPUS, в том числе 7 статей в журналах первого квартиля по системе Web of Science. Имеется 9 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Соответствие научной специальности. Работа соответствует пунктам 3, 5 и 6 паспорта специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Личный вклад автора. Автором предложен новый способ модуляции хаотических сигналов, использующий особые свойства полуявных симметричных численных методов интегрирования для кодирования информации. Разработаны и апробированы математические и исполняемые модели хаотических генераторов, реализующие новый способ модуляции хаотических сигналов на основе управляемой симметрии, созданы алгоритмы и программное обеспечение для оптимизации коэффициентов синхронизации при разработке приемников и передатчиков хаотического сигнала, применяемых в когерентных ХСС. Сформулирован новый способ оценки различимости сигналов при модуляции для когерентных ХСС на основе модифицированного метода возвратных преобразований. Перечисленные результаты получены автором лично.

1 ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ХАОТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

1.1 Роль генераторов хаотических сигналов при создании хаотических систем связи

В то время, как одни из первых попыток создания систем хаотической связи были сделаны научной группой А.С. Дмитриева и А.И. Панааса [23] еще в 1985 г., окончательно научный интерес к применению теории хаоса для решения задач передачи информации сформировался после открытия феномена хаотической синхронизации Л. Пекорой и Т. Кэрролом в 1991 г. [24]. Уже в 1992 году была опубликована работа У. Парлитца, посвященная применению хаотической синхронизации для передачи данных [11]. В 1994 г. группой ученых из института радиотехники и электроники РАН под руководством А.С. Дмитриева продемонстрирована возможность передачи аудиосигналов при использовании схемы с нелинейным подмешиванием сигнала к хаотической несущей [25]. К настоящему времени предложено большое число различных способов передачи данных с применением теории хаоса. Можно выделить следующие проблемы систем связи с использованием гармонических несущих, которые могут быть решены с применением широкополосной передачи данных [22]:

1. Во многих радиосистемах, таких как мобильная телефония и беспроводная локальная сеть, присутствует явление многолучевого распространения. Оно приводит к замиранию огибающей и межсимвольной интерференции и, как следствие, к высокому затуханию в узких полосах частот, что снижает соотношение «сигнал/шум» и препятствует нормальной работе системы связи;

2. Узкополосная система передачи информации вызывает высокие уровни помех на близких частотах, что имеет ряд негативных последствий, включая перегрузку каналов востребованных диапазонов. Это справедливо как для радиоканалов, так и для проводных каналов с разделением по частоте;

3. Высокая чувствительность узкополосных сигналов к помехам;

4. По мере развития и распространения систем связи растут риски выявления, перехвата и подавления специальных систем узкополосной связи.

Сверхширокополосная связь может быть реализована с применением ультракоротких импульсов, OFDM-сигналов, хаотических сигналов и др. Существующие спецификации на системы сверхширокополосной связи позволяют им сосуществовать с другими технологиями в одной среде, зачастую без лицензирования передатчика. Исследования А. Молиша [26] и Б. Нкакану [27] показали, что СШП-связь является хорошим кандидатом для реализации систем передачи данных с многопользовательским доступом на короткие расстояния в сложных условиях распространения сигнала, таких как промышленные цеха и шахты, или в средах с перегруженными каналами связи [28].

Из-за относительно низких требований к мощности передатчиков, СШП-технологии предоставляют большие возможности для скрытной передачи данных. Например, передача в СШП-формате может выглядеть как незначительный рост фоновый шум в эфире. Также СШП-связь представляет интерес для реализации в средах, чувствительных к мощности радиопередатчиков. Между тем, исследования в области СШП-связи на основе импульсов развивались относительно медленно в течение последних 10 лет, что может указывать на необходимость смены парадигмы и развития альтернативной технологии, каковой является хаотическая и, в частности, прямохаотическая связь. По сравнению с СШП-связью на основе импульсов, решения на основе хаоса обеспечивают хорошую защищенность передаваемых сообщений [29], поскольку по своей природе хаотические системы обладают высокой энтропией, топологическим смешиванием и близкими к шуму спектральными характеристиками. В то же время, из-за особенностей генерации, приема, обработки и передачи хаотических сигналов, эта область все еще остается сравнительно малоизученной, а системы широкополосной связи на основе хаотических несущих не получили широкого распространения. Важнейшим элементом хаотической системы связи является генератор хаотических сигналов, основными свойствами которого являются: способность проводить модуляцию

широкополосного сигнала полезным, способность генерировать набор ортогональных сигналов с заданными свойствами, реализуемость в аппаратуре с сохранением свойств исходной математической модели, задающей хаотическую динамику.

Одной из причин малого распространения хаотических систем связи является дефицит специализированных средств моделирования, аппаратно-ориентированных численных моделей генераторов хаоса с высокой степенью адекватности непрерывным прототипам, а также специализированного математического и программно-аппаратного обеспечения ХСС, сравнимого по своим характеристикам с инструментарием моделирования традиционных систем связи. Немаловажным аспектом также является создание обобщенных критериев и инструментов оценки характеристик как генераторов хаотических колебаний, так и всей ХСС в целом. Недостаток специализированных средств моделирования и четких критериев оценки эффективности генераторов хаотических колебаний и систем на их основе приводит к ошибкам при компьютерном моделировании, а также более низким характеристикам ХСС по сравнению

На сегодняшний день при разработке и исследовании ХСС разработчики вынуждены сами реализовывать генераторы хаотических колебаний, инструменты имитационного моделирования, процедуры тестирования и отладки. Все вышеперечисленное не просто снижает темпы внедрения ХСС в практические приложения, но в итоге приводит к неоптимальным проектным решениям, далеким от практической применимости. Таким образом, можно сделать вывод что научно-технический прогресс в области хаотических систем связи ограничен в том числе отсутствием специализированных средств моделирования и проектирования генераторов хаотических колебаний.

1.2 Особенности моделирования систем, использующих хаотические сигналы

Разработка и моделирование технических решений на основе динамического хаоса, в т.ч. хаотических систем связи, является относительно новой научно-технической задачей. Из этого следует низкая приспособленность существующих инструментов разработки и моделирования к проектированию таких систем. Рассмотрим ряд особенностей хаотических систем связи, делающих их уникальным объектом исследования.

Системы связи на основе динамического хаоса можно условно разделить на когерентные и некогерентные [30]. Принцип работы когерентных систем состоит в том, что в приемнике и передатчике реализуется одна и та же хаотическая система, и с помощью различных способов между ними может быть установлена синхронизация. Факт установления синхронизации интерпретируется как событие передачи единицы информации. Из литературы известны несколько типов синхронизации хаотических систем, включая полную, обобщенную и фазовую [31].

Существующие методы передачи данных в ХСС включают переключение хаотических режимов (англ. Chaos Shift Keying – CSK), системы прямого доступа с кодовым разделением каналов (англ. Direct Sequence Code-Division Multiple Access DS-CDMA) и хаотические системы с динамической символьной модуляцией (англ. Chaotic Symbolic Dynamics – CSD). В системах связи на основе подхода CSK каждый символ соответствует определенному хаотическому осциллятору. На стороне приемника реализуется процедура его синхронизации с зашумленным и искаженным хаотическим сигналом, и требуется определить, какой осциллятор сгенерировал принятый сигнал. Хорошую устойчивость к шуму демонстрирует дифференциально-когерентный способ передачи данных (англ. Differential Chaos Shift Keying – DCSK), при котором фрагмент хаотического сигнала передается дважды: в первый раз в качестве опорного сигнала, а затем с полярностью, определяемой передаваемым информационным битом [32]. При этом

отправка последовательно опорного и информационного сигналов приводит к снижению пропускной способности дифференциально-когерентных систем, поэтому были разработаны схемы, объединяющие эти сигналы в общем временном интервале. Одной из подобных схем является DCSK со сдвигом кода (англ. Code-Shifted Differential Chaos Shift Keying – CS-DCSK) [33]. Система основана на использовании кода Уолша для смешивания опорного и информационного сигнала в одном временном интервале. Также известна версия CS-DCSK, при которой несколько битов кодируются в одном хаотическом сегменте [34]. Исследователями предлагаются и другие способы организации хаотической связи. Так, в работе [35], Ф. Лин и М. Цай описывают способ передачи информации на основе полупроводниковых лазеров с оптоэлектронной обратной связью с применением адаптивной хаотической модуляции (англ. Adaptive Chaotic Modulation – ACM). В некогерентных системах восстановление данных выполняется путем обнаружения особенностей принятого сигнала без воспроизведения какого-либо хаотического сигнала на стороне приемника. Одна из первых предложенных методов такого типа основан на оценке энергии сигнала [36]. Всего же подобных методов только в работе [31] описано более пятнадцати.

Можно установить соответствие между особыми характеристиками хаотических сигналов, такими как эргодичность, псевдослучайность, и чувствительность к начальным условиям, и хорошо известными свойствами перемешивания и диффузии в криптографии [37]. Аналогичным образом, свойства хаотических сигналов могут быть использованы при реализации защищенной связи. Обобщенная схема когерентной хаотической системы связи показана на рисунке 1.1. Стоит отметить, что используемые в том или ином случае генераторы хаотических колебаний имплементируют различные способы модуляции и синхронизации полезного сигнала, дающие в итоге разную производительность, скрытность, а также устойчивость к шумам в канале связи.

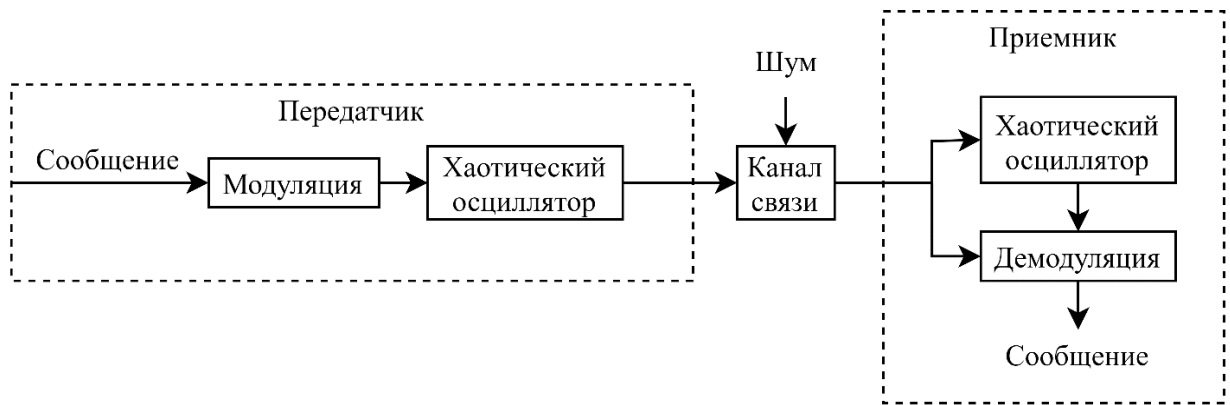


Рисунок 1.1 – Обобщенная схема когерентной хаотической системы связи

На рисунке 1.1 приведена типовая структура хаотической системы связи, включающая в себя три основных компонента: передатчик на основе генератора хаотических колебаний, приемник и канал связи. Поскольку предметом исследования настоящей диссертации являются, в основном, генераторы хаотических колебаний, на рисунке 1.1 отображен только блок задающий уровень шума в канале связи. Реальные модели канала связи часто отражают и физические особенности среды передачи сигнала. Отметим, что способы модуляции, используемые в передатчике при добавлении полезного сигнала к хаотической несущей, оказывают существенное влияние на общую помехозащищенность и скрытность проектируемой системы связи. При этом специализированные математические и исполняемые модели генераторов хаотических колебаний, а также алгоритмы модуляции хаотических сигналов в современных средствах моделирования и проектирования систем связи практически не представлены, и каждый исследователь или разработчик ХСС создает их самостоятельно. В то же время очевидно, что из соображений универсальности генераторы хаотических колебаний, используемые в составе ХСС, должны позволять реализовать несколько способов модуляции сигнала. Рассмотрим подробнее основные разновидности ХСС и определим базовые характеристики генераторов хаотических колебаний, требующихся при их создании.

1.2.1 Системы связи на основе хаотической маскировки

Одним из первых исторически появившихся разновидностей ХСС является хаотическая маскировка. Этот способ передачи данных схож с амплитудной модуляцией гармонической несущей в классических системах связи. При хаотической маскировке хаотический сигнал $x(t)$, сформированный на стороне передатчика, суммируется с полезным сигналом $m(t)$ и далее передается в канал связи. На стороне приемника осуществляется синхронизация хаотического осциллятора $y(t)$ с принятым сигналом. Декодированное сообщение $m^*(t)$ восстанавливается как результат арифметической разности между принимаемым сигналом и синхронизированным осциллятором на стороне приемника [38, 39]. Блок-схема ХСС с реализацией хаотической маскировки показана на рисунке 1.2.

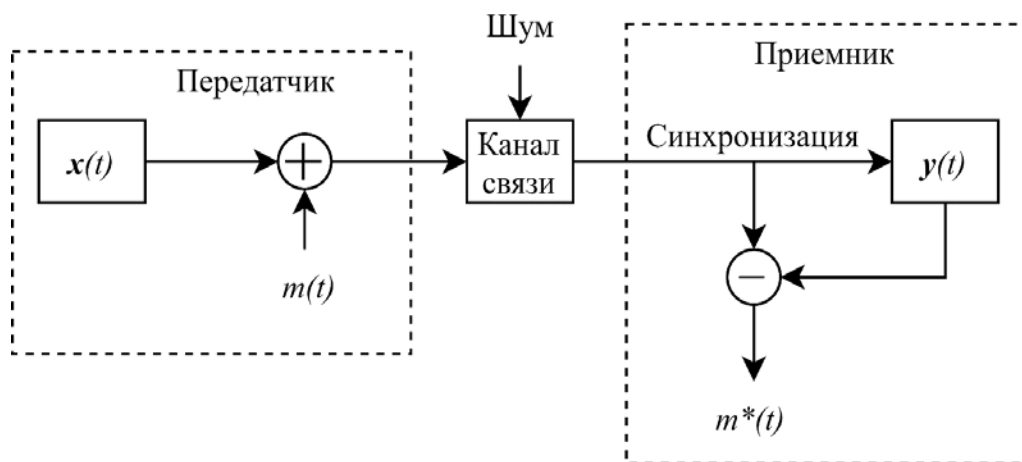


Рисунок 1.2 – Схема ХСС с модуляцией на основе хаотической маскировки

Показанная схема ХСС позволяет детектировать принимаемую информацию лишь в условиях практически полного отсутствия шума в канале связи (напр., при уровне сигнал-шум выше ~ 35 дБ). При снижении уровня сигнал-шум до 35 дБ и ниже, возникает резкое ухудшение качества передаваемой информации [40]. Кроме того, при внесении незначительного отклонения в значения управляющих параметров хаотических осцилляторов, возникают дополнительные возмущения, которые препятствуют полной хаотической синхронизации, вследствие чего работа подобных ХСС становится низкоэффективной из-за значительного искажения

сигнала [38]. Также для данного вида ХСС существует проблема обеспечения скрытности передаваемой информации. Несмотря на то, что уровень несущего сигнала может на несколько порядков превышать уровень полезного сообщения, существуют способы восстановить маскирующий сигнал по сигналу, передаваемому в канале связи, что позволит злоумышленнику выявить и расшифровать передаваемое сообщение [41, 42, 43]. Все вышеописанные недостатки хаотической маскировки делают такой способ реализации системы связи малоэффективным и редко применяемым на практике. Отметим, что для создания ХСС с модуляцией на основе хаотической маскировки могут быть использованы как аналоговые, так и цифровые генераторы хаотических сигналов.

1.2.2 Системы связи на основе переключения хаотических режимов

В 1990-х годах были предложены еще несколько способов реализации ХСС, которые можно объединить общим термином «системы с переключением хаотических режимов» [10]. Одна из возможных схем реализации ХСС на основе переключения хаотических режимов показана на рисунке 1.3.

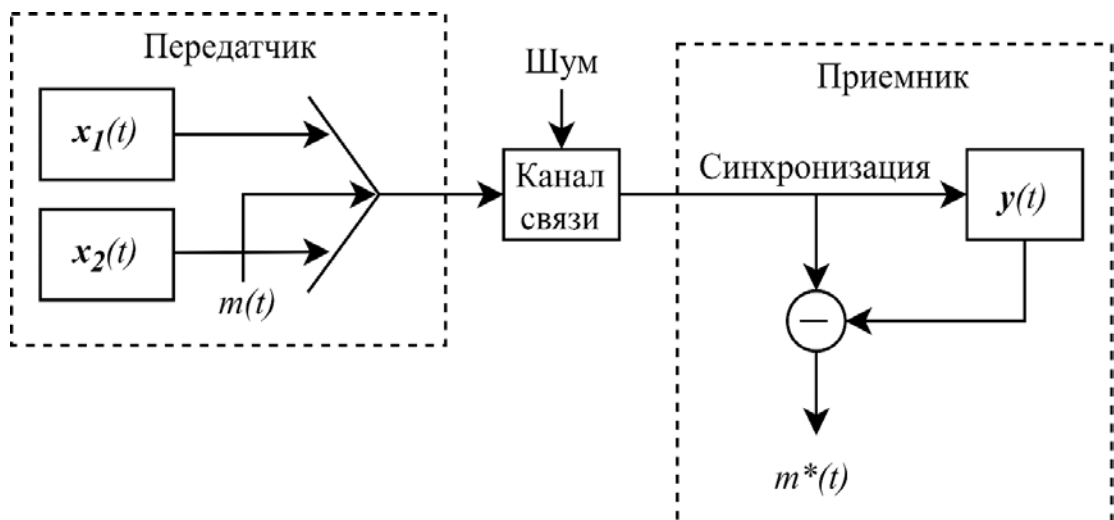


Рисунок 1.3 – Схема ХСС на основе переключения хаотических режимов

Система, представленная на рисунке 1.3, работает следующим образом. Передатчик содержит два генератора хаотических сигналов $x_1(t)$ и $x_2(t)$, которые

могут описываться как разными хаотическими системами, так и одинаковыми конечно-разностными схемами с различающимися параметрами. Для сохранения конфиденциальности передачи информации, данные осцилляторы должны иметь сходные статистические и спектральные характеристики, а также высокую степень адекватности непрерывному прототипу. В показанном случае полезное сообщение $m(t)$, представляет собой бинарную последовательность, которая используется как управляющее воздействие на стороне передатчика. Таким образом, первый хаотический осциллятор генерирует сигнал, соответствующий символу «0», а второй хаотический осциллятор генерирует сигнал, соответствующий символу «1». В зависимости от передаваемого в определенный момент символа в канал связи поступает сигнал с соответствующего осциллятора.

В зависимости от числа хаотических осцилляторов на стороне приемника, различают несколько способов реализации ХСС с переключением хаотических режимов. В схеме ХСС, представленной на рисунке 1.3, приемник содержит лишь один хаотический осциллятор $y(t)$, который может быть идентичен любому из двух хаотических осцилляторов на стороне передатчика. Таким образом, при достижении полной синхронизации хаотических осцилляторов на стороне приемника и канала связи, можно сделать вывод о том, что передается определённый символ, а при отсутствии синхронизации – другой символ.

Аналогично способу модуляции на основе хаотической маскировки, при модуляции переключением хаотических режимов декодированное сообщение $m^*(t)$ восстанавливается в результате вычисления разности между принимаемым сигналом и синхронизированным осциллятором на стороне приемника.

Другие способы реализации ХСС на основе переключения хаотических режимов отличаются от описанного выше способа в основном архитектурой системы и принципами работы приемника. Так, в известной работе А.С. Дмитриева [38] приемник содержит два хаотических осциллятора, и, соответственно, разность между принимаемым сигналом и синхронизированными осцилляторами при декодировании полезного сигнала считается для каждого из последних.

Подобные схемы реализации ХСС оказываются более устойчивыми к различным шумам в канале связи, чем ХСС на основе хаотической маскировки, но тем не менее, их устойчивость к шуму все еще является недостаточной для эффективного практического применения [38]. Одним из основных недостатков данного способа модуляции является возникновение переходных процессов при переключении хаотических режимов, длительность которых бывает весьма продолжительной, что приводит к появлению временной задержки при синхронизации и соответствующему уменьшению скорости и пропускной способности ХСС [38]. К тому же, работа подобной ХСС может быть относительно легко обнаружена злоумышленниками [44, 45], а также уязвима для явления деградации хаоса. Таким образом, одним из основных требований к генераторам хаотических колебаний при реализации ХСС на данном типе модуляции является устойчивость к деградации хаотических режимов.

1.2.3 Системы связи на основе модуляции параметра бифуркации

Концепция кодирования хаотического сигнала способом модуляции управляющих параметров является дальнейшим развитием идеи с переключением хаотических режимов [46, 47]. Необходимым условием при реализации такой схемы является предварительное определение диапазона значений управляющих параметров и нормирование модулирующего информационного сигнала. Отметим, что точное определение пространства параметров возможно лишь при высокой адекватности дискретной модели генератора хаотических колебаний непрерывному прототипу и отсутствие дрейфа режимов колебаний со временем. Одним из частных случаев реализации ХСС на основе модуляции управляющего параметра является использование бинарного сигнала в качестве информационного и модуляция им управляющих параметров хаотического осциллятора. Схема ХСС на основе модуляции управляющего параметра представлена на рисунке 1.4.

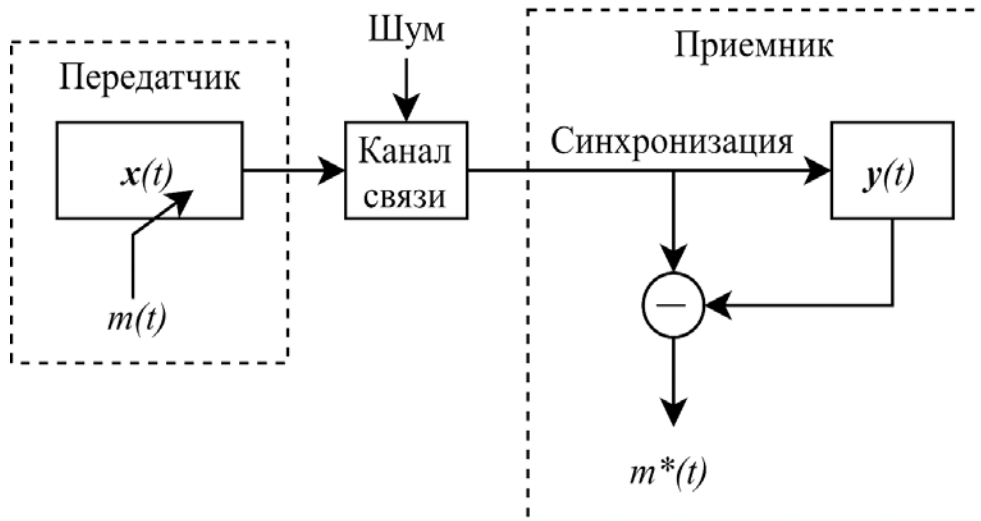


Рисунок 1.4 – Схема ХСС с модуляцией управляющих параметров

Работа ХСС на основе модуляции управляющих параметров строится следующим образом. Изменения полезного цифрового сигнала $m(t)$ влияют на один или несколько параметров передающего генератора $x(t)$, модулируя тем самым выходной сигнал генератора. В зависимости от значения передаваемого бита информации на стороне приемника $y(t)$ наблюдается или не наблюдается явление хаотической синхронизации. Таким образом, после получения разности между принимаемым сигналом и сигналом синхронизированного осциллятора детектируется восстановленное сообщение $m^*(t)$. Отметим, что для реализации режима полной хаотической синхронизации управляющие параметры хаотического осциллятора на стороне приемника должны полностью совпадать с одними из модулированных параметров на стороне передатчика, что, в свою очередь, требует высокой стабильности режимов работы генераторов хаотических колебаний.

Недостатки подобного способа реализации ХСС сходны с ХСС на основе переключения хаотических режимов, однако способ на основе модуляции управляющего параметра может быть более технически простым при аппаратной реализации, т.к. на стороне передатчика достаточно иметь только один хаотический осциллятор. Тем не менее, генераторы хаоса с данным способом модуляции отсутствуют в составе библиотек типовых модулей наиболее

распространенных инструментов моделирования, и достижение их высоких характеристик также является актуальной технической задачей.

1.2.4 Некогерентные хаотические системы связи

Главное отличие некогерентных ХСС от когерентных заключается в том, что для демодуляции полезного сигнала не требуется синхронизация сигнала в канале связи между передатчиком и приемником. В случае некогерентных ХСС демодуляция происходит за счет выявления особенностей передаваемого сигнала в определенный момент времени.

Один из простейших примеров некогерентной модуляции сигнала является метод включения-выключения хаотического генератора (наличие или отсутствие хаотического сигнала на информационной позиции, англ. Chaos On-Off Keying – СООК). В данном случае бинарное сообщение может быть зашифровано следующим образом: для символа «1» в канале связи происходит включение хаотического генератора, а для символа «0» - выключение [12]. Такой способ модуляции имеет несколько преимуществ: простота реализации, низкие требования к конструкции приемника и передатчика, высокая энергоэффективность и т.д.

В реальных условиях, у подхода СООК имеется несколько существенных недостатков, позволяющих обнаруживать передаваемую информацию с использованием методов взаимной корреляции [12, 48, 49]. Также в случае ХСС на основе СООК, переносимая сигналом энергия не является постоянной [48].

Почти во всех схемах для оценки двоичного сигнала на стороне приемника используются корреляторы или фильтры согласования. Другой способ модуляции, называемый модуляцией хаотических параметров (англ. Chaotic Parameter Modulation – СРМ), был предложен в работе [50]. Этот подход основан на свойстве эргодичности хаотических сигналов и простых методах восстановления данных путем оценки хаотических параметров, с использованием вычислений среднего

значения в канале связи с шумом. Эргодическая хаотическая двухпозиционная модуляция (англ. Ergodic Chaotic On-Off Keying – E-COOK) может рассматриваться как пример применения этого метода для надежной передачи цифрового сигнала.

Дифференциальная хаотическая модуляция (англ. Differential Chaotic Shift Keying – DCSK) была впервые предложена в работе Г. Колумбьяна [22]. Среди схем модуляции, основанных на хаосе, DCSK является одной из наиболее изучаемых в настоящее время технологий [13, 51, 52]. Обычно системы DCSK просты в реализации [53, 54] и не сталкиваются с характерными для системы связи на основе COOK проблемами. Длительность каждого бита передаваемой информации в случае DCSK делится на два равных периода, где первый период выделяется для опорного хаотического сигнала, в то же время второй период, в зависимости от отправляемого бита, используется для передачи либо опорного сигнала, либо его инвертированной версии.

Особенностью подхода DCSK является то, что опорный сигнал не генерируется на стороне приемника, а передается по тому же каналу связи, что и сигнал, несущий информацию. Полученные данные оцениваются с помощью операции определения порога путем вычисления знака выходного сигнала коррелятора. Оценка числа битовых ошибок для ХСС на основе DCSK в различных условиях зашумленности канала связи приведена в работах [33, 55, 56, 57, 58]. Стоит отметить, что системам на основе DCSK также свойственен ряд недостатков, включая слабую скрытность и низкую скорость передачи данных, высокие вычислительные затраты и непостоянную битовую энергию [33, 59]. В случае физической системы связи, когда опорный и информационный сигналы искажаются шумом в канале, разделение зашумленного опорного сигнала с зашумленным информационным сигналом в приемнике может быть затруднительно, что ухудшает производительность системы связи на основе DCSK.

1.2.5 Требования к моделям генераторов хаотических колебаний в когерентных ХСС

Обобщая содержание предыдущих разделов, можно сделать вывод, что для создания эффективных хаотических систем связи требуются цифровые генераторы хаотических сигналов со следующим набором характеристик:

1. Высокая степень адекватности конечно-разностной схемы генератора непрерывному прототипу.

2. Устойчивость к дрейфу динамических режимов, деградации хаотических колебаний и способность поддерживать заданный режим колебаний на длительных интервалах времени без перезапуска генератора.

3. Возможность реализации нескольких способов модуляции в рамках архитектуры одного генератора хаотических колебаний.

4. Максимально большое пространство параметров лежащей в основе генератора конечно-разностной модели.

5. Минимальное число арифметических операций в исполняемой модели генератора для уменьшения влияния цифрового шума и ошибок округления на генерируемый сигнал.

Таким образом, подходы к разработке генераторов в ХСС существенно отличаются от приемов, используемых при разработке классических систем передачи данных. Одним из ключевых свойств хаотических сигналов является их высокая чувствительность к изменению управляющих параметров системы. В связи с этим, наиболее практичным подходом к разработке хаотических систем является методика исследовательского модельного проектирования, при которой те или иные свойства объекта проектирования уточняются по мере экспериментальных исследований и учитываются при дальнейшей разработке.

В настоящий момент при проектировании ХСС уделяется недостаточно внимания вопросам эффективного кодирования битов (или цифровой манипуляции) на физическом уровне в рамках заданного типа модуляции. Можно

выделить следующие типы кодирования: кодирование с помощью двухсимвольных систем (код без возвращения к нулю, манчестерское кодирование, код Миллера и др.) [60], трёхсимвольных систем (кодирование с возвращения к нулю, 4ВЗТ и др.) [61], многоуровневых систем [62] и др. Выбор существующей или разработка новой системы кодирования, а также оценка влияния системы кодирования на секретность, BER и пропускную способность являются существенными вызовами на пути к практической реализации хаотических систем связи и требуют создания соответствующих проектных процедур.

Высокая чувствительность к шуму когерентных ХСС обуславливает особые требования к архитектуре приемника и передатчика, а также требует создания новых алгоритмов цифровой обработки сигналов для очистки от шума сигнала в канале связи [133]. В доступных на рынке средствах моделирования подобные инструменты отсутствуют, поэтому существует необходимость их создания.

Сложность применения хаотических сигналов в практических приложениях частично связана с их шумоподобностью (в частности, спектр сигналов хаотических систем схож со спектром розового шума), поэтому многие эффективные методы обработки гармонических сигналов ограниченно применимы к удалению шума в случае хаотических сигналов. Среди перспективных методов очистки от шума хаотических сигналов можно выделить вейвлет-анализ, декомпозицию на эмпирические моды и использование каскада из синхронизированных хаотических осцилляторов [63]. Последний подход к обработке хаотических сигналов был разработан при непосредственном участии автора настоящей работы и показал высокую эффективность при очистке хаотических сигналов от шума различного вида.

Также стоит отметить, что существующие на сегодня стандартные способы модуляции для когерентных систем, в частности модуляция через управление параметром бифуркации и переключение хаотических режимов малоэффективны при практической реализации, так каждый из подобных способов в той или иной степени изменяет динамику хаотической несущей, нарушая скрытность передачи данных [128, 129]. Одной из тенденций современной нелинейной динамики

является переход к управляемым дискретным моделям хаотических систем. В связи с этим представляет интерес исследование схем когерентной модуляции с управляемой конечно-разностной схемой как нового типа модуляции для цифровых хаотических систем связи.

Из-за относительно малой изученности свойств хаотических сигналов и отсутствия специальных алгоритмов их цифровой обработки на рынке отсутствуют специализированные средства моделирования хаотических систем связи. Отдельные инструменты для исследования хаотических систем создаются индивидуально в отдельных научных коллективах, что снижает скорость внедрения данной перспективной технологии в инженерную практику.

Использование несущих хаотических сигналов и разработка генераторов хаотических колебаний затруднительна вследствие того, что встроенное программное обеспечение основано на математических методах, оптимизированных для моделирования классических линейных и линеаризованных систем. Отличительной особенностью доступных средств моделирования является относительно узкая направленность на разработку устройств приема и обработки радиосигналов классического вида. Поэтому в данных системах проектирования является невозможным проведения ключевых этапов проектирования когерентных ХСС, таких как оптимизация параметров синхронизации, оценка потенциальной различимости сигналов при передаче данных в разрабатываемой системе, анализ свойств генератора и приемника хаотических сигналов и т.д.

1.2.6 Способы оценки характеристик хаотических систем связи

Важной частью моделирования и проектирования хаотических систем связи является комплексная оценка их характеристик. Для оценки характеристик ХСС используют те же метрики что и для обычных систем связи, однако есть некоторые

особенности расчета этих характеристик. Среди оценочных метрик систем связи можно выделить:

1. Оценка процента битовых ошибок или помехоустойчивость. Это мера качества сигнала в цифровых системах связи, которая показывает процент ошибочно принятых битов от общего числа переданных [121]. Обычно при решении этих задач находятся зависимости вероятности ошибки приема сигнала от отношения энергии сигнала к спектральной плотности мощности шумов на входе приемника [122]. Однако, как указано в работе [122], аналитическая оценка помехоустойчивости не всегда применима, так как хаотические сигналы ограничены по амплитуде и для них отсутствуют выбросы со сколь угодно большим значением амплитуды, в отличие от сигналов с гауссовским распределением мгновенных значений. Поэтому, удобнее оценивать помехоустойчивость путем прямого статистического моделирования.

2. Скрытность, понимаемая как способность противостоять обнаружению и измерению параметров системы. Когда наблюдателю известно, что в заданном диапазоне частот может работать некоторая система связи, но параметры ее неизвестны, то в этом случае можно анализировать энергетическую скрытность системы связи, с использованием спектрального анализа. Характеристика обнаружения в таком случае полностью определяется соотношением сигнал/шум на входе приемника-анализатора. Время обнаружения при этом зависит как от уровня шума в канале связи и мощности передатчика, так и от ширины полосы частот, используемых для передачи информации. Таким образом, чем шире спектр сигнала, тем выше его энергетическая и параметрическая скрытность [123]. Еще одним способом оценки скрытности является оценка различимости сигналов при передаче определенных бит информации. При таком подходе происходит количественная оценка разницы между сигналами с помощью определенных метрик, например – энергии сигнала. Однако, в случае хаотических систем связи при использовании способов модуляции, которые незначительно меняют спектральные характеристики несущего сигнала, более чувствительные метрики – например метод численных возвратных преобразований. Зная численную оценку

различимости можно делать вывод о сложности раскрытия передаваемого сообщения.

3. Пропускная способность, как мера количества данных которое может быть передано через канал связи за определенный период времени. Пропускная способность задается соотношением Шеннона и зависит от соотношения сигнал/шум и полосы частот несущего сигнала. На основе этого соотношения и лежит идея технологии расширения спектра несущего сигнала при которой для заданного уровня сигнал/шум и желаемой скорости передачи данных можно определить ширину спектра при которой будет обеспечен низкий процент битовых ошибок [121,122].

4. Скорость передачи данных. Это метрика отражает среднее количество данных, передаваемых за единицу времени. Обычно измеряется в битах/байтах в секунду. В случае когерентных хаотических систем связи скорость передачи данных напрямую зависит от качества синхронизации сигнала в канале связи с хаотическим генератором на стороне приемника. Чем быстрее происходит синхронизация сигналов, тем менее длительный по времени сигнал нужно использовать для передачи одного бита информации [122].

Отметим и иные характеристики, которые также оценивают при создании систем связи: задержка при передаче данных – отражает максимальное количество времени, которое проходит между моментом передачи данных от входа передатчика к моменту выдачи приемником восстановленного сообщения; эффективность использования канала связи – оценка эффективности передачи данных относительно максимально возможной пропускной способности канала связи [122,123]. Однако на данном этапе развития когерентных хаотических систем связи оценка этих характеристик является второстепенной и выходит за рамки диссертационного исследования.

В ходе работы оценка процента битовых ошибок проводилась путем прямого статистического моделирования, в качестве меры скрытности была выбрана метрика различимости сигналов при модуляции, пропускная способность и скорость передачи информации оценивалась относительно длительности

интервала при передаче одного бита информации при котором сохранялся наименьший процент битовых ошибок для заданного уровня шума в канале связи. Данные метрики были использованы для сравнения полученных решений с известными из литературы способами модуляции хаотических сигналов.

1.3 Математическое и компьютерное моделирование при модель-ориентированном проектировании хаотических систем связи

Комплексность и техническая новизна хаотических систем связи делает рациональным применение при их создании и изучении методики, известной как модель-ориентированное проектирование (МОП).

1.3.1 Модель-ориентированное проектирование систем, использующих хаотические сигналы

Модель-ориентированное проектирование – подход к разработке и тестированию различных систем, подразумевающий замену физического прототипа на математическую или программную модель на всем цикле проектирования. При этом объект проектирования может включать модели различных компонентов, таких как электрические схемы, механические соединения, теплопроводность, гидравлические и пневматические системы, и др. МОП применяется для решения задач, связанных с проектированием сложных систем управления [64], комплексных систем обработки сигналов [65], систем связи, а также во многих системах управления подвижными объектами, при проектировании промышленного оборудования, аэрокосмической и автомобильной промышленности [66, 67, 68].

Применение подходов МОП позволяет удешевить процесс проектирование путем снижения затрат на создание физического прототипа, необходимого для

оценки качества проектного решения. Также с помощью модель-ориентированного подхода можно оценить чувствительность, функциональную безопасность, статистические отклонения допусков компонентов и проверить соответствие ожидаемых характеристик техническому заданию [69].

Для реализации концепции МОП необходимо наличие трех ключевых составляющих: методика модель-ориентированного проектирования, математические и исполняемые модели исследуемого объекта, а также комплекс программных средств для преобразования и исследования исполняемых моделей [70].

Физическая система, реально существующая на испытательном стенде или в приложении, обычно определяется как набор взаимосвязанных и взаимодействующих объектов или компонентов, которые выполняют определенную задачу или ряд специализированных функций. Это означает, что проектные модели могут находиться на разных уровнях абстракции с точки зрения адекватности реальным физическим компонентам [71].

Как правило, процесс разработки в рамках концепции МОП описывается V-диаграммой (рисунок 1.5). На каждом этапе процесса МОП для представления компонентов системы используются различные модели. По мере прохождения разных этапов проектирования модели могут уточняться, а исследуемый объект принимает окончательную форму. В итоге вся система будет представлена в виде комплекса моделей с заданной точностью для тестирования проекта перед введением в эксплуатацию.

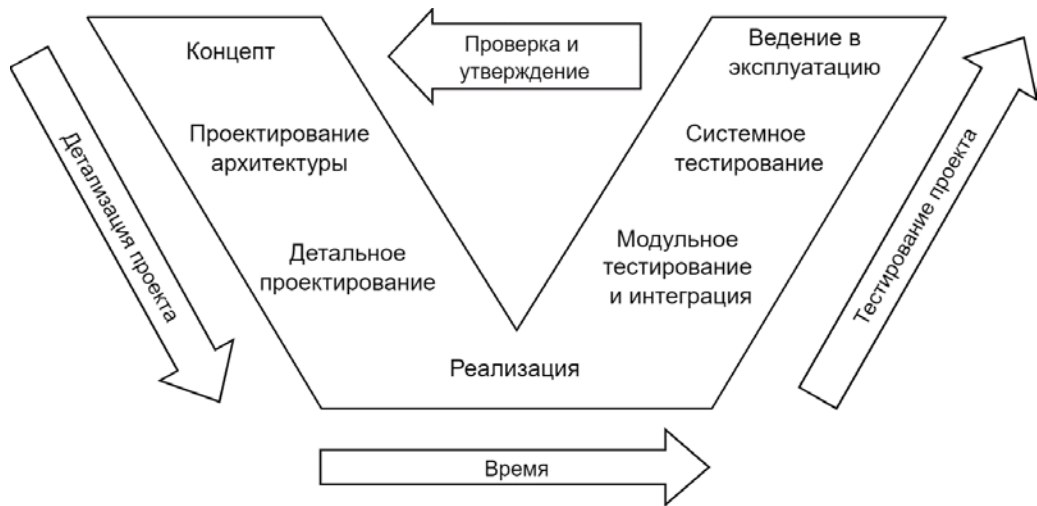


Рисунок 1.5 – V-диаграмма модель-ориентированного процесса разработки наукоемких изделий

Отдельно стоит отметить этап реализации и тестирования проекта в потоке МОП и проиллюстрировать итеративный процесс построения достоверной (адекватной) математической модели объекта исследования. Перед оценкой меры адекватности наблюдаемого и моделируемого поведения объекта необходима проверка модели, называемая верификацией. Верификация модели — это подтверждение того, что виртуальный прототип представляет объект проектирования в заданных пределах точности.

Среди преимуществ МОП можно выделить:

- Сокращение времени аппаратной реализации. С использованием МОП можно проверить совокупность компонентов системы и оптимизировать аппаратные и программные затраты, или сделать это с существующими проектами и избежать потенциально дорогостоящих итераций создания физического прототипа.

- Обнаружение ошибок на ранней стадии проектирования, повышение надежности системы. Обнаружение потенциальных сбоях встроенного программного и аппаратного обеспечения в случае внешних ошибок с периферийных датчиков, падений напряжения и других обстоятельств.

– Сокращение сроков проектирования и удешевление производства для новых циклов разработки продукта. Методология МОП может эффективна для сокращения времени производства и введение новых проектов в эксплуатацию.

Отметим, что особой важностью при МОП-разработке обладает адекватность используемых математических и исполняемых моделей объекта.

1.3.2 Исследовательское проектирование как перспективный способ разработки наукоемких изделий

В данной работе предлагается использовать методику исследовательского проектирования, при которой свойства объекта проектирования уточняются в процессе его создания, а некоторые из средств проектирования и моделирования создаются непосредственно во время разработки с учетом логики проектного процесса. Исследовательское проектирование подразумевает создание специализированного программно-аппаратного комплекса, в котором проектировщик может использовать единую модель проектируемой системы с целью анализа и тестирования, визуализации состояний модели и верификации принятых в процессе разработки решений [72].

Стоит отметить, что разработка наукоемких систем часто сталкивается с обнаружением новых качеств объекта проектирования в процессе разработки. Так, в ходе имитационного моделирования или прототипирования при МОП наукоемких изделий могут обнаруживаться новые эффекты, которые необходимо учитывать при дальнейшем проектировании, в том числе, с точки зрения гибкой модификации уже имеющихся моделей объекта.

Важное значение в концепции МОП занимает быстрое прототипирование аппаратных средств. Одним из передовых решений в данной области является программно-аппаратный комплекс быстрого прототипирования фирмы National Instruments (NI). В качестве аппаратной платформы для тестирования ХСС были выбраны следующие устройства: лабораторная станция прототипирования NI

ELVIS III и устройство для проектирования встраиваемых систем NI MyRIO. Данные аппаратные платформы обладают всей необходимой периферией, включая встроенные ЦАП и АЦП, а также имеют в составе программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС), на основе которой может быть реализованы конечно-разностные схемы приемников и передатчиков. Программное обеспечение для станции прототипирования NI ELVIS III и MyRIO реализуется на языке графического программирования LabVIEW. Кроме этого, существует поддержка этих инструментов для различных операционных систем, включая Windows и macOS. Основные технические характеристики NI ELVIS III (рисунок 1.6):

- 4-канальный осциллограф со скоростью 100 Мвыб/с (одноканальный 400 Мвыб/с), 50 МГц с разрешением 14 бит;
- 16-канальный аналоговый вход 1 Мвыб/с с разрешением 16 бит;
- 7 встроенных измерительных инструментов и управляющий вход/выход, содержащий 16 AI, 4 АО и 40 DIO.
- Встроенную ПЛИС Zynq-7020, содержащую двухъядерный процессор ARM Cortex-A9.



Рисунок 1.6 – Настольная станция прототипирования NI ELVIS III с установленной макетной платой [73].

Основные технические характеристики устройства NI MyRIO, представленного на рисунке 1.7:

- Встроенная ПЛИС Xilinx Zynq-7010, содержащая двухъядерный процессор ARM Cortex-A9.

- 10 аналоговых входов, 6 аналоговых выходов с разрешением 14 бит.
- Аудиоканалы ввода / вывода, а также до 40 линий цифрового ввода / вывода (DIO).



Рисунок 1.7 – Настольная станция прототипирования NI ELVIS III с установленной макетной платой [74].

Стоит отметить, что существующая в программных пакетах фирмы National Instruments возможность компьютерного моделирования и эмуляции выбранных аппаратных платформ в полной мере соответствует парадигме МОП ХСС. Отдельные компоненты технических систем, использующих динамический хаос, могут быть промоделированы в САПР Multisim [74], а также с использованием дополнительных компонентов для среды NI LabVIEW.

1.3.3 Методика модель-ориентированного проектирования хаотических систем

Объектом исследования в данной работе являются генераторы хаотических колебаний в контексте их применения в когерентных прямохаотических систем связи. Рассмотрим процесс разработки такой системы так, как представлено на рисунке 1.8, и покажем, какую роль в нем играют математические и компьютерные модели генераторов хаотических колебаний.

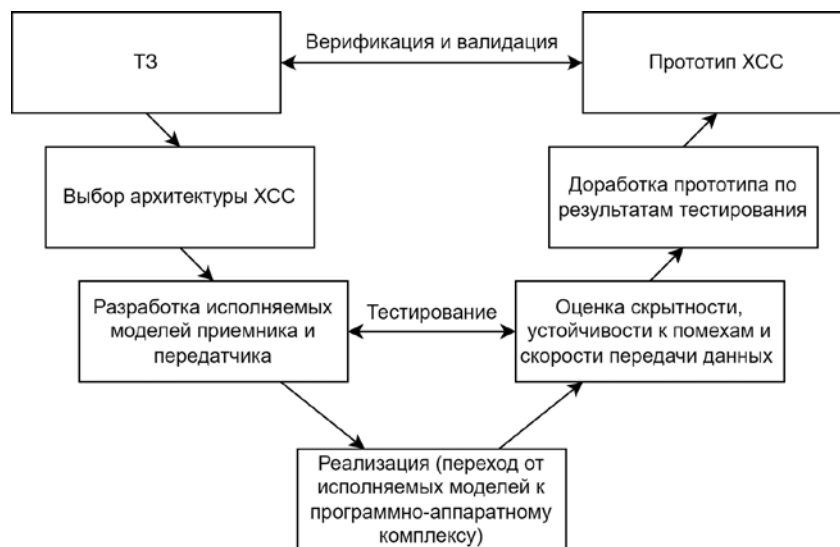


Рисунок 1.8 – Процесс исследовательского проектирования ХСС

1. Формирование технического задания. В техническом задании указываются требования к проектируемой ХСС, которые включают требования к скрытности, помехозащищенности и скорости передачи данных.

2. Процедура выбора архитектуры ХСС включает в себя выбор способа модуляции, выбор математической модели хаотической системы как основы для генератора хаотических колебаний, а также выбор аппаратной платформы, задающей длину машинного слова и точностные характеристики генератора.

3. На этапе разработки исполняемых моделей приемника и передатчика происходит формирование конечно-разностных моделей генераторов и приемников хаотических сигналов с применением численных методов интегрирования и выбранного способа модуляции-демодуляции. Также на этом

этапе происходит определение оптимальных параметров синхронизации с точки зрения скорости передачи данных и устойчивости к шумам в канале.

4. На четвертом этапе происходит программно-аппаратная реализация исполняемых моделей, синтезированных на этапе 3 с использованием выбранных аппаратных средств.

5. На пятом этапе происходит тестирование программно-аппаратного комплекса для оценки полученного уровня защищенности, устойчивости к помехам в канале связи и скорости передачи данных с применением соответствующих методов и процедур анализа.

6. По результатам тестирования происходит доработка прототипа с целью повышения его характеристик, при необходимости – возврат на предыдущие этапы разработки.

7. На последнем этапе проектирования происходит валидация и верификация созданного прототипа ХСС с точки зрения соответствия его техническому заданию.

В качестве основного инструмента разработки программного обеспечения в диссертационной работе выбрана специализированная среда графической разработки кода NI LabVIEW с модулями расширения. Ключевым преимуществом данной среды является то, что созданную имитационную модель объекта проектирования в виде виртуального прибора можно верифицировать с помощью аппаратных комплексов от National Instruments, таких как ELVIS III и MyRIO, путем расширения имитационной модели до экспериментального стенда с применением цифрового функционального аналога [72]. Среда предусматривает автоматизированную генерацию кода целевой платформы по исполняемым моделям. Быстродействие предложенного экспериментального стенда обеспечивается встроенными в аппаратные комплексы прототипирования программируемыми логическими интегральными схемами (ПЛИС). Данный подход укладывается в концепцию модель-ориентированного проектирования, при которой на каждом этапе проектирования объект представлен исполняемой и верифицируемой моделью.

1.4 Выводы по главе. Постановка задачи исследования

В главе проведен анализ влияния архитектуры генераторов хаотических сигналов и способов их модуляции на характеристики хаотических систем связи. Показано, что ключевой особенностью ХСС является то, что формирование несущего сигнала и модуляция происходят непосредственно в полосе частот системы связи, а демодуляция производится без промежуточного преобразования частоты. Рассмотрены основные виды модуляции, применяемые в когерентных хаотических системах связи, сформулированы их преимущества и недостатки. В качестве основной среды разработки программного обеспечения в работе выбрана специализированная среда NI LabVIEW с модулем расширения FPGA Module, реализующим автоматическую генерацию прошивки для ПЛИС FPGA по графическому коду в рамках концепции модель-ориентированного проектирования (МОП). Перечисленные компоненты программного обеспечения использованы в ходе полунатурного моделирования ХСС и экспериментальных работ по оценке характеристик генераторов хаотических сигналов, описанных в главе 4 диссертации.

В главе описаны особенности хаотических сигналов, такие как ортогональность длинных хаотических последовательностей, широкий шумоподобный спектр, устойчивость к явлениям интерференции и замирания сигнала в средах с множественными отражениями сигнала и способность к синхронизации. Данные особенности накладывают определенные требования на математические и исполняемые модели генераторов хаотических сигналов. Сформулированы следующие требования к генераторам хаотических сигналов: высокая адекватность дискретных моделей непрерывным прототипам с точки зрения воспроизведения динамических режимов, устойчивость к хаотической деградации, реализация нескольких способов модуляции в рамках одной исполняемой модели, минимизация числа арифметических операций.

Показано что существующие решения в области построения генераторов хаотических колебаний не позволяют достичь требуемых характеристик устройства, что образует потребность в новом математическом и программном обеспечении ХСС. Представляет интерес исследование генераторов хаотических колебаний для когерентных ХСС с модуляцией на основе управляемой конечно-разностной схемы как нового типа модуляции для цифровых хаотических систем, а также разработка новых типов модуляции за счет применения малоизученных типов синхронизации в схемах модуляции-демодуляции, что могло бы обеспечить разумный компромисс между свойствами когерентных и некогерентных систем связи. Развитие новых способов модуляции и архитектуры генераторов хаотических сигналов будет способствовать повышению характеристик перспективных ХСС, что в свою очередь приведет к более широкому внедрению подобных систем связи в инженерную практику.

Обобщая вышеизложенное, можно сформулировать уточненную цель диссертационной работы как повышение адекватности математического и компьютерного моделирования, а также основных характеристик цифровых генераторов хаотических сигналов, применяемых в хаотических системах связи, за счет создания специализированного математического и программного обеспечения.

Исходя из поставленной цели, необходимо решить 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.

Описание нового способа модуляции и решение задачи синтеза элементов ХСС в форме математических и исполняемых моделей генераторов хаотических сигналов с управляемыми динамическими свойствами, а также алгоритмы цифровых генераторов хаотических сигналов, использующих новый способ модуляции, представлены в главе 2. Элементы комплекса программных средств компьютерного моделирования и исследовательского проектирования генераторов хаотических сигналов представлены в главе 3. Порядок проведения и результаты экспериментальных исследований, подтверждающих теоретические положения диссертации, описаны в главе 4. В заключении диссертационной работы сделаны выводы и обобщения полученных результатов, а также сформулированы возможные направления дальнейших исследований.

2 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГЕНЕРАТОРОВ ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНЫХ СХЕМ С УПРАВЛЯЕМОЙ СИММЕТРИЕЙ

Как было показано в главе 1, хаотические системы связи и другие технические решения, основанные на динамическом хаосе, предъявляют особые требования к математическому аппарату, лежащему в основе генераторов несущих сигналов. Критериями оценки подобных генераторов в конечном счете оказываются способность генерации ортогональных сигналов, устойчивость к деградации хаотических режимов, максимально возможное и однородное пространство параметров, адекватное воспроизведение режимов непрерывного прототипа при программной реализации на выбранной целевой платформе. В качестве математических моделей приемников и передатчиков хаотического сигнала, как правило, выступают определяющие нелинейные дифференциальные уравнения и их конечно-разностные схемы, называемые также дискретными отображениями. Дискретные модели с хаотическим поведением, как правило, получают из исходных непрерывных уравнений с помощью численных методов интегрирования. Стоит отметить, что в составе современных сред моделирования, как правило, отсутствуют встроенные генераторы хаотических колебаний с управляемыми свойствами. Известно, что характеристики генератора хаотических колебаний непосредственно зависят от свойств применяемого дискретного оператора интегрирования, который существенно влияет на процесс синхронизации [75] цифровых хаотических систем. В диссертационной работе мы будем использовать дискретизацию непрерывных систем при помощи численных методов интегрирования для создания типовых блоков генерации хаотических сигналов с различными способами модуляции хаотических сигналов, хотя предложенный подход применим и для изначально дискретных хаотических отображений.

Одним из наиболее перспективных классов численных методов для интегрирования дифференциальных уравнений с хаотическим поведением выступают полуявные симметричные численные методы решения ОДУ с управляемой симметрией [76]. Данный класс решателей ОДУ удачно сочетает высокую численную устойчивость, простоту программной реализации и низкие вычислительные затраты с повышенной стойкостью получаемых конечно-разностных моделей к хаотической деградации, а также является геометрическими интеграторами. В настоящей главе показано, что помимо перечисленных положительных качеств, полуявные методы численного интегрирования позволяют реализовать новые способы модуляции хаотических сигналов на основе управления симметрией фазового пространства.

В главе также представлена эмпирическая оценка адекватности математических и исполняемых моделей генераторов хаотических сигналов, полученных различными численными методами интегрирования. Показано, что полуявные решатели ОДУ позволяют наиболее полно сохранить динамику непрерывного прототипа при численном моделировании, и имеют высокую устойчивость к хаотической деградации, что, в сочетании с новым эффективным способом модуляции сигналов, делает целесообразным их применение при разработке генераторов хаотических сигналов для ХСС.

2.1 Численные методы интегрирования с управляемой симметрией

В данном разделе рассматриваются полуявные численные методы интегрирования с управляемой симметрией, являющиеся вычислительно эффективными и аппаратно-ориентированными решателями ОДУ [124, 127], используемыми в настоящей работе при синтезе математических и исполняемых моделей генераторов хаотических колебаний.

2.1.1 Полуявные численные методы интегрирования

Концепция обобщенных диагонально- неявных методов численного интегрирования, или сокращенно Д-методов, изложена Д.Н. Бутусовым и др. в работах [77, 78, 79]. Подобные методы численного интегрирования (МЧИ) обладают вычислительной эффективностью явных методов при лучшей численной устойчивости и точности, а также сохраняют некоторые геометрические свойства решения при моделировании консервативных систем. Упомянутые геометрические особенности симметричных МЧИ были впервые отмечены в полунеявных алгоритмах Эйлера-Кромера [80] и Штёрмера-Верле [81], использовавшихся для моделирования гамильтоновых систем. В свою очередь, Д-методы являются обобщением полуявных симплектических алгоритмов интегрирования на весь класс динамических систем, описываемых обыкновенными дифференциальными уравнениями (ОДУ), которые могут быть записаны в нормальной форме Коши.

Отметим, что Д-методы так же, как методы Штёрмера-Верле, существуют только для систем размерности $N \geq 2$, вырождаясь для систем первого порядка в явный и неявный метод Эйлера.

Композиционный Д-метод (КД), известный как самосопряженный полунеявный метод, является частным случаем диагонально-неявных методов. Метод КД хорошо подходит для моделирования хаотических систем, поскольку он предотвращает смещение хаотических траекторий дискретной системы на периодические или квазихаотические орбиты во время длительного моделирования при ограниченной длине разрядной сетки. В контексте разработки ХСС это означает большую устойчивость к хаотической деградации. Более того, в отличие от полностью неявных методов он не подавляет хаотические режимы за счет избыточной диссипации при моделировании как консервативных, так и диссипативных систем [79].

Метод КД Ψ с размером шага интегрирования h может быть описан как:

$$\Psi_h = \Phi_{h/2} \circ \Phi_{h/2}^* \quad (2.1)$$

Это композиция пары опорных сопряженных Д-методов $\Phi_{h/2}$ и $\Phi_{h/2}^*$, взятых с половинным шагом $h/2$. В дискретный момент времени t_n , когда решение x_n уже известно, можно применить пару методов $\Phi_{h/2}$, чтобы получить x_{n+1} .

Рассмотрим динамическую систему порядка $N \geq 2$:

$$\dot{x} = f(x), x = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T, \quad (2.2)$$

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

$$\begin{aligned} \dot{u} &= f_u(u, w); \\ \dot{w} &= f_w(u, w), \end{aligned} \quad (2.3)$$

Тогда первый сопряженный метод $\Phi_{h/2}$ имеет вид

$$\begin{aligned} u_{n+\frac{1}{2}} &= u_n + \frac{h}{2} \cdot f_u(u_n, w_n); \\ w_{n+\frac{1}{2}} &= w_n + \frac{h}{2} \cdot f_w\left(u_{n+\frac{1}{2}}, w\right), \end{aligned} \quad (2.4)$$

Второй сопряженный метод $\Phi_{h/2}^*$ описывается следующим уравнением:

$$\begin{aligned} w_{n+1} &= w_{n+\frac{1}{2}} + \frac{h}{2} \cdot f_w\left(u_{n+\frac{1}{2}}, w_{n+1}\right); \\ u_{n+1} &= u_{n+\frac{1}{2}} + \frac{h}{2} \cdot f_u(u_{n+1}, w_{n+1}). \end{aligned} \quad (2.5)$$

Первый сопряженный метод является полностью явным, а второй сопряженный метод содержит неявность в диагональных элементах матрицы системы. Одним из полезных свойств метода КД является то, что за счет построчного вычисления правой части диагональная неявность одномерна и может

быть разрешена аналитически или с помощью метода простых итераций, что позволяет обойтись без вычислительно затратного метода Ньютона [79]. При этом сходимость итераций также гарантируется за счет одномерности задачи. Оценим адекватность получаемых методом КД конечно-разностных моделей с точки зрения сохранения основных режимов, присущих непрерывному прототипу.

2.1.2 Оценка адекватности конечно-разностных моделей хаотических систем, полученных полувывными методами интегрирования

Рассмотрим хаотическую систему Буали [125], описываемую следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений третьего порядка:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= ax(1-y) - bz \\ \dot{y} &= -cy(1-x^2) \\ \dot{z} &= dx\end{aligned}\tag{2.6}$$

Где x , y и z – переменные состояния, $a=3$, $b=2.2$, $c=1$ и $d=0.001$ – параметры. В работе [125] показано, что у системы Буали существует единственная точка равновесия при $(x, y, z) = (0, 0, 0)$, которая является особой точкой типа седло-фокус. Для данной системы характерна не только чувствительность к изменениям параметров, но и крайне высокая восприимчивость к изменению начальных условий при моделировании. Например, для начальных условий $(x_0, y_0, z_0) = (1.2, 1, -0.02)$ и $(x_0, y_0, z_0) = (1, 1, -0.02)$ решения не будут сходиться к решению, полученному при начальных условиях $(x_0, y_0, z_0) = (1, 1, 0)$. Фазовые портреты системы Буали, полученные показаны на рисунке 1.1.

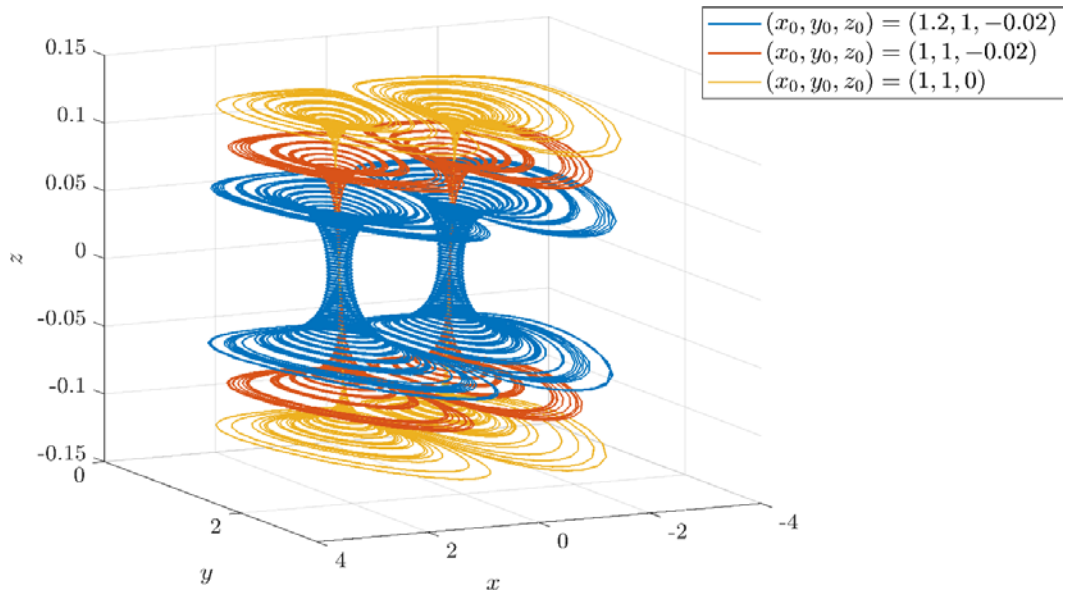


Рисунок 2.1 – Фазовые портреты системы Буали, полученные при моделировании с различных начальных условий.

Высокая даже по меркам хаотических систем чувствительность как к изменению параметров, так и начальных условий позволяет сделать предположение о том, что динамика системы Буали может отличаться в зависимости от выбора метода численного. Рассмотрим двумерные карты динамических режимов дискретных моделей системы Буали с оценкой наибольшего показателя Ляпунова при варьировании параметров и начальных условий (рисунок 1.2 и 1.3 соответственно), полученные с помощью методов низкого (1-2) порядка точности, таких как метод Эйлера Кромера (Euler-Cromer), метод КД (CD), полуявный метод средней точки (SIMP), явный (EMP) и неявный (IMP) методы средней точки по сравнению с эталонным решением, полученным методом высокого порядка точности (метод Дормана-Принса 8 порядка – DOPRI78).

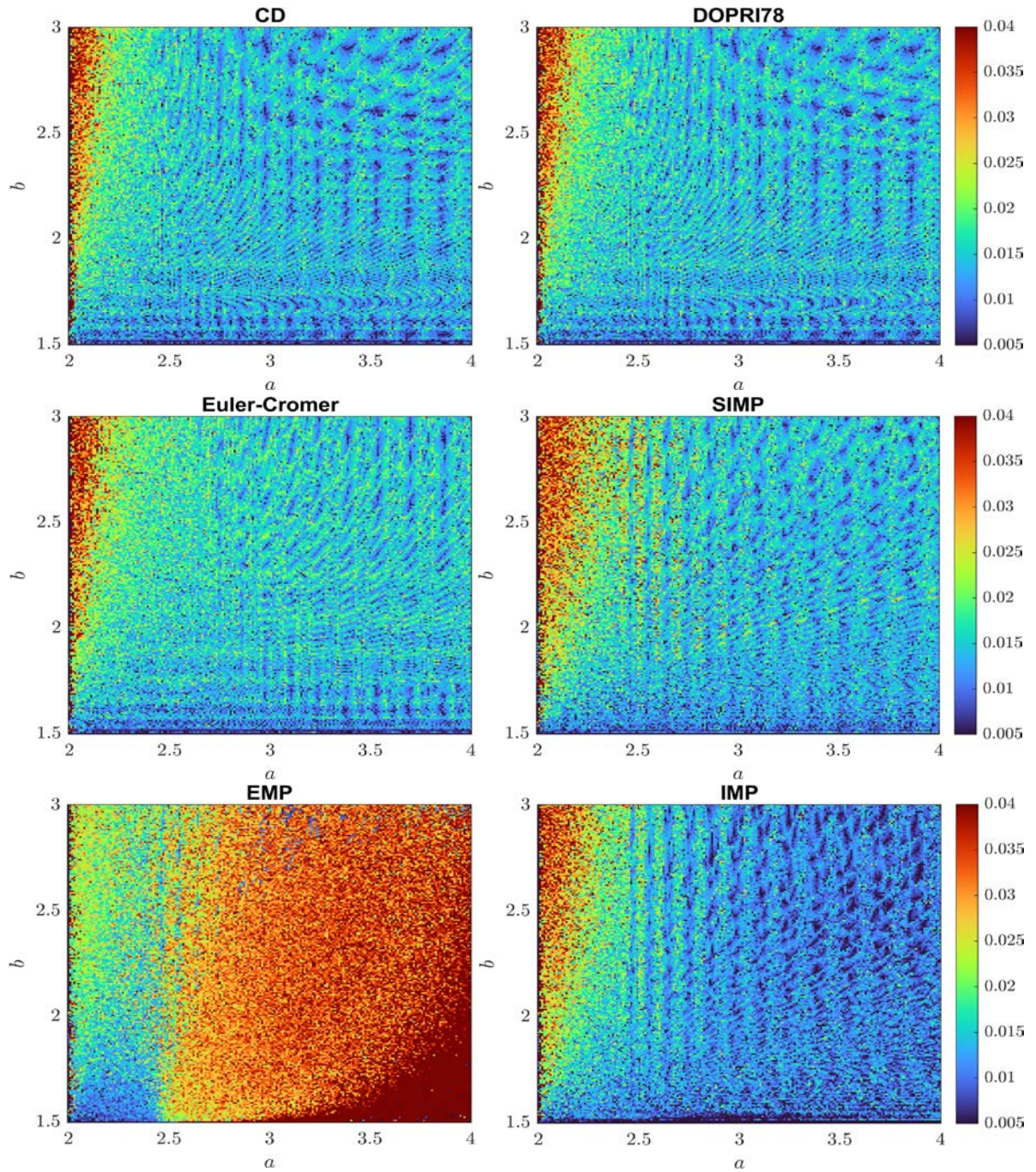


Рисунок 2.2 – Двумерные диаграммы динамических режимов на основе оценки наибольшего показателя Ляпунова для дискретных моделей системы Буали, полученных различными численными методами интегрирования, при варьировании параметров a и b .

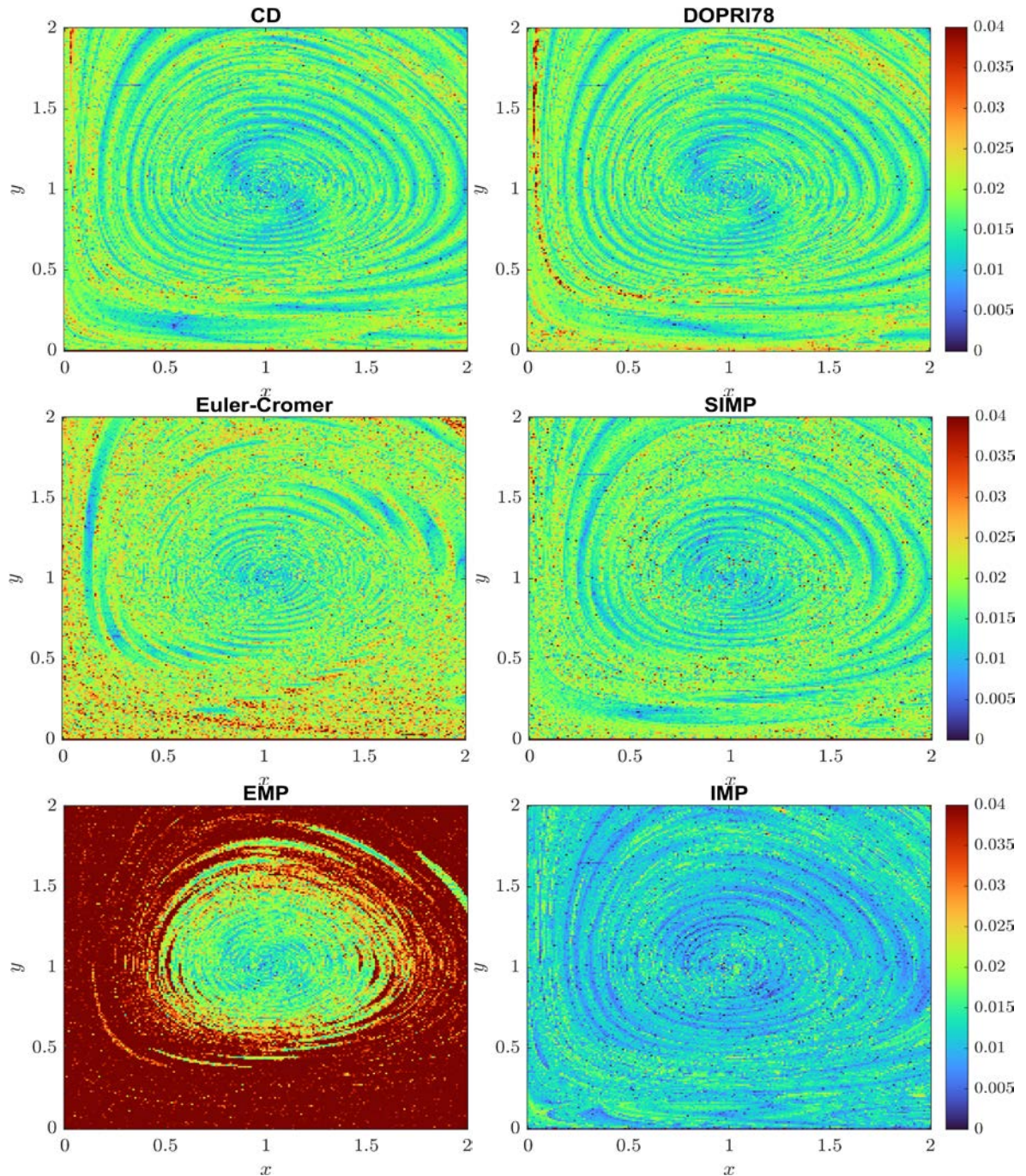


Рисунок 2.3 – Двумерные карты режимов дискретных моделей системы Буали, построенные с использованием наибольшего показателя Ляпунова при варьировании начальных условий переменных состояния x и y и $z_0 = -0.02$.

Как видно на рисунках 1.2 и 1.3, полуявные методы интегрирования позволяют лучше сохранить динамику непрерывной системы Буали при дискретизации. Для явного метода средней точки наблюдается тенденция к увеличению объёма фазового пространства, что влечет за собой рост значения старшего показателя Ляпунова и, в конечном итоге, выход из заданного режима

колебаний вследствие численной неустойчивости. В то же время для неявного метода средней точки характерно уменьшение объема фазового пространства, что ведет к уменьшению значения старшего показателя Ляпунова и также в итоге может вызвать нарушение заданного режима колебаний при использовании в реальных технических системах.

Для оценки сохранения динамических режимов генераторами хаотических сигналов на длительных интервалах времени была проведена серия экспериментов по долгосрочному моделированию системы Буали при стандартных значениях параметров и для начальных условий $(x_0, y_0, z_0) = (1.2, 1, -0.02)$. Было проведено 200 циклов по 2000 секунд моделирования каждый. Для каждого отсчета фазовый объем вычислялся в первом приближении, то есть был рассчитан объем куба, в который может быть вписан аттрактор системы. Оценка изменения объема фазового пространства системы Буали при моделировании разными методами численного интегрирования показана на рисунке 2.4.

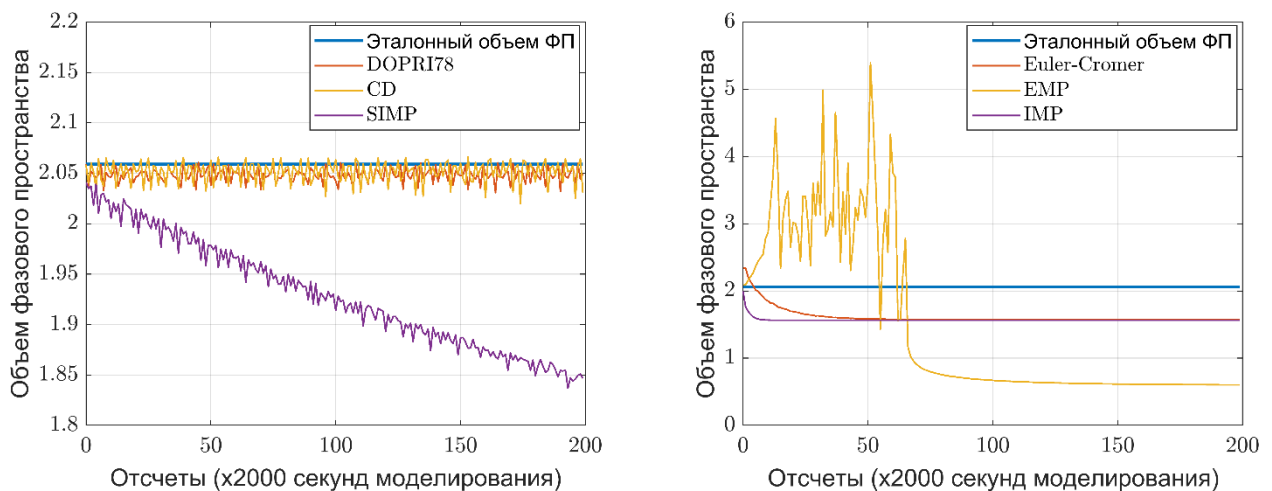


Рисунок 2.4 – Оценка изменения объема фазового пространства при моделировании системы Буали разными численными методами интегрирования

По результатам экспериментов, показанным на рисунке 2.4 видно, что лучше всего сохраняет динамику исходной системы дискретная модель, полученная методом КД, демонстрируя практически полное отсутствие изменения фазового объема наравне с эталонным решением. Решение, полученное полуявным методом вредней точки, демонстрирует небольшое уменьшение фазового объёма. Методы

Эйлера-Кромера, явной и неявной средней точки демонстрируют деградацию исходной динамики при долгосрочном моделировании.

Результаты экспериментов подтверждают, что полуявные методы численного интегрирования, в особенности, выбранный в настоящем исследовании метод КД, обеспечивают наилучшую адекватность конечно-разностных схем генераторов хаотических колебаний непрерывным прототипам и наиболее пригодны для использования при построении приемников и передатчиков ХСС.

2.1.3 Управление симметрией фазового пространства дискретных моделей генераторов хаотических сигналов

Отметим, что деление шага по времени h на два в уравнении (2.2) - частный случай более обобщенной формулы адаптивного интегратора. Введем коэффициент симметрии s и применим его к размеру шага h , чтобы разбить его на две произвольные части:

$$\begin{aligned} h_1 &= h \cdot s; \\ h_2 &= h \cdot (1 - s). \end{aligned} \quad (2.7)$$

Таким образом можно сформулировать семейство сопряженных полуявных методов с переменной симметрией или методов КДПС:

$$\Psi_{h,s} = \Phi_{h_1} \circ \Phi_{h_2}. \quad (2.8)$$

Эти методы сохраняют некоторые из основных свойств метода КД и обеспечивают аффинное преобразование фазового пространства дискретной системы без нарушения хаотического режима. Графическая интерпретация метода КДПС представлена на рисунке 2.5.

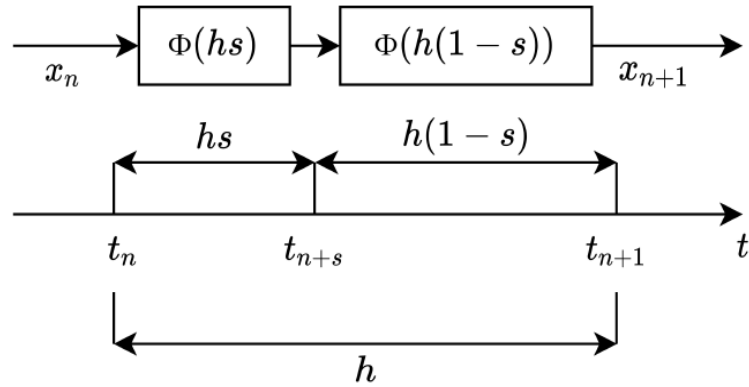


Рисунок 2.5 – Полуявный метод КД с переменной симметрией [82]

В работе [76] было продемонстрировано, что полная синхронизация двух дискретных моделей хаотических систем не может наблюдаться, если коэффициенты симметрии ведущего и ведомого решателей КДПС не совпадают. Также в работе была показана возможность адаптивного управления коэффициентами симметрии, что делает методы интеграции семейства КДПС пригодными для применения при проектировании генераторов хаотических сигналов в составе ХСС. Стоит отметить, что изменение коэффициента симметрии меняет лишь геометрию фазового пространства, являясь аффинным преобразованием, и численную устойчивость конечно-разностной схемы, в отличие от параметра бифуркации, меняющего нелинейные свойства всей системы [132]. Гипотеза настоящего исследования состоит в том, что изменение коэффициента симметрии конечно-разностной схемы может оказаться более эффективным способом модуляции хаотических сигналов, чем другие методы, в частности, изменение параметра. Рассмотрим подробнее принцип управления фазовым пространством генератора хаотических сигналов с помощью анализа устойчивости методов КДПС.

2.1.4 Области устойчивости полуявного метода интегрирования

Из рисунка 2.5 и уравнения 2.6 видно, что коэффициент симметрии в конечно-разностной схеме генератора умножается на шаг интегрирования h . Поэтому разумно предположить, что управление коэффициентом симметрии приводит к изменению численной устойчивости метода КДПС. Под численной устойчивостью метода интегрирования подразумевают его способность сохранять оценочную величину локальной ошибки интегрирования и усечения при стремлении шага интегрирования к нулю.

Для теоретического изучения этого свойства и оценки устойчивости метода, как правило, строятся исследуются т.н. области устойчивости.

Для расчета и визуализации областей устойчивости применяют подход основанный на линейном уравнении Дальквиста первого порядка [83], однако в случае методов КДПС данный подход не применим из-за того, что последние, как все полуявные алгоритмы, существуют лишь для систем второго порядка и выше, вырождаясь для задачи первого порядка в методы Эйлера. Поэтому для построения областей устойчивости в настоящей работе используется подход, описанный Д.Н. Бугусовым в работе [84], при котором исследуется двумерная начальная задача вида:

$$\dot{x} = Ax, \quad (2.9)$$

где A представляет собой матрицу вида:

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}, \quad (2.10)$$

которая имеет комплексные собственные числа $\lambda_{1,2} = \sigma \pm j\omega$, совпадающие с точками $(\sigma, \pm j\omega)$ на комплексной плоскости. Матрица A задается с помощью двух дополнительных параметров k и r следующим образом:

$$\begin{aligned}
 a &= kd, \\
 b &= rc, \\
 c &= -\sqrt{\frac{1}{r}(\lambda_1^2 - (1+k)d\lambda_1 + kd^2)}, \\
 d &= \frac{2\sigma}{1+k}.
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Параметр $r = 1$ является постоянным, так как не влияет на области устойчивости, а параметр k управляет весами матричных коэффициентов. Значение $k = 1$ соответствует канонической жордановой форме A , а его значение $k = 0$ или $k = \infty$ соответствует нормальной форме Фробениуса [77, 79].

Затем из уравнений метода КДПС находится матричная функция устойчивости $R(s, hA(\lambda))$ по условию, принадлежит ли точка комплексной плоскости (σ, ω) к области устойчивости:

$$\max |eigR(s, hA(\sigma + j\omega))| \leq 1. \tag{2.12}$$

Для метода КД со значением коэффициента симметрии $s = 0.5$, области устойчивости приведены на рисунке 2.6. Более светлые регионы области устойчивости соответствуют меньшим собственным значениям функции устойчивости $R(s, hA(\lambda))$. Для переменной s и константы $k = 1$, соответствующих симметричной матрице в жордановой нормальной форме, области устойчивости приведены на рисунке 2.7. При этом наибольшую область устойчивости метод имеет при $s = 0.5$. Стоит отметить, что значения s за пределами интервала $[0,1]$ уменьшают размер области устойчивости, как показано на рисунке 2.3 для $s = 1.25$. Области устойчивости для коэффициентов симметрии $s = 0.2$ и $s = 0.8$ для различных коэффициентов симметрии матрицы k показаны на рисунках 2.8 и 2.9, соответственно.

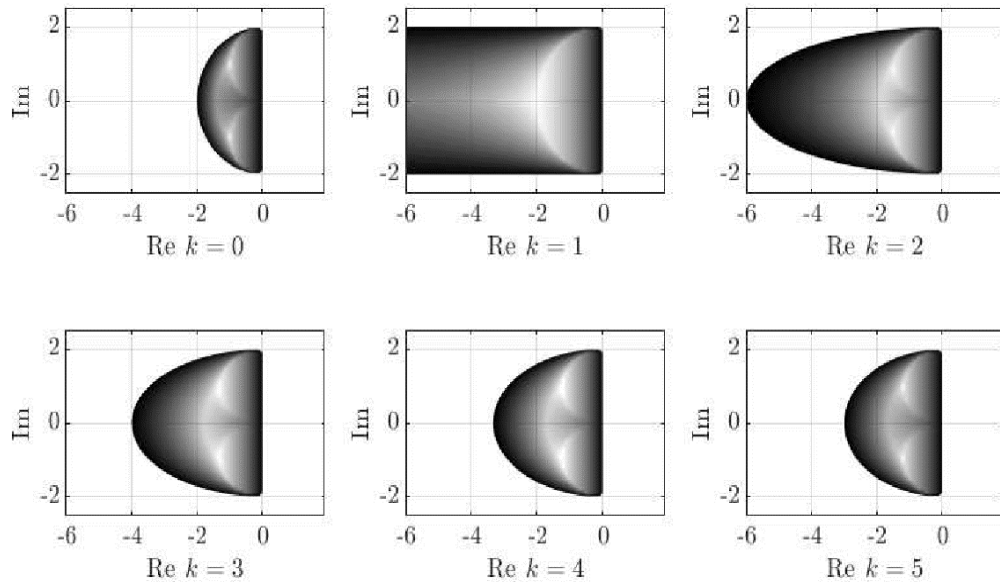


Рисунок 2.6 – Области устойчивости метода КДПС для тестовой задачи (3.8) с разными значениями k и $s = 0.5$ [85]

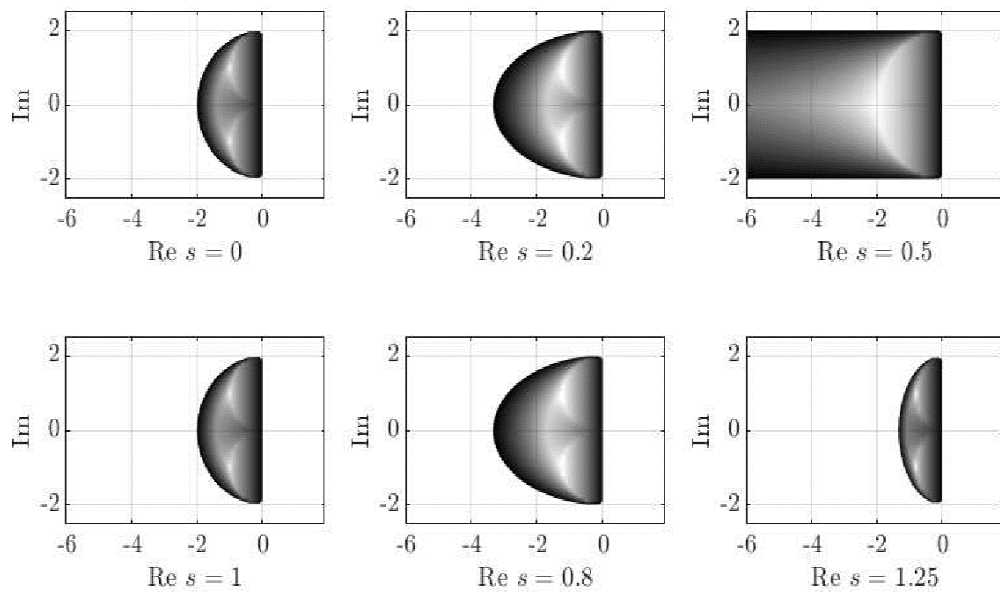


Рисунок 2.7 – Области устойчивости метода КДПС для различных значений s при $k = 1$ [85]

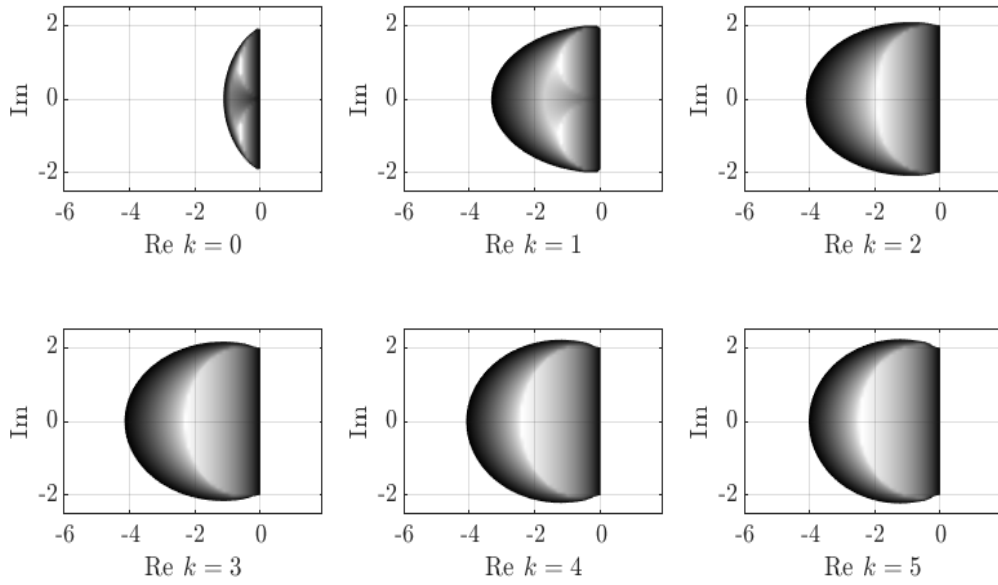


Рисунок 2.8 – Области устойчивости метода КДПС для различных значений k при $s = 0.2$ [85]

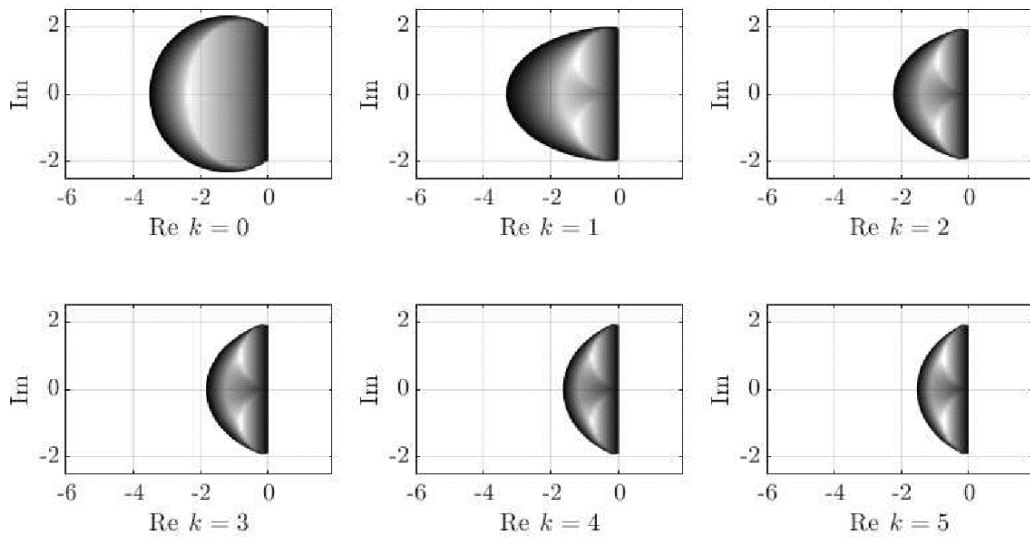


Рисунок 2.9 – Области устойчивости метода КДПС для различных значений k при $s = 0.8$ [85]

Приведенные результаты анализа численной устойчивости подтверждают предположение, что численной устойчивостью методов КДПС возможно

динамически управлять через изменение коэффициента симметрии, и именно изменение устойчивости влечет за собой небольшое изменение скорости синхронизации. Таким образом, изменение коэффициента симметрии приводит к существенному изменению свойств дискретного оператора, влекущему за собой нарушение процесса синхронизации, однако при этом не разрушает режим колебаний, что может быть использовано при разработке нового способа модуляции хаотических сигналов.

2.2 Способы синхронизации хаотических динамических систем

Синхронизация двух или более хаотических систем в конфигурации «ведущий-ведомый» может выполняться с использованием различных подходов, таких как метод Пекоры-Кэрролла [24, 86, 87], метод с использованием обобщенных гамильтоновых форм [88] или подход Open-Plus-Close-Loop (OPCL) [89].

Хаотические системы связи, в которых происходит синхронизация между хаотическими осцилляторами, называются когерентными. В таких системах могут использоваться несколько возможных типов синхронизации [31, 90, 91]:

1. Полная синхронизация (англ. complete/identical synchronization). Тип синхронизации, при котором подразумевается полная математическая идентичность осцилляторов на стороне приемника и передатчика. Полная синхронизация наступает в момент, когда все переменные состояния приемника и передатчика полностью совпадают. Является частным случаем обобщенной синхронизации [92].

2. Обобщенная синхронизация (англ. generalized synchronization). В случае обобщенной синхронизации, траектория осцилляторов на стороне приемника сходится к траектории на стороне передатчика как взаимно однозначное отображение. При этом, осцилляторы на стороне приемника и передатчика могут отличаться [93].

3. Проективная синхронизация (англ. projective synchronization) – это частный случай обобщенной синхронизации, при которой взаимно однозначное отображение является линейной функцией [94].

4. Фазовая синхронизация (англ. phase synchronization) – это тип синхронизации, при котором связанные хаотические осцилляторы сохраняют ограниченную разность фаз [95], в то время как их амплитуды остаются некоррелированными [96, 97, 98].

5. Запаздывающая синхронизация (англ. lag synchronization) – появляется в том случае, когда ведомая система совпадает с динамикой с задержкой по времени относительно ведущей системы [99].

6. Импульсная синхронизация (англ. impulse synchronization). В этом случае управляющий сигнал от ведущей системы передается не постоянно, а в виде импульсов, определяемых фиксированным или изменяющимся во времени интервалом [100].

7. Адаптивная синхронизация (англ. adaptive synchronization) – включает отдельный класс методов для синхронизации ведущей и ведомой систем путем адаптивного управления параметрами синхронизации [85, 101, 102].

Стоит отметить, что в случае создания реальных физических систем, использующих хаотические сигналы, синхронизация на стороне приемника недостижима из-за наличия шумов в канале связи, а также из-за ограничения в разрядности АЦП и ЦАП. Поэтому, наиболее подходящим видом синхронизации в случае когерентных хаотических систем связи можно считать обобщенную синхронизацию. При реализации обобщенной синхронизации и наличии одного осциллятора на стороне приемника, проектировщик может выбрать определенный уровень ошибки синхронизации, при достижении которого в определенный момент времени можно сделать выбор о передаче конкретного символа. Также, при обобщенной синхронизации на стороне приемника может присутствовать несколько хаотических систем, каждая из которых соответствует передаваемому символу. Анализируя ошибку синхронизации на каждой из этих систем используя

дисперсию, среднее значение и т.д. и сравнивая эти значения между собой можно обнаружить факт передачи соответствующего символа.

2.3 Оптимизация параметров синхронизации дискретных хаотических систем, полученных полуявными численными методами интегрирования

В настоящей диссертационной работе применен классический подход Пекоры-Кэролла к синхронизации двух динамических дискретных систем, полученных полуявными численными методами интегрирования, модифицированный с учетом возможности управления симметрией конечно-разностной схемы как ведущей, так и ведомой системы.

2.3.1 Процедура оптимизации параметров синхронизации

Для достижения требуемых характеристик ХСС при минимальном влиянии ошибок округления и шума на генерируемый сигнал, необходимо выбрать оптимальный коэффициент синхронизации, т.е. такой, при котором скорость синхронизации (сходимости решений ведущей и ведомой системы) будет максимальной. При максимальной скорости синхронизации обеспечивается наибольшая пропускная способность канала, т.к. возможно увеличение количества бит информации, передаваемого за единицу времени.

Рассмотрим алгоритм расчёта оптимальных коэффициентов синхронизации.

1. Генерируется два набора различных начальных условий для ведущей и ведомой систем. Выбираются две пары начальных условий, для которых по истечении некоторого времени завершится переходный процесс. Чтобы получить все точки искомым наборов для обеих систем, время моделирования переходного процесса итеративно увеличивается с шагом 0.5 сек. Таким образом, перебирается достаточное для нахождения оптимальных параметров синхронизации количество

точек на хаотическом аттракторе. Для более детальной и точной оценки можно рассмотреть более широкий диапазон начальных условий с меньшим шагом времени моделирования. Оценочный рекомендуемый размер каждого рассматриваемого набора – не менее 200 пар [75].

2. Выбираются исследуемые наборы управляющих параметров – коэффициенты симметрии или бифуркационные параметры, а также параметр синхронизации.

3. Оценивается среднее, минимальное и максимальное время синхронизации для всех пар коэффициентов симметрии или бифуркационных параметров и синхронизации. Расчетные метрики определяются для сгенерированных наборов начальных условий. В экспериментальных исследованиях факт достижения синхронизации достигается тогда, когда разница между переменными состояниями меньше ε [103]:

$$e_n = |x_n - p_n| < \varepsilon \quad (2.13)$$

Максимальное время синхронизации отражает наихудший случай, когда траектории синхронизированных систем имеют наибольшее расхождение. Минимальное время синхронизации указывает на наиболее подходящие начальные условия для синхронизации осцилляторов. В качестве оптимальных значений параметров рассматривались пары коэффициента синхронизации и коэффициента симметрии, для которых среднее время синхронизации близко к максимальному и среднему значениям [75].

Также необходимо исследовать параметры синхронизации в условиях повышенной зашумленности канала связи. Допускается, что при фиксированной длине передаваемого символа разные коэффициенты синхронизации могут приводить к разному числу битовых ошибок (BER). Для исследования параметров синхронизации в условиях шума в канале связи можно дополнить описанный выше алгоритм следующим образом: после определения оптимального времени передачи

одного символа, можно исследовать тестируемую ХСС при различных значениях коэффициентов синхронизации с различными значениями уровня сигнал/шум и рассчитывать при этом число битовых ошибок [131].

2.4 Способ модуляции хаотических сигналов на основе управления коэффициентом симметрии

Рассмотрим новый способ модуляции хаотических сигналов, основанный на управлении симметрией дискретных отображений генераторов хаотических сигналов [82, 120]. На рисунке 2.10 показана обобщенная структура хаотической системы связи, использующей данный способ модуляции. Можно видеть, что предлагаемая структура ХСС схожа со схемой, использующей модуляцию по параметру бифуркации. Главное отличие предлагаемого способа модуляции состоит в том, что в качестве модулируемого параметра выступает не управляющий параметр хаотической системы, а коэффициент симметрии в дискретной модели генератора хаотических колебаний. Теоретические оценки, сделанные в предыдущих разделах диссертации, позволяют предположить, что такой способ модуляции позволит повысить скрытность и расширить пространство параметров (ключей) при передаче информации, сохраняя при этом высокую степень адекватности дискретной модели генератора хаотических колебаний непрерывному прототипу.

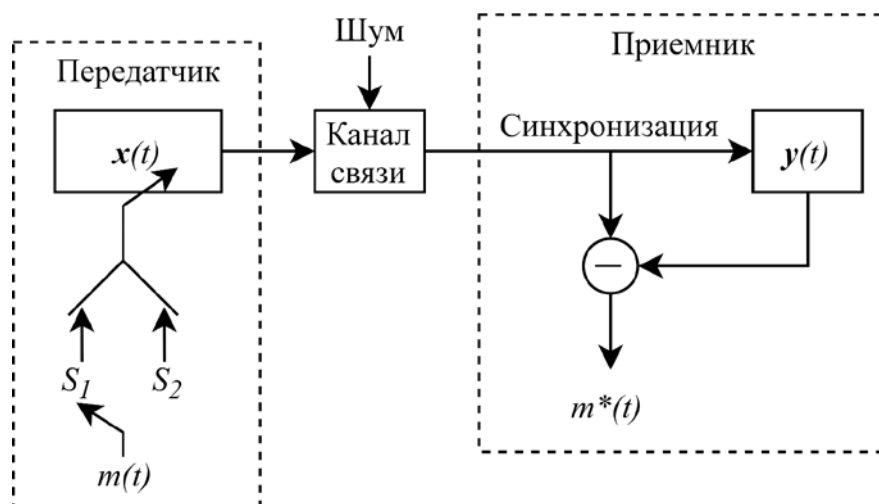


Рисунок 2.10 – Схема ХСС на основе модуляции коэффициента симметрии

Для получения отображений с разными коэффициентами симметрии в настоящей главе используется полуявный композиционный метод интегрирования с управляемой симметрией, описанный в разделе 2.1.3.

2.5 Синтез конечно-разностных схем генераторов хаотических сигналов

Для исследования предлагаемого способа в диссертации разработан набор генераторов хаотических сигналов на основе дискретных моделей консервативных и диссипативных систем с управляемой симметрией. Модели исследованы в виртуальной модели ХСС в условиях различного уровня зашумления канала связи. В качестве математической основы генераторов были выбраны две тестовые хаотические системы: консервативная система Носе-Гувера и диссипативная система Рёсслера [82]. Оба осциллятора относятся к классическим задачам нелинейной динамики и описываются системами ОДУ третьего порядка. Для реализации генераторов хаоса на дискретной ЭВМ перейдем от непрерывных дифференциальных уравнений к конечно-разностным схемам так, как показано далее.

2.5.1 Дискретные модели генераторов хаоса на основе диссипативной хаотической системы

Рассмотрим непрерывную хаотическую систему Рёсслера [82], которая описывается следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -y - z; \\ \dot{y} &= x + a \cdot y; \\ \dot{z} &= b + z \cdot (x - c); \end{aligned} \quad (2.14)$$

где $a = 0.2$, $b = 0.2$ и $c = 5.7$ – стандартный набор параметров, при котором система уравнений (2.14) демонстрирует хаотическое поведение.

Синтезируем дискретную математическую модель системы Рёсслера, применив метод КДПС к уравнению (2.14):

$$\begin{aligned}x_{n+s} &= x_n + h_1 \cdot (-y_n - z_n); \\ y_{n+s} &= y_n + h_1 \cdot (x_{n+s} + a \cdot y_{n+s}); \\ z_{n+s} &= z_n + h_1 \cdot (b + z_{n+s} \cdot (x_{n+s} - c)); \\ z_{n+1} &= z_{n+s} + h_2 \cdot (b + z_{n+s} \cdot (x_{n+s} - c)); \\ y_{n+1} &= y_{n+s} + h_2 \cdot (x_{n+s} + a \cdot y_{n+s}); \\ x_{n+1} &= x_{n+s} + h_2 \cdot (-y_{n+1} - z_{n+1}); \end{aligned} \quad (2.15)$$

Разрешим диагональную неявность аналитически:

$$\begin{aligned}x_{n+s} &= x_n + h_1 \cdot (-y_n - z_n); \\ y_{n+s} &= (y_n + h_1 \cdot x_{n+s}) \cdot (1 - a \cdot h_1)^{-1}; \\ z_{n+s} &= (z_n + h_1 \cdot b) \cdot (1 - h_1 \cdot (x_{n+s} - c))^{-1}; \\ z_{n+1} &= z_{n+s} + h_2 \cdot (b + z_{n+s} \cdot (x_{n+s} - c)); \\ y_{n+1} &= y_{n+s} + h_2 \cdot (x_{n+s} + a \cdot y_{n+s}); \\ x_{n+1} &= x_{n+s} + h_2 \cdot (-y_{n+1} - z_{n+1}); \end{aligned} \quad (2.16)$$

Тогда конечно-разностная модель ведомой системы выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}
x_{n+s} &= x_n + h_1 \cdot (-y_n - z_n + k \cdot (w_n - x_n)); \\
y_{n+s} &= y_n + h_1 \cdot (x_{n+s} + a \cdot y_{n+s}); \\
z_{n+s} &= z_n + h_1 \cdot (b + z_{n+s} \cdot (x_{n+s} - c)); \\
z_{n+1} &= z_{n+s} + h_2 \cdot (b + z_{n+s} \cdot (x_{n+s} - c)); \\
y_{n+1} &= y_{n+s} + h_2 \cdot (x_{n+s} + a \cdot y_{n+s}); \\
x_{n+1} &= x_{n+s} + h_2 \cdot (-y_{n+1} - z_{n+1} + k \cdot (w_n - x_n));
\end{aligned} \tag{2.17}$$

Запишем модель ведомой системы с разрешенной неявностью аналогично (2.15):

$$\begin{aligned}
x_{n+s} &= x_n + h_1 \cdot (-y_n - z_n + k \cdot (w_n - x_n)); \\
y_{n+s} &= (y_n + h_1 \cdot x_{n+s}) \cdot (1 - a \cdot h_1)^{-1}; \\
z_{n+s} &= (z_n + h_1 \cdot b) \cdot (1 - h_1 \cdot (x_{n+s} - c))^{-1}; \\
z_{n+1} &= z_{n+s} + h_2 \cdot (b + z_{n+s} \cdot (x_{n+s} - c)); \\
y_{n+1} &= y_{n+s} + h_2 \cdot (x_{n+s} + a \cdot y_{n+s}); \\
x_{n+1} &= x_{n+s} + h_2 \cdot (-y_{n+1} - z_{n+1} + k \cdot (w_n - x_n));
\end{aligned} \tag{2.18}$$

Таким образом, синтезированы две новые конечно-разностные модели генераторов хаотических колебаний, которые будут выступать в роли приемника и передатчика в проектируемой ХСС.

2.5.2 Дискретные модели генераторов хаотических колебаний на основе консервативных хаотических систем

Рассмотрим модель ХСС, реализующую принцип “ведущий-ведомый” в синхронизации по методу Пекоры-Кэрролла, и использующую генераторы хаотических колебаний на основе консервативной системы Носе-Гувера. Хаотическая система Носе-Гувера задается следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= y \\
\dot{y} &= -x + ayz \\
\dot{z} &= 1 - by^2
\end{aligned} \tag{2.19}$$

где a и b – параметры системы. Система демонстрирует хаотическое поведение при $a = 1$, $b = 10$. Дискретная модель системы Носе-Гувера, полученная с помощью метода КДПС, записывается следующим образом:

$$\begin{aligned}
x_{n+s} &= x_n + h_1 y_n \\
y_{n+s} &= y_n + h_1 (-x_{n+s} + ay_{n+s} z_n) \\
z_{n+s} &= z_n + h_1 (1 - by_{n+s}^2) \\
z_{n+1} &= z_{n+s} + h_2 (1 - by_{n+s}^2) \\
y_{n+1} &= y_{n+s} + h_2 (-x_{n+s} + ay_{n+s} z_{n+1}) \\
x_{n+1} &= x_{n+s} + h_2 y_n
\end{aligned} \tag{2.20}$$

где $h_1 = hs$ и $h_2 = h(1 - s)$. Неявность в данной конечно-разностной схеме может быть разрешена аналитически:

$$\begin{aligned}
x_{n+s} &= x_n + h_1 y_n \\
y_{n+s} &= (y_n + h_1 x_{n+s}) (1 - h_1 a z_n)^{-1} \\
z_{n+s} &= z_n + h_1 (1 - by_{n+s}^2) \\
z_{n+1} &= z_{n+s} + h_2 (1 - by_{n+s}^2) \\
y_{n+1} &= y_{n+s} + h_2 (-x_{n+s} + ay_{n+s} z_{n+1}) \\
x_{n+1} &= x_{n+s} + h_2 y_n
\end{aligned} \tag{2.21}$$

Конечно-разностная модель ведомого генератора выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}
x_{n+s} &= x_n + h_1 y_n \\
y_{n+s} &= (y_n + h_1(x_{n+s} + k(w_n - y_n)))(1 - h_1 a z_n)^{-1} \\
z_{n+s} &= z_n + h_1(1 - b y_{n+s}^2) \\
z_{n+1} &= z_{n+s} + h_2(1 - b y_{n+s}^2) \\
y_{n+1} &= y_{n+s} + h_2(-x_{n+s} + a y_{n+s} z_{n+1} + k(w_n - y_n)) \\
x_{n+1} &= x_{n+s} + h_2 y_n
\end{aligned} \tag{2.22}$$

где k – коэффициент синхронизации, а w_n – входной сигнал от ведущей системы.

С практической точки зрения, не всегда целесообразно достигать наименьшего значения ошибки синхронизации. Достаточно чтобы ошибка синхронизации одного из приемников, ответственных за символ, связанный с определенным значением S , упала ниже заданного обнаруживаемого значения Δx_0 , например, $\Delta x_0 = 10^{-6}$. Второе практическое соображение заключается в том, что для случая плотного заполнения канала представляет интерес выбор минимально возможной разницы Δ между значениями коэффициентов симметрии, связанных с символами: $\Delta S = S_i - S_j \rightarrow 0$. Дополнительным преимуществом такого подхода является то, что расхождение траекторий ведущей и ведомой систем с незначительно отличающимися значениями коэффициентов симметрии несущественно, и при передаче определенного символа ошибка уменьшается ниже заданного порога $\Delta = x_{master} - x_{slave}$.

2.6 Выводы по главе

В главе описаны полуявные численные методы интегрирования с управляемой симметрией и способ синтеза конечно-разностных моделей генераторов хаотических сигналов на их основе. Теоретически обоснована возможность модуляции хаотических сигналов с помощью управления устойчивостью конечно-разностной схемы через изменение симметрии численного

метода интегрирования. Получены математические модели передатчиков и приемников хаотических сигналов с различными типами модуляции в форме конечно-разностных схем. Показано, что предлагаемые модели генераторов хаотических сигналов обладают наилучшей адекватностью непрерывным прототипам, наиболее достоверно воспроизводя динамические режимы исходной системы в цифровой модели. Продемонстрировано, что предлагаемые математические модели генераторов хаотических сигналов лучше известных сохраняют заданный режим колебаний при долгосрочном моделировании. Описаны основные способы синхронизации хаотических систем, предложена методика оптимизации синхронизированных структур хаотических осцилляторов с точки зрения минимизации скорости синхронизации. Рассмотрены процедуры синтеза конечно-разностных моделей приемника и передатчика в модели ХСС на примере диссипативной и консервативной системы. В качестве диссипативной системы в работе был выбран классический осциллятор Рёсслера, в качестве консервативной – осциллятор Носе-Гувера. Отметим, что изучение консервативных хаотических систем с управляемой симметрией как источников хаотического сигнала представляет собой особый интерес. Это связано с тем, что управление симметрией в дискретных моделях консервативных и диссипативных систем имеет различную природу – в диссипативных системах с изменением симметрии меняется устойчивость конечно-разностной схемы, а в консервативных – мера диссипации системы. В главе заложены теоретические основы построения генераторов хаотических сигналов с управляемой симметрией конечно-разностной схемы.

3 КОМПЛЕКС ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ХАОТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В данной главе рассматриваются разработанные в ходе диссертационного исследования компьютерные модели генераторов хаотических колебаний и элементы программного обеспечения для моделирования и анализа свойств хаотических систем.

Для практической проверки теоретических положений диссертационной работы был создан экспериментальный стенд быстрого прототипирования ХСС [130]. Экспериментальный стенд состоит из двух частей – виртуального стенда в форме программного обеспечения, реализованного в среде разработки виртуальных приборов NI LabVIEW, и аппаратных средств на основе модулей быстрого прототипирования NI MyRIO. Этапы проектирования, которые могут быть реализованы с помощью разработанных в диссертации видов обеспечения, представлены на рисунке 3.1.

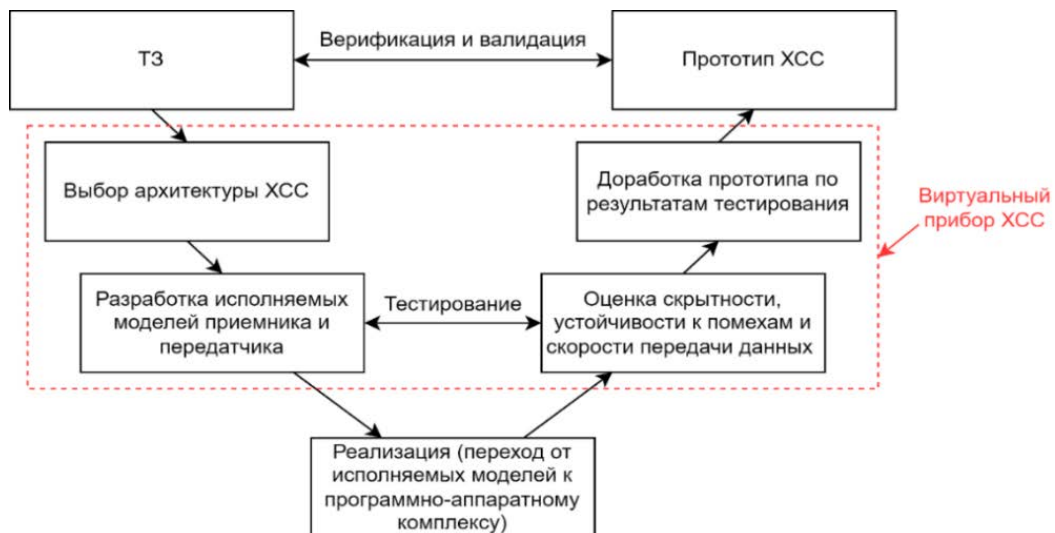


Рисунок 3.1 – Процесс модель-ориентированного проектирования ХСС. Рамкой выделены этапы, которые реализуются с помощью разработанного методического и программного обеспечения

Как видно из рисунка выше, разработанное программное и методическое обеспечения охватывает все основные этапы моделирования и проектирования

хаотических систем связи. Более подробное описание каждого из составных компонентов разработанного ПО описано в последующих разделах.

3.1 Имитационная модель хаотической системы связи

Лицевая панель виртуального экспериментального стенда, имитирующего приемник, передатчик и канал передачи сигнала с возможностью внесения помех различных типов, включая шумы различного цвета, гармонические и хаотические помехи представлена на рисунке 3.2. Графический код программы приведен на рисунке 3.3.

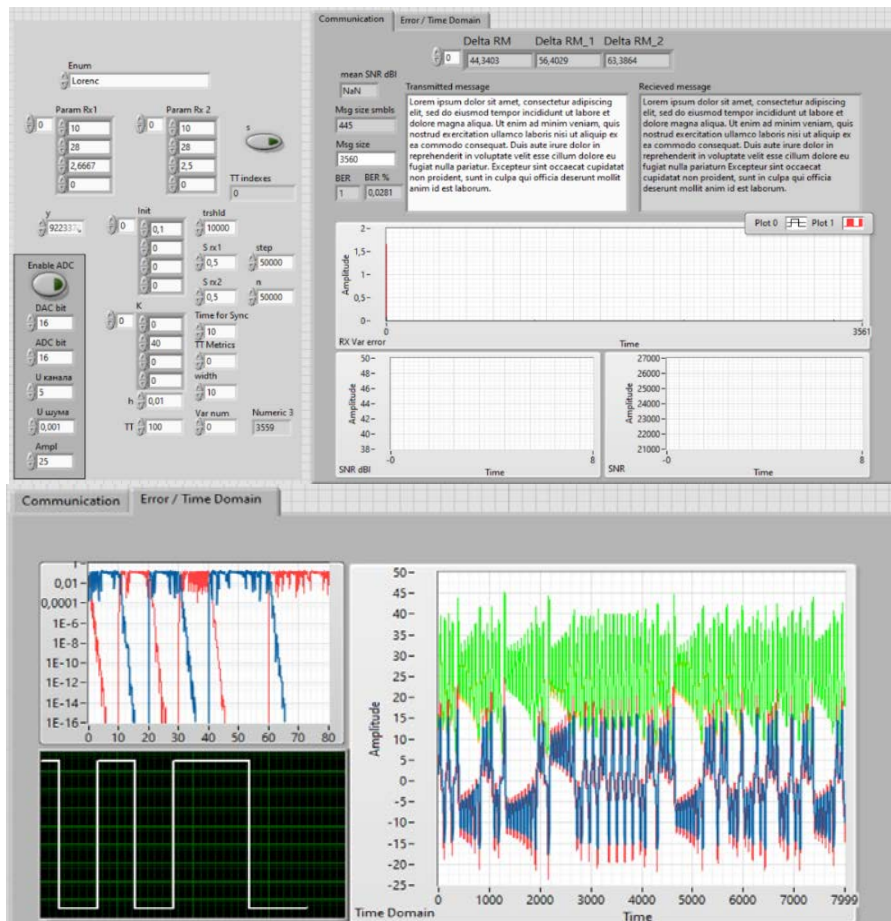


Рисунок 3.2 – Виртуальный прибор (ВП) моделирования хаотических систем СВЯЗИ

Разработанный виртуальный стенд является частью инструментария моделирования защищенных систем связи на основе хаотических сигналов и позволяет оценить различимость сигналов при модуляции, устойчивость к шуму в канале связи, скорость передачи данных и др.

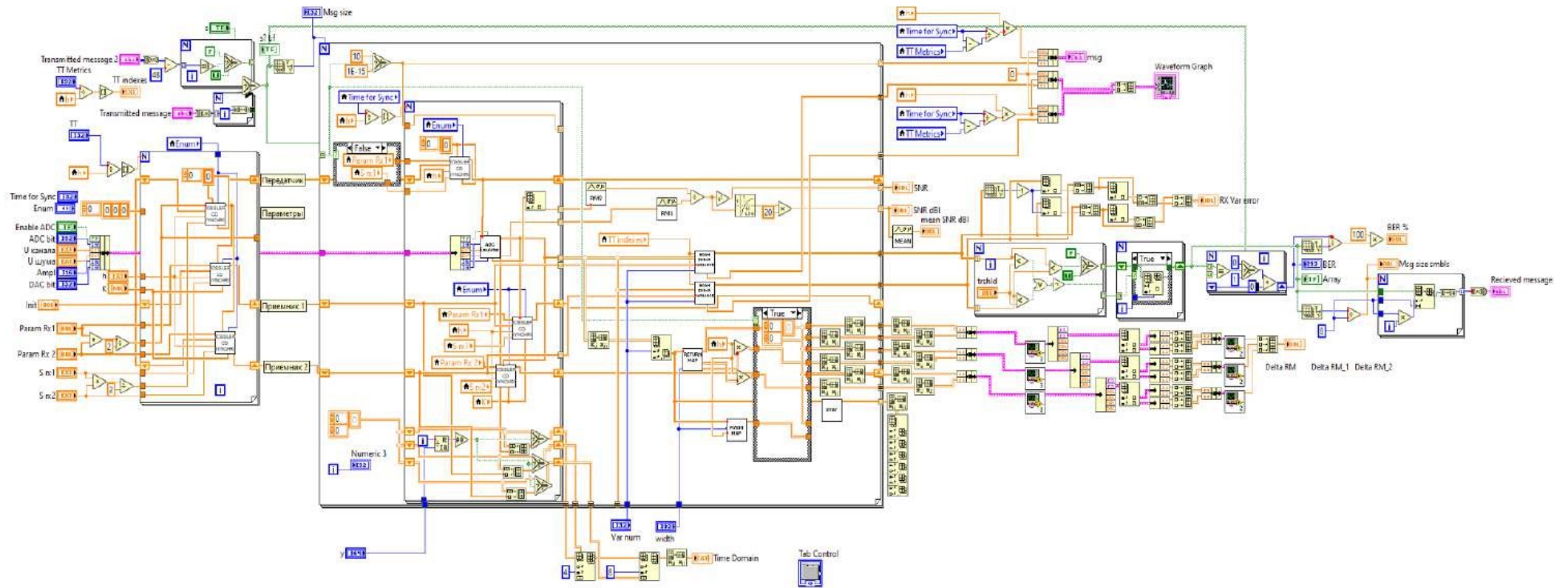


Рисунок 3.3 – Графический код ВП ХСС

За моделирование виртуального канала связи отвечает отдельный подприбор (процедура) программного комплекса. Блок-диаграмма, графический код и виртуальная панель подприбора, имитирующего канал связи, представлены на рисунке 3.4. В разработанном подприборе производится управляемое пользователем масштабирование и квантование сигнала осциллятора, что обеспечивает возможность тестировать ХСС с различной разрядностью ЦАП и АЦП. Также в канале связи имитируется аддитивный шум различного типа.

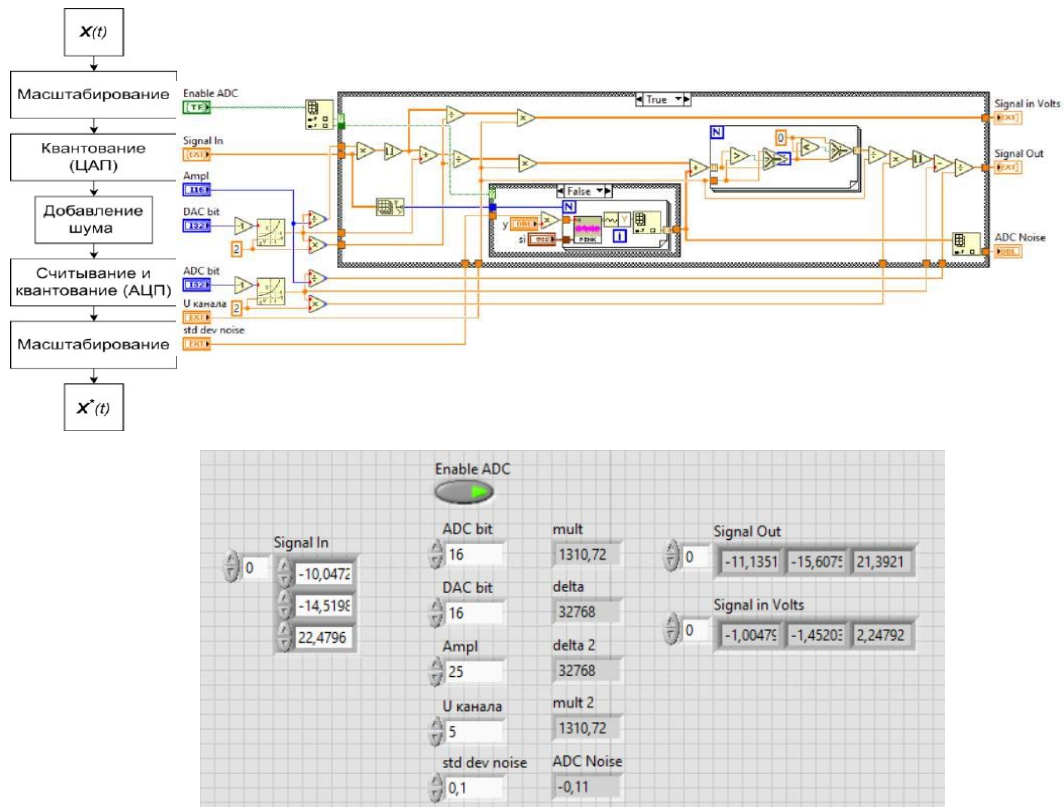


Рисунок 3.4 – Блок-диаграмма, графический код и виртуальная панель подприбора, имитирующего канал связи

В подприборе, имитирующем канал связи, присутствует блок для добавления аддитивных шумов различного типа: гауссовский белый шум, розовый шум, помеха в форме выходного сигнала такой же хаотической системы, но с другими бифуркационными параметрами, зашумление другой хаотической системой. Графический код подприбора для генерации шумов представлен на рисунке 3.5.

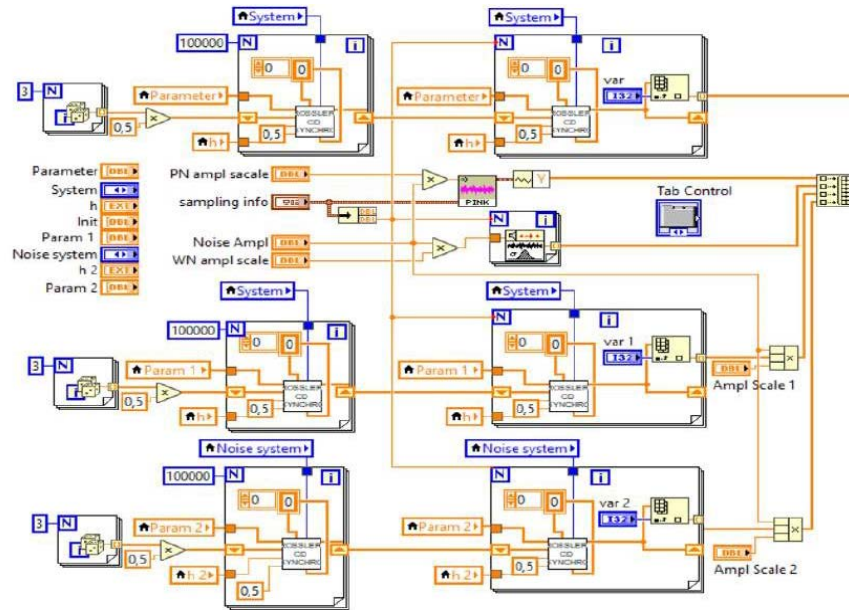


Рисунок 3.5 – Графический код генераторов шума различного типа

3.2 Оптимизации параметров синхронизации для задач хаотических систем связи

Одной из задач диссертационного исследования является оптимизация параметров синхронизации дискретных моделей генераторов хаотических колебаний, полученных полужавными методами численного интегрирования, с целью достижения потенциально наибольшей скорости передачи символов при наименьшей чувствительности к шуму в канале связи. В диссертационной работе для решения данной задачи предложен виртуальный прибор, показанный на рисунке 3.6.

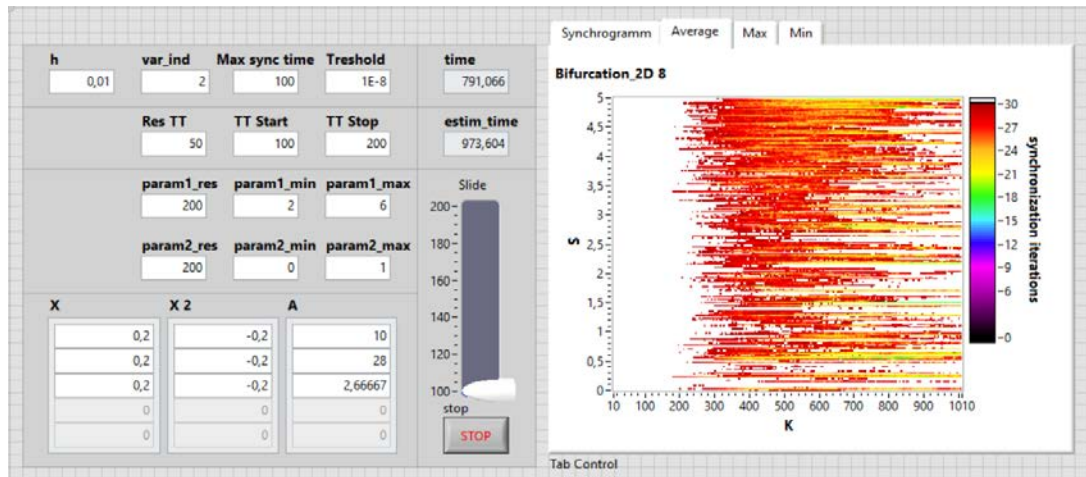


Рисунок 3.6 – Фронтальная панель виртуального прибора для определения оптимальных параметров синхронизации

Входные параметры данного виртуального прибора включают в себя: время моделирования (включая время переходного процесса), диапазон исследуемых параметров, разрешение диаграммы, настройка параметров исследуемого осциллятора. Результатом работы виртуального прибора является набор диаграмм, иллюстрирующих среднее, максимальное и минимальное время синхронизации в соответствии с заданными диапазонами исследуемых параметров. Для наглядности разные значения времени синхронизации отмечены разными цветами спектра. Максимальное и минимальное время синхронизации отмечается красным и фиолетовым соответственно. Белым цветом выделены области, в которых синхронизация не была достигнута за соответствующее значение максимально-допустимого времени синхронизации для соответствующей пары коэффициентов симметрии и синхронизации. Черный цвет означает время синхронизации менее 1 секунды. Данный подприбор помогает проектировщику определить параметры системы, при которых достигается наибольшая скорость синхронизации.

3.3 Виртуальный прибор для оценки потенциальной скорости передачи данных

Важным свойством ХСС является потенциальная скорость передачи данных. Скорость передачи данных в ХСС, использующей генераторы хаотических колебаний с управляемой симметрией, напрямую зависит от следующих параметров: разброс значений коэффициента симметрии и пороговое значение ошибки синхронизации. Входными параметрами виртуального прибора для оценки потенциальной скорости передачи данных являются: диапазон значений разброса коэффициентов симметрии, разрешение диаграммы, набор пороговых значений ошибки синхронизации. На выходе получаем диаграмму, на основе которой можно определить время синхронизации до заданного порогового значения ошибки синхронизации при различных значениях коэффициента симметрии. На основе этих значений времени синхронизации можно фиксировать время передачи символа что напрямую влияет на скорость передачи данных.

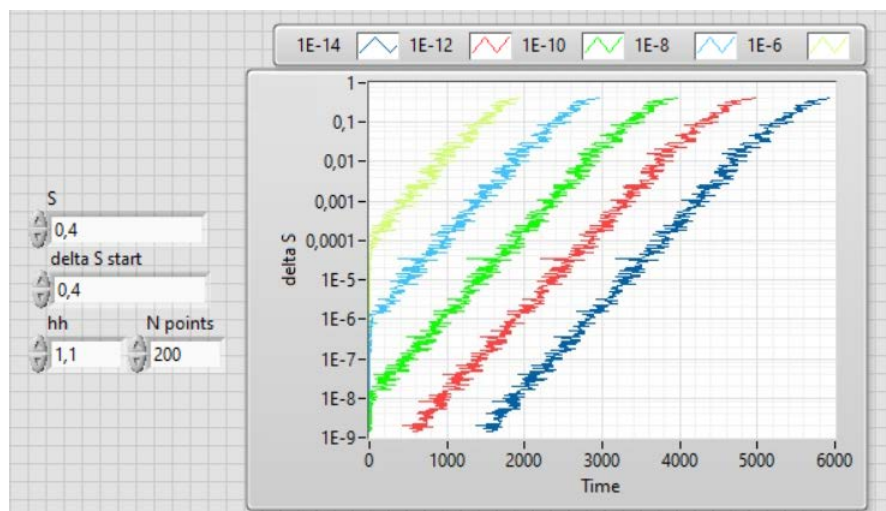


Рисунок 3.7 – Лицевая панель виртуального прибора для оценки плотности упаковки данных

3.4 Сохранение хаотического режима колебаний при изменении симметрии в дискретных моделях, полученных полуживыми численными методами

Одним из интересных свойств дискретных отображений с управляемой симметрией является возможность сохранения хаотического режима колебаний при достаточно существенных изменениях значения коэффициента симметрии. Это выгодно отличает способ модуляции на основе управления симметрией от параметрической модуляции, где малые изменения параметра часто приводят к смене динамических режимов. Использование этой особенности потенциально может обеспечить более скрытную передачу сообщений, что в итоге приведет к улучшению свойств проектируемой ХСС. Одним из способов проверки данного предположения является бифуркационный анализ дискретной системы [126].

Концепция бифуркационной диаграммы включает несколько способов нанесения фазовой переменной на одну ось и параметра на другую. Один из самых простых способов построить бифуркационную диаграмму с использованием массива значений переменной состояния системы – использовать пиковый детектор [104, 105].

Другим инструментом оценки устойчивости режима колебаний системы выступает бифуркационная спектрограмма, представляющая собой гибрид оконного преобразования Фурье и бифуркационной диаграммы.

Бифуркационная спектрограмма рассчитывается с использованием оконного преобразования Фурье. Сигнал $s(t)$, в роли которого выступает массив значений переменной состояния системы, делится на перекрывающиеся фрагменты. Затем к сигналу применяется преобразование Фурье для вычисления спектральной плотности мощности P для каждой части:

$$\begin{aligned} S(t) &= FFT(s(t)), \\ P &= 20 \log_{20}(|S(t)|^2) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Полученные спектры наносятся на один график в виде вертикальной линии, соответствующей текущему значению параметра. В отличие от широко известной

временной спектрограммы, в качестве параметра бифуркационной спектрограммы выступает не время, а текущее значение выбранного параметра системы, такого как бифуркационный параметр или коэффициент симметрии.

Вышеупомянутые методы анализа позволяют исследовать разрабатываемые системы хаотической связи с точки зрения одного из основных недостатков ХСС с переключением параметра - обнаруживаемости факта переключения режимов осцилляций. В случае традиционного способа модуляции хаотического сигнала на основе переключения параметров, передача сообщения может быть обнаружена перехватчиком при анализе спектрограммы сигнала. Как показано на рисунке 3.8, способ модуляции, основанный на переключении коэффициента симметрии, незначительно влияет на поведение системы и обладает меньшей обнаруживаемостью.

Таким образом, предлагаемый способ модуляции на основе управления симметрией конечно-разностной схемы обеспечивает достижение лучших характеристик при разработке защищенных систем связи.

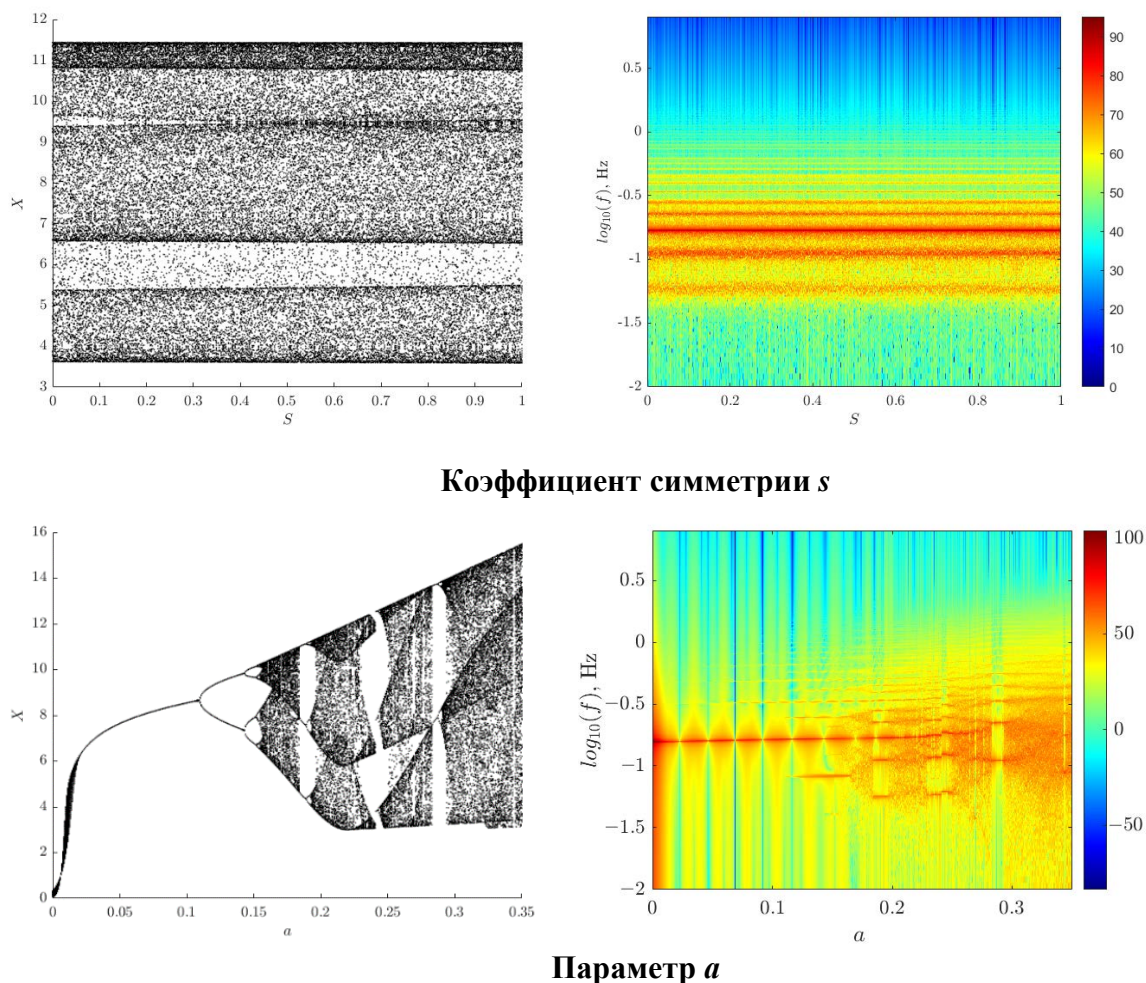


Рисунок 3.8 – Бифуркационные диаграммы и бифуркационные спектрограммы, построенные для системы Рёсслера при изменении коэффициента симметрии и параметра бифуркации a

3.5 Алгоритмы оценки различимости сигналов при модуляции для хаотических систем связи

Несмотря на то, что хаотические сигналы обладают свойствами, которые можно использовать для криптографических приложений, простого применения динамического хаоса недостаточно для реализации защищенных систем связи. У любого сигнала, несущего в себе скрытую полезную информацию, который поступает в канал связи, есть шанс быть перехваченным злоумышленниками. Следовательно, даже если злоумышленники не знают тип или параметры

используемых в системе связи хаотических систем, они могут выполнить обработку и анализ перехваченного сигнала или применить более сложные алгоритмы реконструкции фазового пространства, чтобы получить след сообщения из сигнала передатчика. В случае хаотического маскирования, сигнал напрямую добавляется к хаотическому сигналу, поэтому изменение может быть обнаружено методами нелинейного динамического прогнозирования, или, если амплитуда/частота значительно отличается от основного спектра частот несущего, то можно использовать спектральный анализ мощности сигнала для обнаружения факта передачи [106, 107]. В системах с модуляцией на основе переключения хаотических несущих в случае передачи двоичного сигнала, переключение между «0» или «1» привносит некоторые распознаваемые паттерны в динамику передаваемого сигнала. Следовательно, задача классификации таких паттернов может быть использована для обнаружения двоичного сообщения, не имея какие-либо сведения о передатчике [82]. Таким образом, передача сообщения должна происходить так, чтобы в передаваемом сигнале не было заметных паттернов или информации о сигнале сообщения.

Разработанный к настоящему времени инструментарий анализа хаотических систем и нелинейной динамики не позволяет решать весь спектр задач проектирования ХСС. В связи с этим, одним из направлений диссертационного исследования является создание новых методов анализа и способов количественной оценки свойств хаотических систем и сигналов.

3.5.1 Методы спектрального анализа

Одними из наиболее распространенных способов оценки свойств генераторов хаотических сигналов являются методы спектрального анализа, использующие в том или ином виде преобразование Фурье. Например, в работе И. Джуровича и др. [106] пороговый детектор на основе оконного преобразования Фурье используется для поиска хаотических режимов в генераторе Колпица и

логистическом отображении. Нелинейные системы и сигналы, как правило, характеризуются переменным спектром, и для визуализации изменения спектра во времени используется трёхмерный график - спектрограмма, которая также строится с применением оконного преобразования Фурье [107]. Пример спектрограммы хаотического сигнала с передачей сообщения показан на рисунке 3.9.

Для анализа нестационарных сигналов в частотной и псевдо-частотной областях также используются такие методы, как спектральный эксцентриситет (куртозис), вейвлет-анализ, разложение на эмпирические моды. В научной литературе по нелинейной динамике предпочтение отдаётся методам последней группы. На взгляд автора работы, методы спектрального анализа часто недооценивают при исследовании хаотических систем

В частности, при оценке свойств генераторов хаотических сигналов в структуре ХСС могут быть эффективны методы на основе Фурье-анализа. Так, в работе [82] показано, что спектральный анализ пригоден для обнаружения факта стеганографической передачи данных в прямохаотических системах связи, основанных на модуляции параметра бифуркации. Кроме того, это исследование выявило что модуляция коэффициента симметрии конечно-разностной схемы генератора не приносит заметного изменения в спектр сигнала, что свидетельствует о потенциально большей безопасности такого способа передачи данных. Другим возможным применением Фурье-анализа является поиск мультистабильных состояний и переходного хаоса в динамических системах [104].

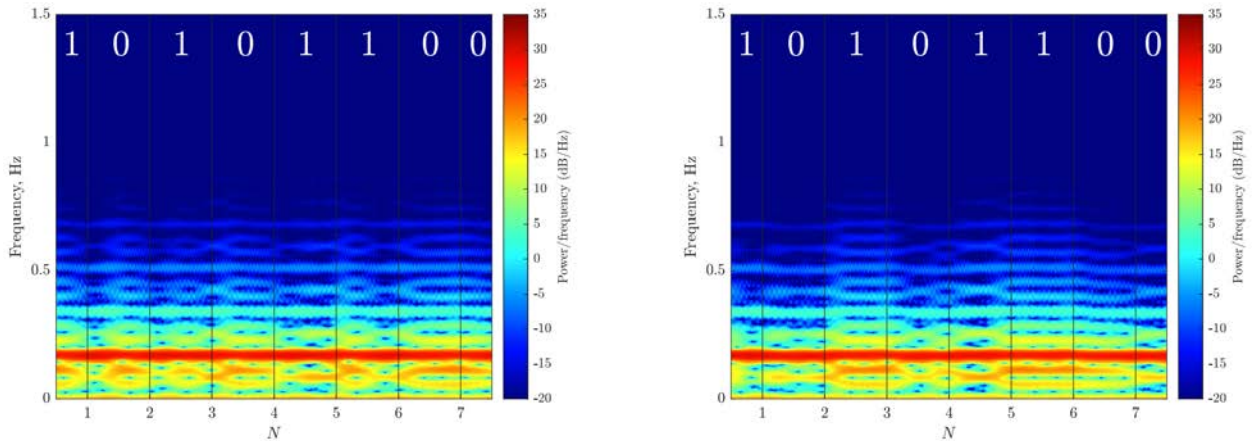


Рисунок 3.9 – Спектрограмма сигнала с передачей сообщения с использованием модуляции на основе управляемой симметрии (слева) и на основе модуляции параметра (справа) [102]

Чаще всего для атаки на хаотические системы связи с использованием спектрального анализа сигнал в канале связи предварительно фильтруют. Фильтрация позволяет получить более контрастные изображения, удобные для визуального анализа, и упрощает процедуры автоматизированного анализа с использованием различных количественных характеристик, например, энергии сигнала на заданной полосе частот [108].

3.5.2 Методы рекуррентного анализа

Рекуррентный количественный анализ (англ. RQA) - вид анализа нелинейных систем, хорошо зарекомендовавший себя при выявлении аperiodического поведения в сигналах естественного происхождения. Между тем, его возможности не ограничиваются указанным классом задач, и в последние годы усилия исследователей направлены на адаптацию RQA для решения других проблем в области обработки сигналов. Идея рекуррентного анализа заключается в визуализации повторяющихся состояний системы в m -мерном фазовом пространстве в заданной окрестности [109]. В случае одномерного сигнала фазовое пространство системы искусственно реконструируется, например, временным

сдвигом. Повторение состояния системы, существовавшего в момент времени i , в другой момент времени j отмечается в бинарной матрице, в которой единица (черная точка) соответствует факту повторения состояния, а оси координат являются осями времени. Решение хаотической системы ОДУ не может повторяться полностью, поэтому рекуррентными считаются состояния, попадающие в m -мерную окрестность с заданным радиусом и центром i .

$$r_{i,j} = \theta(\varepsilon - \|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\|), \quad x_i \in \mathfrak{R}^m, \quad i, j \in [1; N], \quad (3.2)$$

где θ — ступенчатая функция Хевисайда, N — длина сигнала и $\|\cdot\|$ обозначает евклидово расстояние.

На практике анализ часто начинают с расчета матрицы расстояний следующего вида:

$$d_{i,j} = \|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\|, \quad i, j \in [1; N], \quad (3.3)$$

Матрица расстояний может быть представлена в псевдоцветах. На ее основе путем применения определенного порогового значения, строится бинарная матрица. Для анализа матрицы расстояний и бинарной матрицы могут использоваться как простые числовые метрики, например, количество одиночных вертикальных или горизонтальных линий, так и более сложные методы и алгоритмы, основанные на применении искусственных нейронных сетей [110, 111].

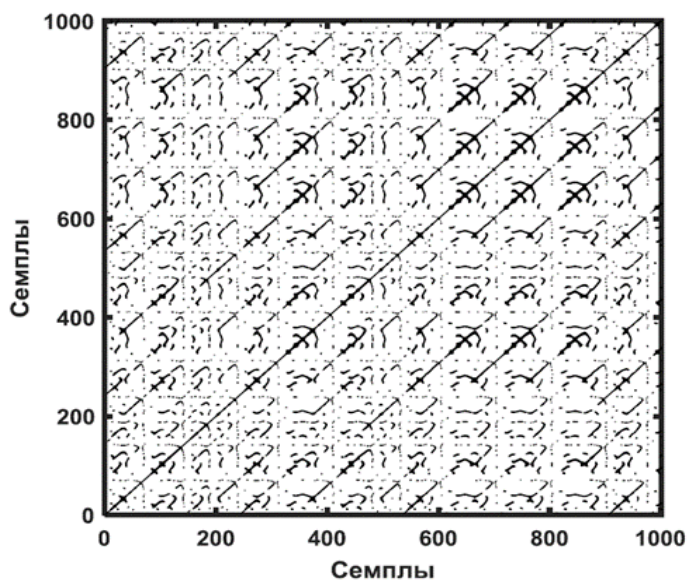


Рисунок 3.10 – Рекуррентная диаграмма системы Sprott Case N [117]

Предположим, что длина символа известна или может быть установлена итерационным методом в случае, если метод взлома достаточно чувствителен, чтобы отличить символ 0 от 1. Перехваченная форма волны делится на сегменты в соответствии с предполагаемым числом символов. Для каждого сегмента («окна») вычисляется матрица расстояний (график рекуррентности псевдоцвета). Затем, используя выбранное пороговое значение, матрица расстояний d преобразуется в двоичную рекуррентную матрицу r . Далее рассчитывается значение частоты повторений (англ. Recurrence Rate), энтропия и время захвата (англ. Trapping Time).

3.5.3 Метод численных возвратных преобразований

Существенную информацию из хаотических сигналов можно получить, если проанализировать локальные максимумы во временной области, в частности, их распределение по амплитуде и фазе. Возвратное преобразование (англ. Return Map, RM) – разновидность такого вида анализа, нашедшая широкое применение в качестве способа атаки на хаотические системы связи. Впервые данный метод был описан в работах [41, 112]. Суть RM-анализа состоит в нахождении разности, а также среднего значения локальных экстремумов сигнала:

$$A_m = \frac{X_m + Y_m}{2}, B_m = X_m - Y_m, C_m = \frac{X_{m+1} + Y_m}{2}, D_m = Y_m - X_{m+1}; \quad (3.4)$$

где X_m и Y_m – m -ые максимумы и минимумы сигнала, соответственно [108].

В работе [113] метод возвратного преобразования успешно использован для атаки на хаотические системы связи, основанные на методах хаотической маскировки, модуляции управляющих параметров, включения и переключения хаотических режимов. В частности, данный способ был применен для анализа сигнала в канале хаотической системы связи, реализованной методом переключения хаотических режимов с использованием системы Лоренца-Чена, у которой происходит переключение между осцилляторами с параметрами a , равными 0.8 и 1 (рис. 3.11) [108].

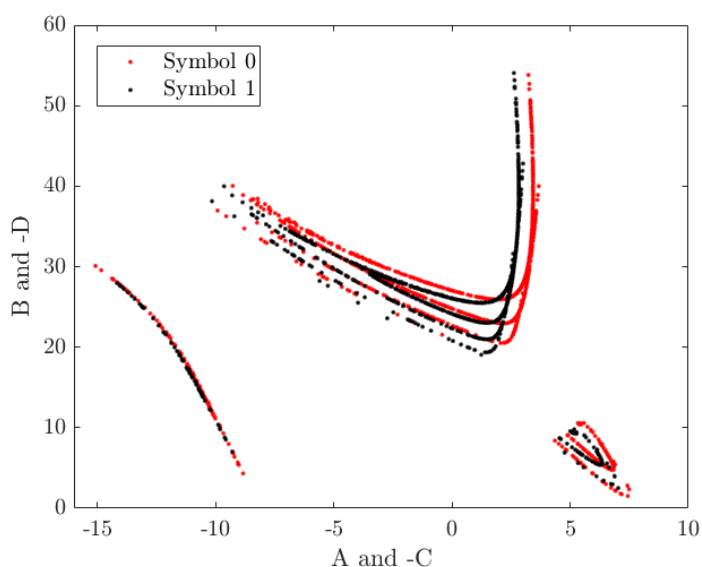


Рисунок 3.11 – Возвратное преобразование сигнала в канале хаотической системы связи, реализованной методом переключения хаотических режимов [108]

Недостаток стандартной процедуры RM-анализа заключается в невозможности визуализации изменения сигнала по фазе, что делает его непригодным для распознавания фазового хаоса [114, 115]. Для устранения этого недостатка в настоящей работе предложены новые разновидности RM-анализа, учитывающие изменение фазовых характеристик сигнала.

Ключевое отличие алгоритма фазового RM-анализа от классического амплитудного RM-анализа заключается в следующем: 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 :

$$\begin{aligned} W_{1,m} &= T(Y_m) - T(X_m), U_{1,m} = T(X_m) - T(Y_{m-1}); \\ W_{2,m} &= T(X_m) - T(X_{m-1}), U_{2,m} = T(Y_m) - T(Y_{m-1}). \end{aligned} \quad (3.5)$$

Расчет специальных переменных для фазового RM-анализа происходит следующим образом:

$$A_m = \frac{W_{m+1} + U_m}{2}, B_m = W_m - U_m, C_m = \frac{W_{m+1} + U_m}{2}, D_m = U_m - W_{m+1}. \quad (3.6)$$

На рисунке 3.12 проиллюстрировано нахождение расстояния между соседними экстремумами и расстояния между соседними максимумами и минимумами.

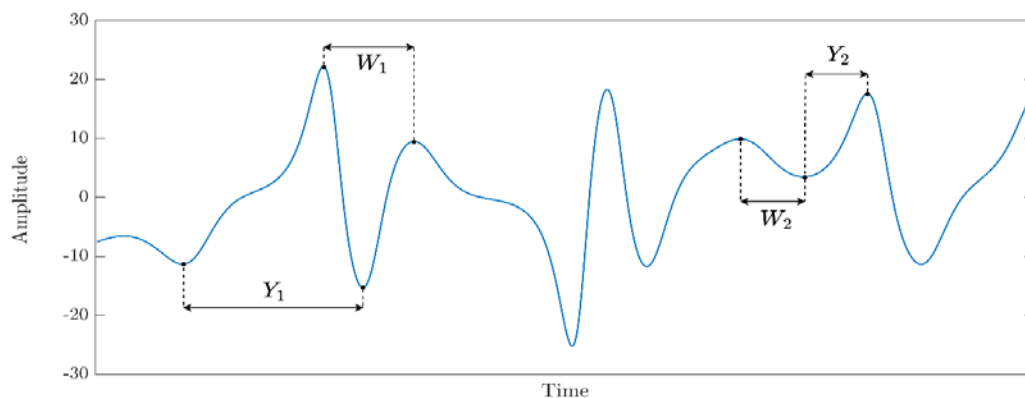


Рисунок 3.12 – Расстояния между соседними локальными экстремумами [108]

Для того, чтобы ориентация графиков фазового RM-анализа была идентичной таковой для амплитудного анализа, необходимо строить график A vs $-B$ и C vs $-D$ для анализа соседних экстремумов, и $-A$ vs B , $-C$ vs D для анализа расстояний между максимумами и минимумами [108]. Пример фазового RM-анализа для сигнала, передаваемого в канале хаотической системы связи,

реализованной методом переключения хаотических режимов с использованием системы Лоренца-Чена, у которой происходит переключения между осцилляторами с параметрами a , равными 0.8 и 1, показан на рисунке 3.13.

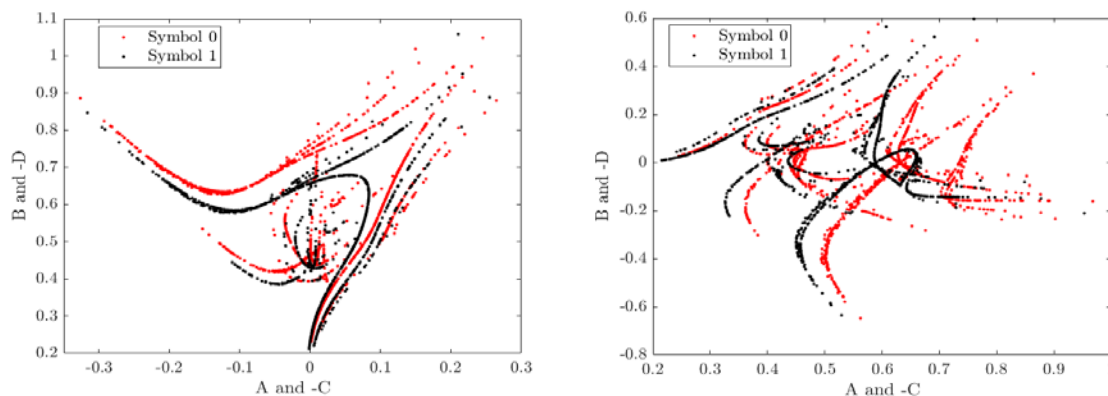


Рисунок 3.13 – Фазовый RM-анализ: расчет на основе соседних экстремумов (слева) и расчет на основе расстояний между максимумами и минимумами (справа) [108]

Одним из недостатков традиционного RM-анализа является отсутствие количественной оценки разницы между двумя разными графиками. Оценка геометрических размеров и распределения точек на графиках имеют крайне низкую результативность. В настоящей работе предлагается использовать двумерные гистограммы для расчёта оценки разницы графиков, получаемых в ходе RM-анализа [116].

Для более точной оценки разницы графиков используем подход на основе двумерных гистограмм, суть которого заключается в следующем: графики, полученные в ходе RM-анализа, разбиваются на ячейки заданных размеров, в результате чего получаются два псевдоизображения, интенсивность цвета в которых зависит от количества точек, которые попали в отдельную ячейку на графике. Далее находится разница между полученными псевдоизображениями. Отметим, что подход к анализу гистограмм как изображений применялся автором для количественной оценки распределения спайков в хаотическом нейроморфном металлодетекторе [117]. Для расчета разницы между двумя 2D-гистограммами используются следующие формулы:

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

$$\Delta_{i,j} = |X_{i,j} - Y_{i,j}| \cdot |\theta(X_{i,j}) - \theta(Y_{i,j})|, \quad i, j \in [1, N]; \quad (3.7)$$

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

где θ – ступенчатая функция Хэвисайда, N ($N \times N$) – разрешение двумерной гистограммы, а ϵ – порог отсечения 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 [108].

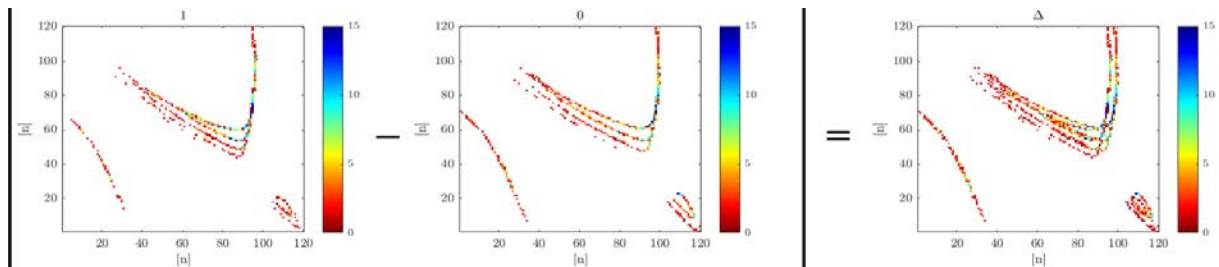


Рисунок 3.14 – Расчет разницы между двумя графиками, полученными в результате RM-анализа с помощью 2D-гистограмм [108]

Рисунок 3.14 иллюстрирует получение разницы между двумя графиками, полученными в результате RM-анализа с помощью 2D-гистограмм. Такой подход позволяет получить численную оценку разницы между двумя сигналами. Такая доработка RM-анализа получила название “численный анализ возвратных преобразований” (англ. Quantified Return Map Analysis, QRMA) [108]. Стоит отметить, что для лучшей визуализации разницы между графиками применялась палитра цветов, где белый цвет соответствует нулевым значениям.

В настоящем подразделе были представлены новые инструменты оценки характеристик моделей элементов хаотических систем связи, позволяющие оценить различимость сигналов для разных подходов к модуляции хаотического сигнала. Рассмотрим некоторые метрики, используемые при выборе параметров генераторов хаотических сигналов и ХСС в процессе проектирования.

3.6 Программные средства оценки различимости сигналов

Для оценки различимости сигналов при передаче данных в диссертации предложена библиотека программных средств, выполняющих базовый анализ проектируемой ХСС с точки зрения скрытности передачи данных. В качестве инструментов анализа реализованы алгоритмы спектрального анализа, рекуррентного анализа и количественного возвратного анализа [108].

3.6.1 Программная реализация алгоритма спектрального анализа

Спектральный анализ проводится путем исследования входного сигнала с использованием оконного преобразования Фурье, работа данного вида анализа более подробно описана в разделе 3.5.1. Лицевая панель подприбора для построения спектрограмм показана на рисунке 3.15.

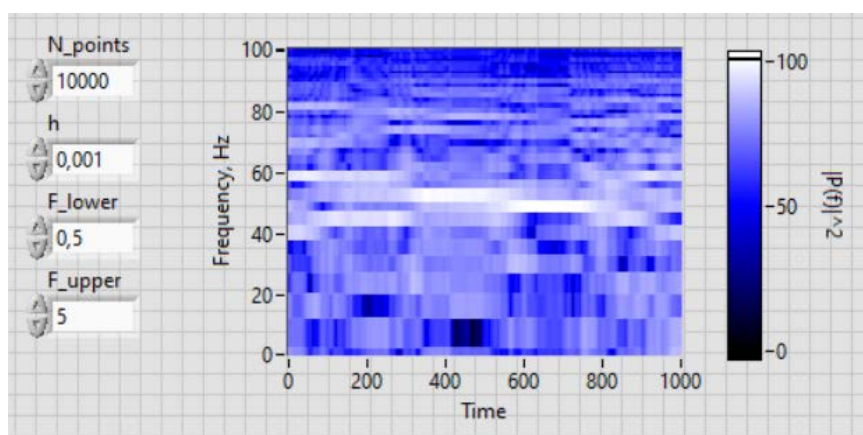


Рисунок 3.15 – Лицевая панель подприбора построения спектрограмм

Входными параметрами подприбора являются диапазон исследуемых частот, настройка полосового фильтра, а также количество разбиений исходного сигнала для анализа. В результате построения спектрограммы на выходе формируется набор данных, для которого ведется расчет энергии сигнала.

3.6.2 *Виртуальный прибор рекуррентного анализа*

Алгоритм разработанной в диссертационном исследовании программы рекуррентного анализа подробно описан в разделе 3.5.2. Лицевая панель подприбора для проведения рекуррентного анализа показана на рисунке 3.16.

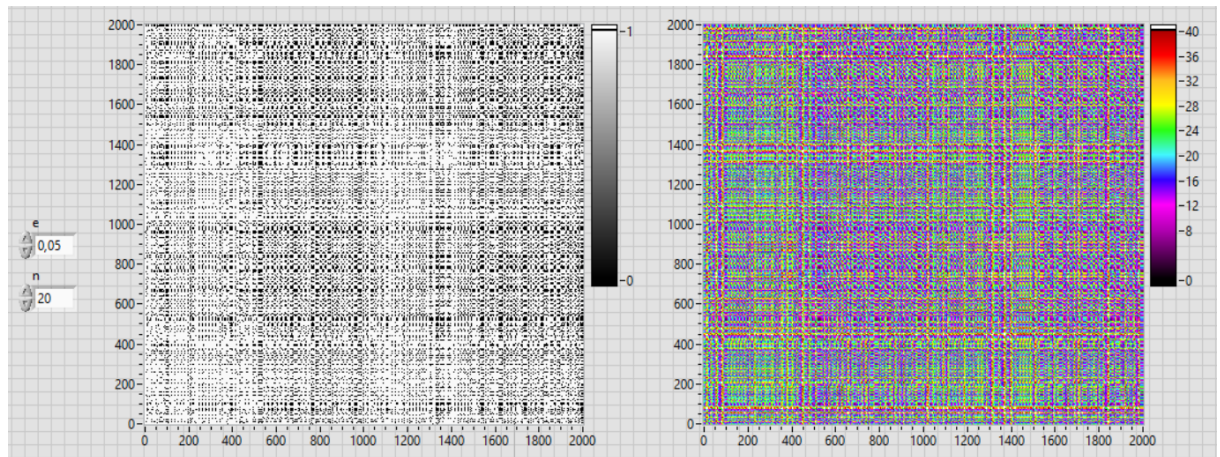


Рисунок 3.16 – Лицевая панель подприбора рекуррентного анализа

Входными параметрами программы является размер рекуррентной диаграммы и пороговое значение для ступенчатой функции Хевисайда. На лицевой панели отображается сама рекуррентная диаграмма, а также матрица расстояний, представленная в псевдоцветах. Для полученных значений расстояния идет расчет частоты повторений, энтропии и времени захвата.

3.6.3 *Программная реализация численных возвратных преобразований*

Прибор расчета численных возвратных преобразований основан на алгоритме, подробно изложенном в разделе 3.5.3. Лицевая панель подприбора для расчета обратных преобразований (как амплитудных, так и фазовых) показана на рисунке 3.17.

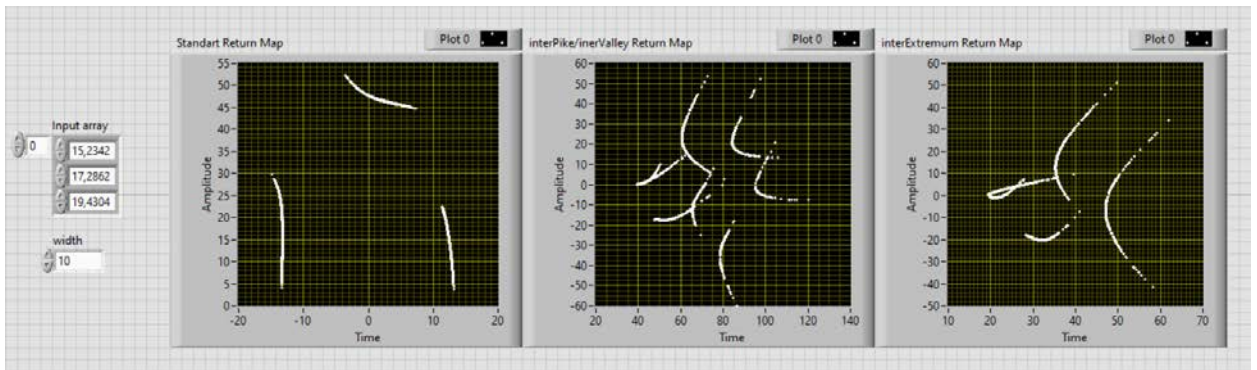


Рисунок 3.17 – Лицевая панель подприбора расчета обратных преобразований

Входным параметром для алгоритма расчета обратных преобразований выступает диапазон точек для расчета экстремумов. Выходными данными программы являются массивы данных диаграмм, соответствующих рассчитанным возвратным преобразованиям.

Лицевая панель прибора для проведения численной оценки разницы между обратными преобразованиями (т.е. численное возвратное преобразование) показана на рисунке 3.18.

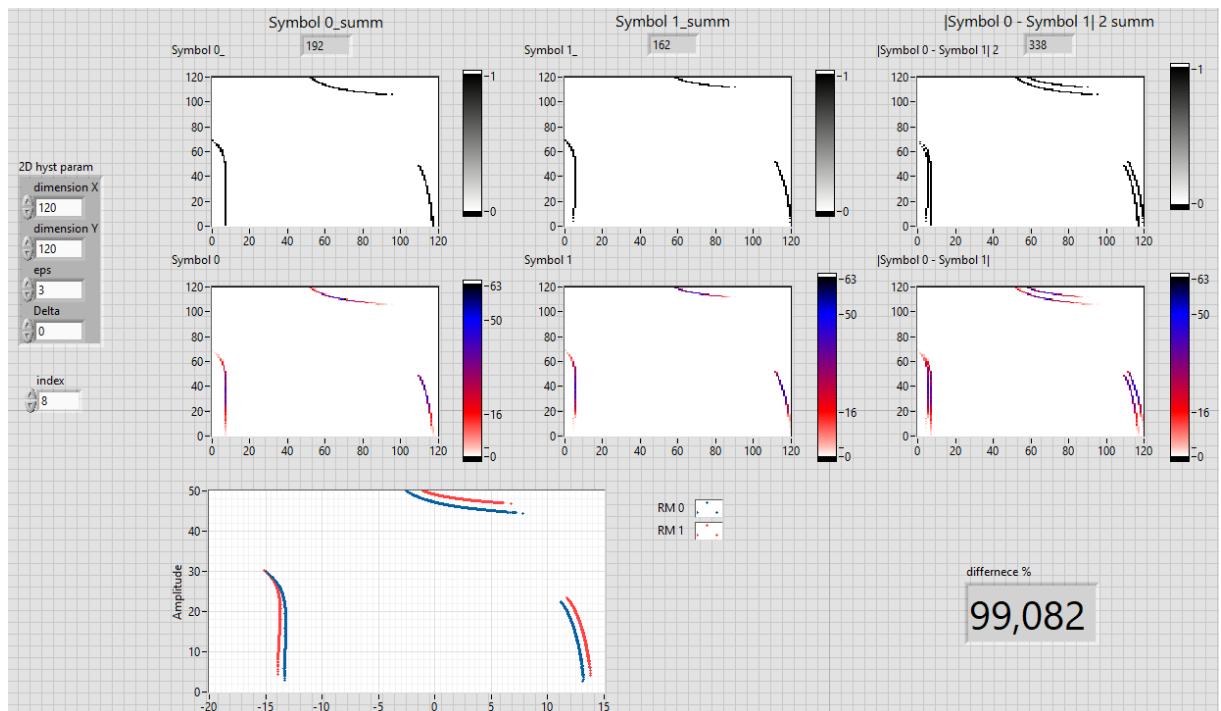


Рисунок 3.18 – Лицевая панель прибора для проведения численной оценки разницы между обратными преобразованиями

Входными параметрами прибора являются разрешение двумерной гистограммы и пороговое значение. В качестве выходных данных выступают численная оценка разницы между двумя графиками возвратных преобразований, выраженная в процентах. Более подробно исследование влияния настраиваемых параметров обратного преобразования описано в разделе 4.6.3 диссертации.

3.7 Метрика различимость-помехоустойчивость как инструмент анализа моделей хаотических систем связи

Другим важным компонентом средств моделирования хаотических систем связи являются инструменты оценки целостности передачи данных, включая устойчивость ХСС к различным типам шума и помех в канале передачи данных, сохраняя при этом максимальную защищенность передаваемой информации. В качестве меры целостности передачи данных можно использовать известную метрику - частоту битовых ошибок (bit error rate, BER) в единицу времени, т.е. число бит, неверно распознанных системой передачи на стороне приемника в условиях наличия шума в канале связи. Для оценки различимости сигналов в настоящей работе предлагается использовать метрику QRMA, подробно описанную в предыдущем разделе.

Для комплексной оценки систем связи по критериям защищенности и устойчивости к шуму проведено экспериментальное исследование целостности передачи данных в условиях белого гауссова шума с соотношением сигнал/шум от 0 до 70 дБ для различных систем, диссипативных (Рёсслера) и консервативных (Носе-Гувера). Система координат различимость-помехоустойчивость обладает свойствами плоскости Парето: при улучшении скрытности (уменьшении различимости), что происходит при уменьшении разницы параметра, задающего символы 0 или 1, неизбежно ухудшается BER, и наоборот. Благодаря этому становится возможным сравнивать различные методы между собой, подбирая как наилучший способ модуляции, так и систему, а также необходимое значение

разницы между символами. Подробно применение метрики различимость-помехоустойчивость описано в подразделе 4.7 настоящей диссертационной работы.

3.8 Виртуальный прибор для оценки помехозащищенности канала связи и построения плоскости COVERTY-BER

Лицевая панель прибора для оценки помехозащищенности канала связи ХСС показана на рисунке 3.19.

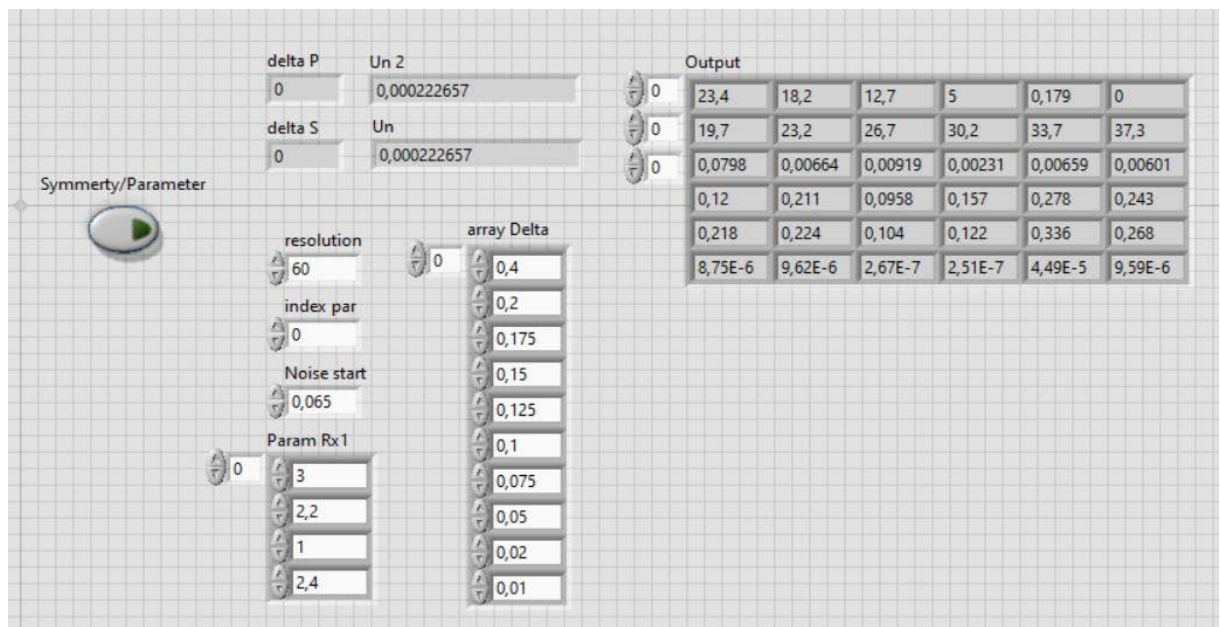


Рисунок 3.19 – Лицевая панель прибора оценки помехозащищенности канала связи ХСС

Входными параметрами прибора являются набор исследуемых параметров (коэффициент симметрии/бифуркационный параметр), параметры осциллятора, значения разброса исследуемого параметра, значение стартового и финального уровня шума и его разрешение. Выходные данные включают в себя значения уровня шума, количество битовых ошибок, а также количественную оценку разницы сигналов, полученную с помощью численных возвратных преобразований для соответствующих значений разброса исследуемых параметров

3.9 Выводы по главе

В третьей главе диссертации описаны разработанные элементы программного обеспечения для моделирования и оценки характеристик хаотических систем связи. Созданное ПО позволяет разрабатывать и моделировать элементы ХСС, включая генераторы хаотических сигналов с различными способами модуляции, в широком диапазоне заданных параметров, а также оценивать характеристики элементов ХСС. Программный комплекс включает в себя имитационную модель ХСС с настройками разрядности ЦАП/АЦП, выбором зашумления и его уровнем, а также набор программ для анализа характеристик проектируемой ХСС, таких как различимость сигналов, помехоустойчивость, плотность канала связи. Модуль оценки различимости сигналов при передаче сообщений включает в себя спектральный анализ, рекуррентный анализ и анализ на основе численных возвратных преобразований.

Также разработанный в ходе диссертационного исследования программный комплекс включает в себя модуль оптимизации параметров синхронизации дискретных генераторов хаотических колебаний в структуре ХСС, который позволяет добиться наибольшей скорости передачи сообщений при наименьшей чувствительности к шуму в канале связи.

В разделе 3.4 представлены алгоритмы и процедуры оценки характеристик моделей ХСС, такие как построение бифуркационных диаграмм и бифуркационных спектрограмм, и разработанные на их основе инструменты оценки проектных решений. На примере дискретной модели системы Рёсслера, полученной полуявным численным методом интегрирования, показано, что хаотическая динамика с незначительными изменениями сохраняется на всем диапазоне значений коэффициента симметрии, чего не наблюдается при изменении параметра бифуркации. Поэтому, используя модуляцию коэффициента симметрии для когерентных хаотических систем связи, гипотетически можно добиться более

защищенной передачи информации. Для проверки этой гипотезы предложен инструментарий оценки различимости сигналов.

В качестве инструментов оценки различимости сигналов выбраны следующие: спектральный анализ, рекуррентный анализ, а также новая модификация метода возвратных преобразований. Предлагаемый инструментарий позволяет оценить изменение динамики хаотического генератора при варьировании параметров бифуркации и коэффициента симметрии – это позволяет выявить оптимальные настройки генератора в составе ХСС, что в свою очередь ведет к повышению характеристик проектных решений в области скрытности передачи данных.

В разделе 3.7 представлено описание новой метрики COVERTY-BER, призванной достоверно оценить скрытность разрабатываемых ХСС с точки зрения различимости сигналов при модуляции в условиях разной зашумленности канала связи.

Разработанный программный комплекс призван сократить время и повысить качество проектирования ХСС за счёт автоматизации процессов тестирования ХСС и увеличения степени адекватности используемых математических и компьютерных моделей.

Таким образом, продемонстрирован потенциал созданного программного инструментария моделирования и анализа хаотических систем связи. Экспериментальная оценка разработанных математических моделей, методов и программных средств, а также сравнение предлагаемых решений с известными представлены в последней главе диссертации.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАЗРАБОТАННЫХ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ХАОТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ

В данной главе изложены результаты экспериментальной проверки теоретических положений работы. Проведена апробация основных результатов на примере моделирования виртуального прототипа ХСС с использованием предложенных в работе генераторов хаотических сигналов с модуляцией коэффициента симметрии h_{jnjnbg} , а также экспериментального программно-аппаратного стенда.

С помощью программного обеспечения, описанного ранее в главе 3, были синтезированы дискретные модели приёмника и передатчика на основе диссипативной хаотической системы Рёсслера со стандартным набором параметров $[0.2, 0.2, 5.7]$, и консервативной системы Носе-Гувера с набором параметров $[1, 1]$.

Для реализации прототипа хаотической системы связи была выбрана платформа NI myRIO 1900, обеспечивающая простоту тестирования и автоматическую генерацию целочисленного кода с последующей верификацией программных моделей. Верифицированный таким образом код может быть автоматически перенесен на ПЛИС (на языках VHDL, Verilog) или микроконтроллер (язык C/C++).

Структура разработанного прототипа ХСС приведена на рис. 5.1.

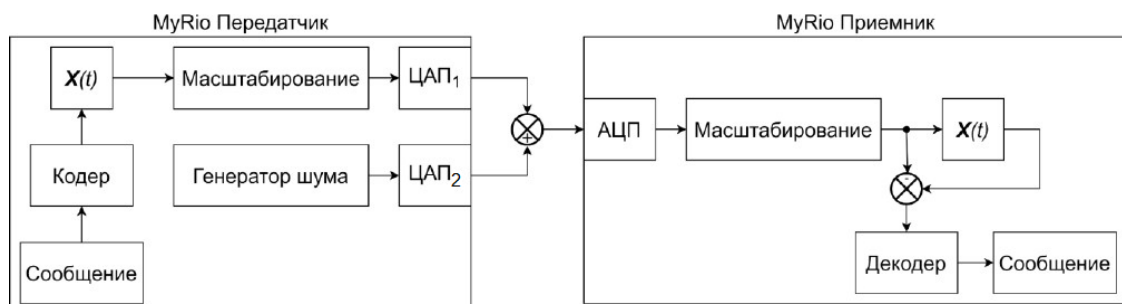


Рисунок 4.1 – Структурная схема прототипа ХСС

На рис. 4.2 приведены фотографии разработанного стенда полунатурного макетирования ХСС. В конструкции стенда контроллер NI myRIO сопряжен с ПК

на основе процессора Intel Core i7, с возможностью исследования передаваемых сообщений на отдельном и встроенном осциллоскопах.

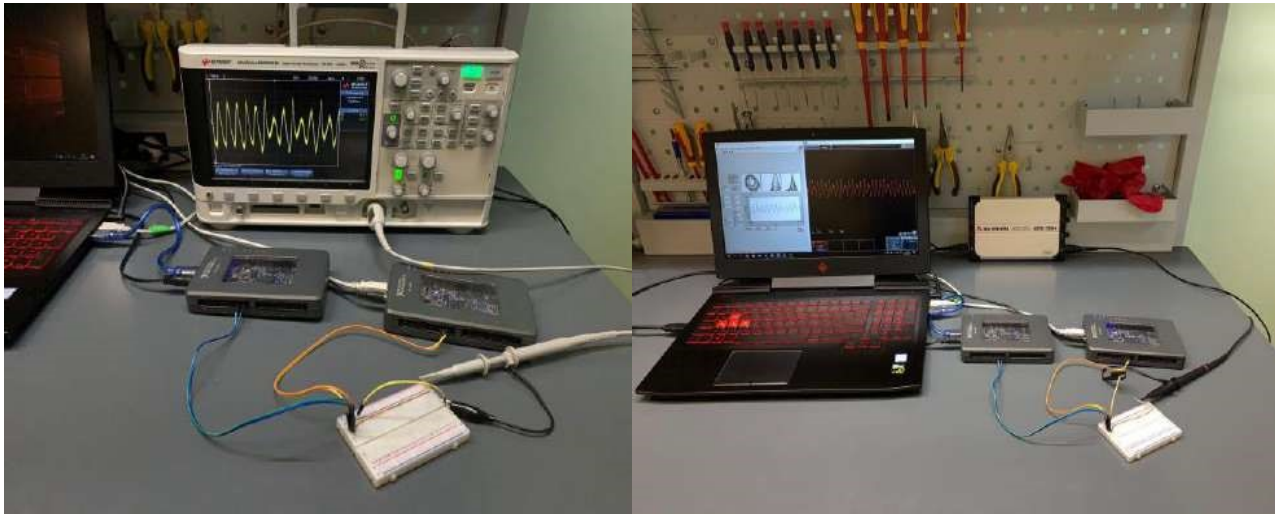


Рисунок 4.2 – Созданные прототипы хаотических систем связи

Для реализации тестовой ХСС на основе ПЛИС NI MyRIO были разработаны конечно-разностные схемы системы Рёсслера с управляемой симметрией, использующие целочисленный тип данных FXP. Блок-схема передатчика представлена на рис. 4.3. Отметим, что предложенная архитектура генераторов хаотических сигналов хорошо масштабируется к выбранному типу данных.

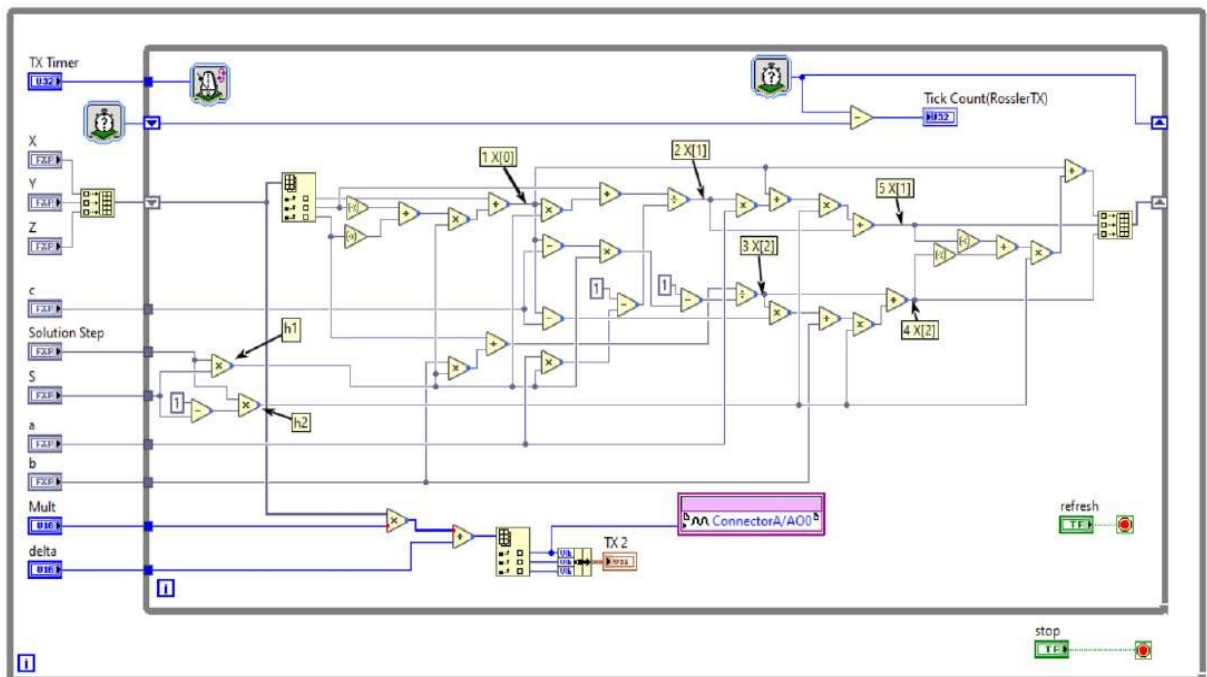


Рисунок 4.3 – Блок-диаграмма передатчика

Блок-схема приемника представлена на рисунке 4.4.

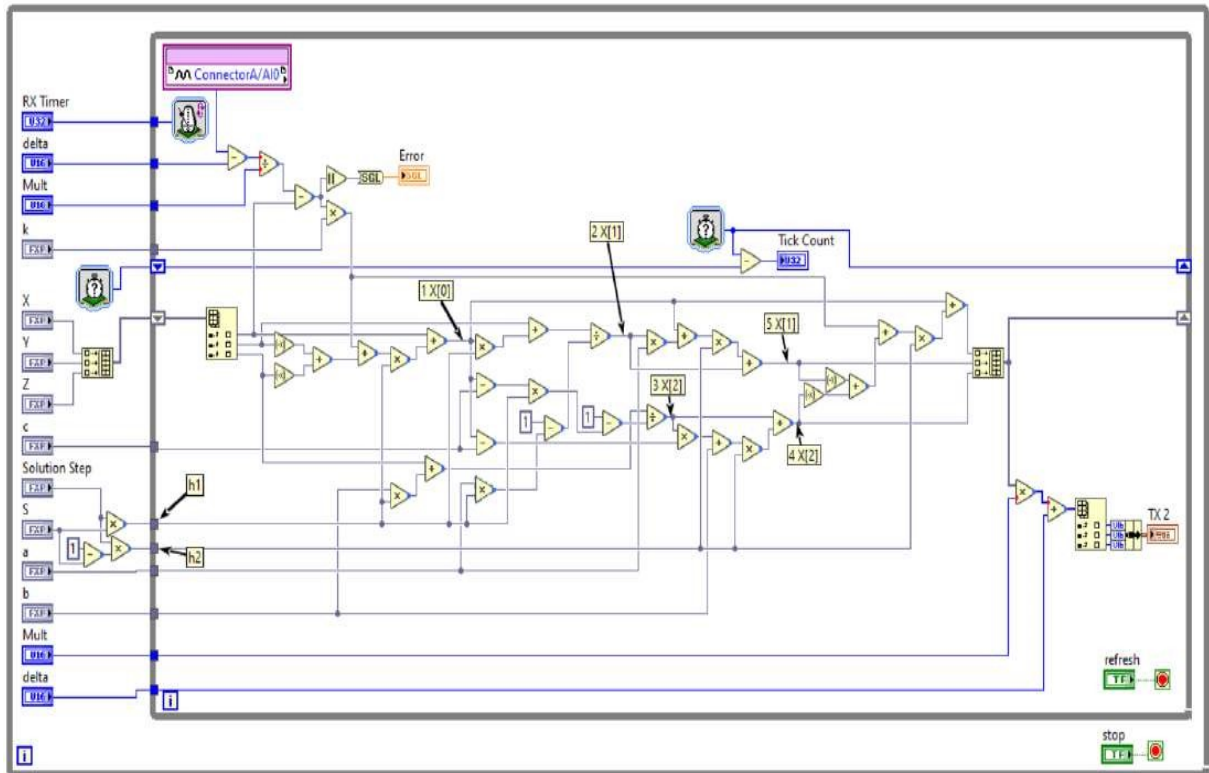
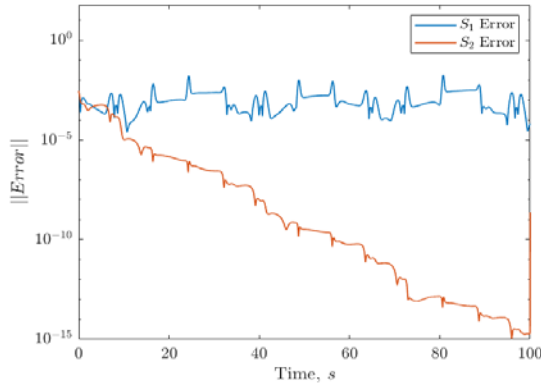


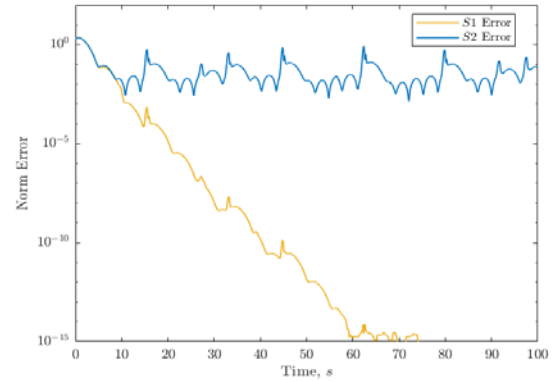
Рисунок 4.4 – Блок-диаграмма приемника

4.1 Тестовая среда для постановки вычислительных экспериментов

В рамках экспериментальной части работы моделировалась передача двоичного сообщения в двух системах на основе синхронизированных конечно-разностных моделей Носе-Гувера и Рёсслера с адаптивной симметрией, соответственно. Целью эксперимента было сравнение генераторов хаотических колебаний, построенных методом дискретизации полуживыми численными методами консервативной и диссипативной систем. Пусть для модуляции символов двоичного алфавита используются коэффициенты симметрии S_1 и S_2 соответственно. Например, можно установить $S_1 = 0.4$ и $S_2 = 0.6$ для кодирования 1 и 0 соответственно. Графики погрешности синхронизации в приемниках во время передачи логического единичного бита показаны на рисунке 4.5.



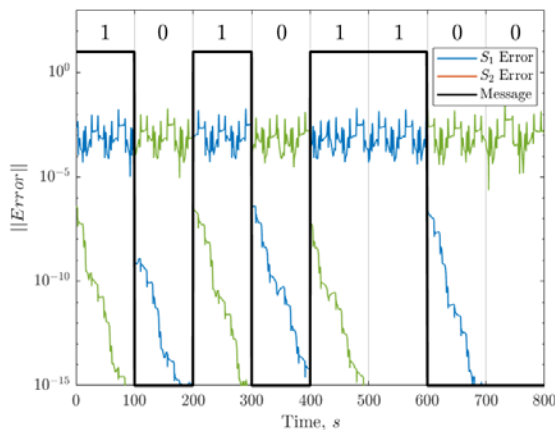
Система Носе-Гувера



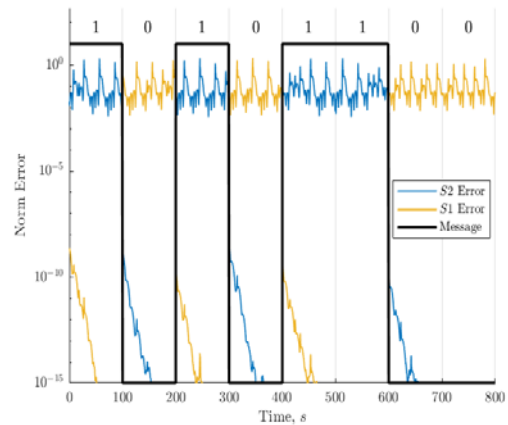
Система Рёсслера

Рисунок 4.5 – Графики ошибки синхронизации в системе приемника во время передачи символа, соответствующему значению S_1

На рисунке 4.6 показаны погрешности синхронизации двух ведомых систем на приемнике при передаче сообщения “10101100”. Моделирование при передаче сообщения выполнялось с шагом интегрирования $h = 0.001$.



Система Носе-Гувера



Система Рёсслера

Рисунок 4.6 – Нормализованные ошибки синхронизации в системах приемника во время передачи сообщения “10101100”

Как видно из рисунков выше, при несовпадении коэффициентов симметрии на стороне приемника не наблюдается явление хаотической синхронизации. Анализируя значения ошибок синхронизации на каждой из систем на стороне приёмника можно восстановить передаваемое сообщение.

4.1.1 Применение конечно-разностных моделей генераторов хаотических колебаний в хаотических системах связи

Архитектура генератора хаотических сигналов, используемого в структуре ХСС проистекает из особенностей численной реализации конечно-разностных схем на основе численного метода с управляемой симметрией. Отметим ключевые моменты для каждой из схем. Выберем шаги интегрирования для двух сопряженных методов как:

$$\begin{aligned} h_1 &= h \cdot S; \\ h_2 &= h \cdot (1 - S). \end{aligned} \quad (4.1)$$

Переменная N отвечает за синхронизацию ведомой системы с ведущей и рассчитывается следующим образом

$$\begin{aligned} N[0] &= K[0] * (S1[0] - X[0]); \\ N[1] &= K[1] * (S1[1] - X[1]); \\ N[2] &= K[2] * (S1[2] - X[2]); \end{aligned} \quad (4.2)$$

где K – массив коэффициентов синхронизации, $S1$ - сигнал ведущей системы, X – вектор переменных состояния системы. В ходе диссертационного исследования были разработаны следующие конечно-разностные схемы.

Конечно-разностная модель генератора на основе системы Рёсслера с управляемой симметрией:

$$\begin{aligned} X[0] &= X[0] + h1 * (-X[1] - X[2] + N[0]); \\ X[1] &= (X[1] + h1 * (X[0] + N[1])) / (1 - a[0] * h1); \\ X[2] &= (X[2] + h1 * (a[1] + N[2])) / (1 - h1 * (X[0] - a[2])); \\ X[2] &= X[2] + h2 * (a[1] + X[2] * (X[0] - a[2]) + N[2]); \\ X[1] &= X[1] + h2 * (X[0] + a[0] * X[1] + N[1]); \\ X[0] &= X[0] + h2 * (-X[1] - X[2] + N[0]); \end{aligned} \quad (4.3)$$

Конечно-разностная модель генератора на основе системы Лоренца [118] с управляемой симметрией:

$$\begin{aligned}
 X[0] &= (X[0] + h_1 * (a[0] * X[1] + N[0])) / (1 + h_1 * a[0]); \\
 X[1] &= (X[1] + h_1 * (X[0] * (a[1] - X[2]) + N[1])) / (1 + h_1); \\
 X[2] &= (X[2] + h_1 * (X[0] * X[1] + N[2])) / (1 + h_1 * a[2]); \\
 X[2] &= X[2] + h_2 * (X[0] * X[1] - a[2] * X[2] + N[2]); \\
 X[1] &= X[1] + h_2 * (X[0] * (a[1] - X[2]) - X[1] + N[1]); \\
 X[0] &= X[0] + h_2 * (a[0] * (X[1] - X[0]) + N[0]);
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Конечно-разностная модель генератора на основе системы Носе-Гувера с управляемой симметрией:

$$\begin{aligned}
 X[0] &= X[0] + h_1 * (a[0] * X[1] + N[0]); \\
 X[1] &= (X[1] + h_1 * (-X[0] + N[1])) / (1 - h_1 * a[1] * X[2]); \\
 X[2] &= X[2] + h_1 * (1 - a[2] * X[1]**2 + N[2]); \\
 X[2] &= X[2] + h_2 * (1 - a[2] * X[1]**2 + N[2]); \\
 X[1] &= X[1] + h_2 * (a[1] * X[1] * X[2] - X[0] + N[1]); \\
 X[0] &= X[0] + h_2 * (a[0] * X[1] + N[0]);
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Конечно-разностная модель генератора на основе системы Буали с управляемой симметрией имеет вид:

$$\begin{aligned}
 X[0] &= (X[0] + h_1 * (-a[1] * X[2] + N[0])) / (1 - h_1 * a[0] * (1 - X[1])); \\
 X[1] &= (X[1] + h_1 * N[1]) / (1 + h_1 * a[2] * (1 - X[0] * X[0])); \\
 X[2] &= X[2] + h_1 * (a[3] * X[0] + N[2]); \\
 X[2] &= X[2] + h_2 * (a[3] * X[0] + N[2]); \\
 X[1] &= X[1] + h_2 * (N[1] - a[2] * X[1] * (1 - X[0] * X[0])); \\
 X[0] &= X[0] + h_2 * (N[0] + a[0] * X[0] * (1 - X[1]) - a[1] * X[2]);
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Конечно-разностная модель генератора хаотических колебаний на основе обобщенной хаотической системы 3 порядка с управляемой симметрией может быть записана следующим образом:

$$\begin{aligned}
X[0] &= (X[0] + h1*((25*a[0]+10)*X[1] + N[0]))/(1+h1*(25*a[0]+10)); \\
X[1] &= (X[1] + h1*((28-35*a[0])*X[0]-X[0]*X[2]+N[1]))/(1-h1*(29*a[0]-1)); \\
X[2] &= X[2] + h1*(X[0]*X[1]-X[2]*((a[0]+8)/3) + N[2]); \\
X[2] &= (X[2] + h2*(X[0]*X[1] + N[2]))/(1+h2*((a[0]+8)/3)); \\
X[1] &= X[1] + h2*((28-35*a[0])*X[0]-X[0]*X[2]+(29*a[0]-1)*X[1] + N[1]); \\
X[0] &= X[0] + h2*((25*a[0]+10)*(X[1]-X[0]) + N[0]);
\end{aligned}
\tag{4.7}$$

Приведенные выше конечно-разностные уравнения реализуются в виде кода аппаратной платформы или программным образом в составе стенда моделирования. Аппаратная реализация генераторов приведена в следующем разделе. Теоретически обосновано и экспериментально установлено, что форма реализации генераторов и приемников в арифметике с фиксированной запятой является задачей оптимизации в том лишь смысле, что порождаемый округлением цифровой шум должен быть меньше, чем шум АЦП и шум в канале. Поэтому в общем случае, можно считать, что реализация моделей в арифметике с фиксированной запятой добавляет лишь дополнительный источник шума, которым можно пренебречь, если уровень шума за счет АЦП/ЦАП или уровень шума в канале выше.

4.1.2 Исполняемые модели генераторов и приемников хаотических сигналов

В рамках диссертационной работы были разработано и исследовано семейство исполняемых моделей генераторов и приемников хаотических сигналов на основе как консервативных, так и диссипативных хаотических систем.

На рисунке 4.7-4.10 показаны архитектуры генераторов хаотических сигналов на основе конечно-разностных моделей систем Рёсслера, Лоренца, Носе-Гувера и Буали с управляемой симметрией. Данные генераторы реализованы в виде имитационных моделей и исполняемого кода в среде LabVIEW и могут быть без изменений имплементированы на целевой платформе, напр., FPGA в составе устройства myRIO 1900 или аналогичных.

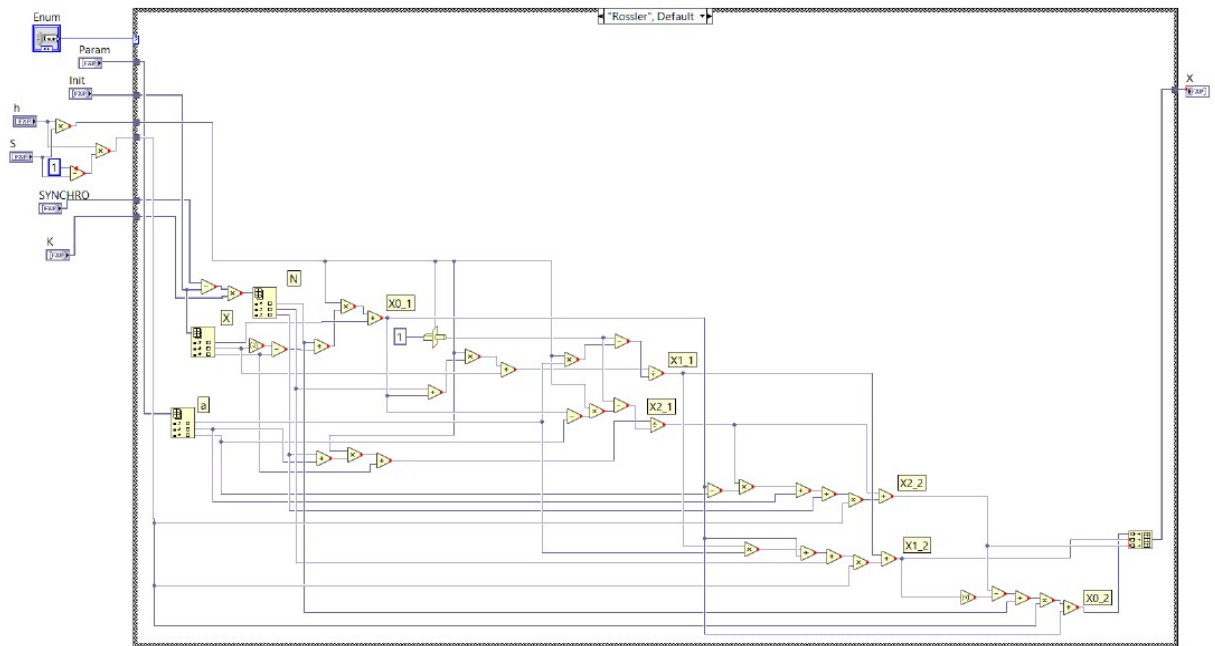


Рисунок 4.7 – Блок-диаграмма генератора хаоса с управляемой симметрией на основе системы Рёсслера, реализованного в арифметике с фиксированной запятой

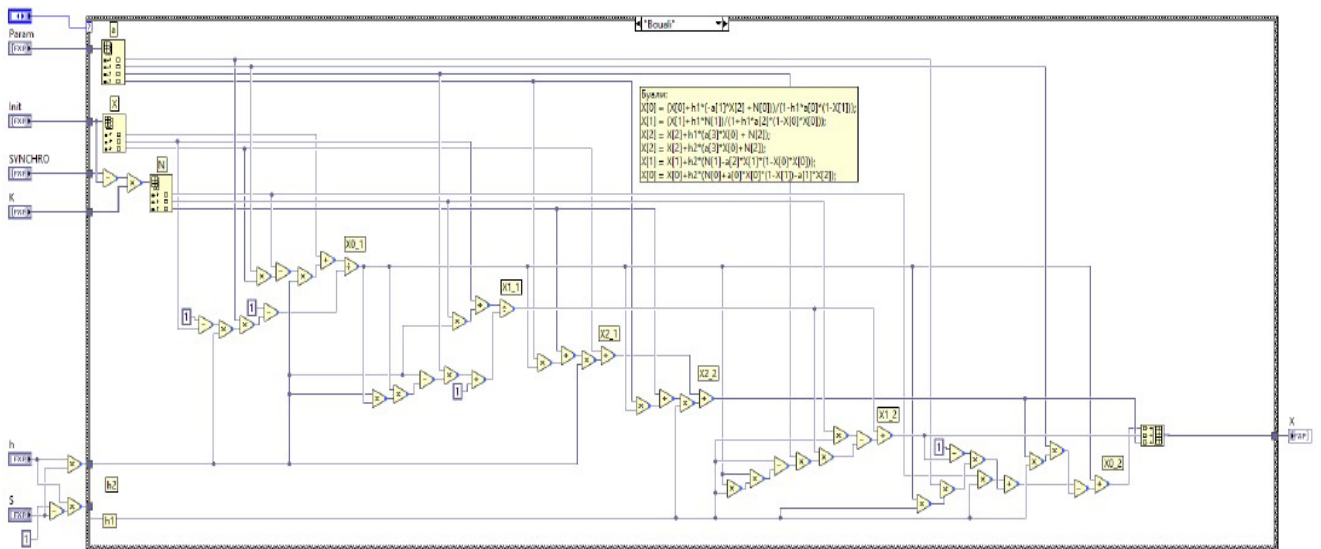


Рисунок 4.8 – Блок-диаграмма генератора хаоса с управляемой симметрией на основе системы Буали, реализованного в арифметике с фиксированной запятой

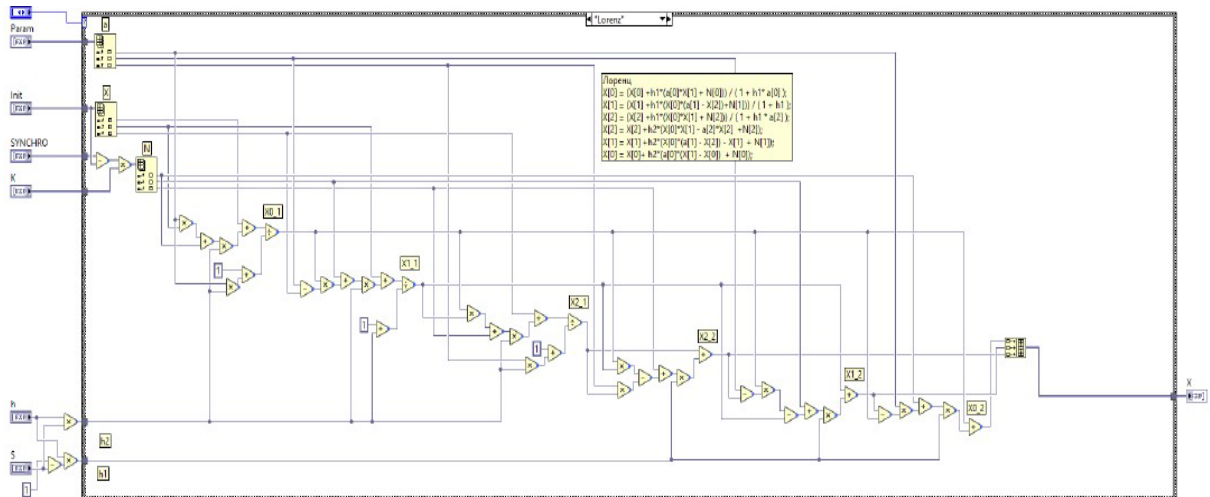


Рисунок 4.9 – Блок-диаграмма генератора хаоса с управляемой симметрией на основе системы Лоренца, реализованного в арифметике с фиксированной запятой

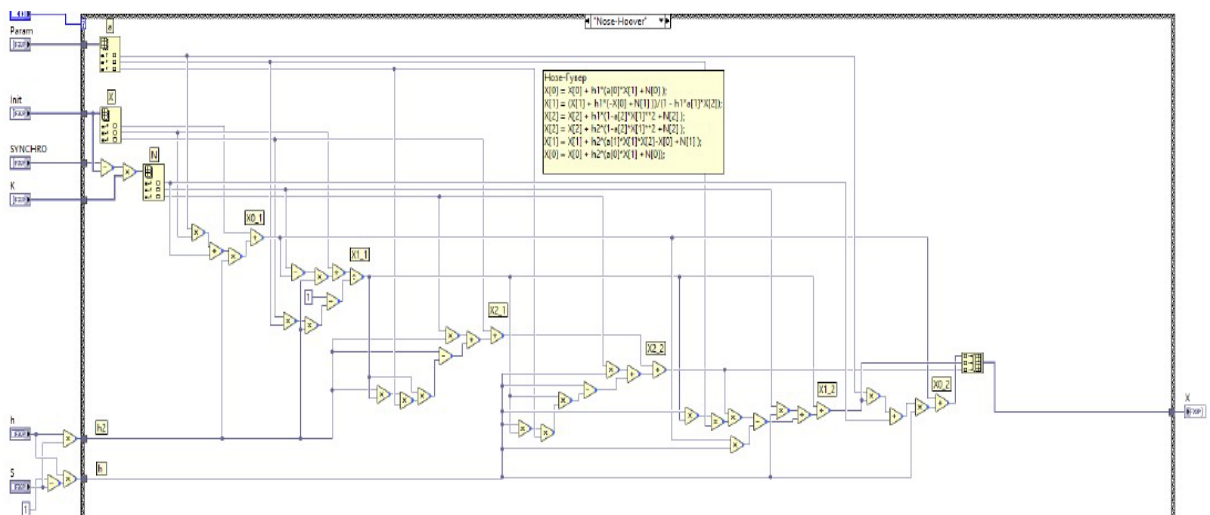


Рисунок 4.10 – Блок-диаграмма генератора хаотических сигналов на основе консервативной хаотической системы Носе-Гувера в арифметике с фиксированной запятой

Как было показано в разделе 4.1.1, форма реализации генераторов и приемников в арифметике с фиксированной запятой является задачей оптимизации в том лишь смысле, что порождаемый округлением цифровой шум должен быть меньше, чем шум АЦП и шум в канале. Поэтому в общем случае можно считать, что реализация моделей в арифметике с фиксированной запятой добавляет лишь дополнительный источник шума, которым можно пренебречь, если уровень шума

за счет АЦП-ЦАП или уровень шума в канале выше, чем данный шум. На рисунке 4.11 приведены результаты экспериментов по подбору разрядностей АЦП-ЦАП при заданном соотношении сигнал-шум в канале реализации ХСС на основе системы Рёсслера. Отметим, что для других приведенных выше генераторов показанные общие закономерности сохраняются.

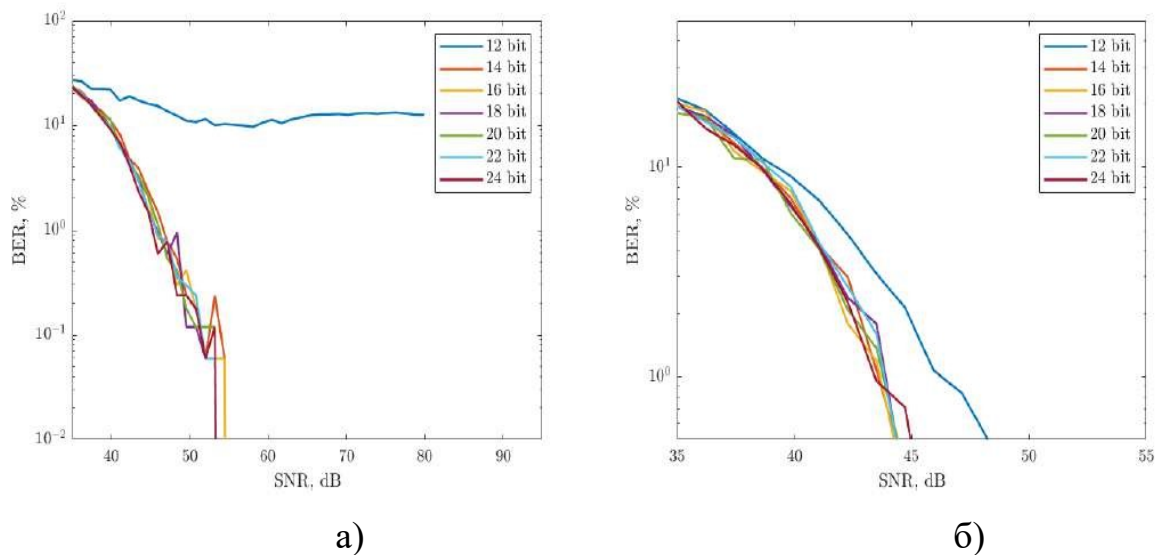


Рисунок 4.11 – Число битовых ошибок при различных уровнях соотношения сигнал-шум и разрядностях АЦП-ЦАП для системы Рёсслера: (а) $\Delta s = 0.1$ (0.55 и 0.45); (б) дельта параметра $\Delta c = 0.002$ (0.201 и 0.199)

При низком разрешении АЦП/ЦАП (12 бит) проектируемая ХСС достигает максимального значения BER около 11% в то время как разрядности в 14 бит и выше вполне достаточно для достижения значения $BER = 0\%$ при пропорциональном уменьшении шума в канале связи. В диапазоне разрядностей от 14 до 24 бит существенной разницы в качестве передаче данных обнаружено не было (Рис. 4.12-4.13).

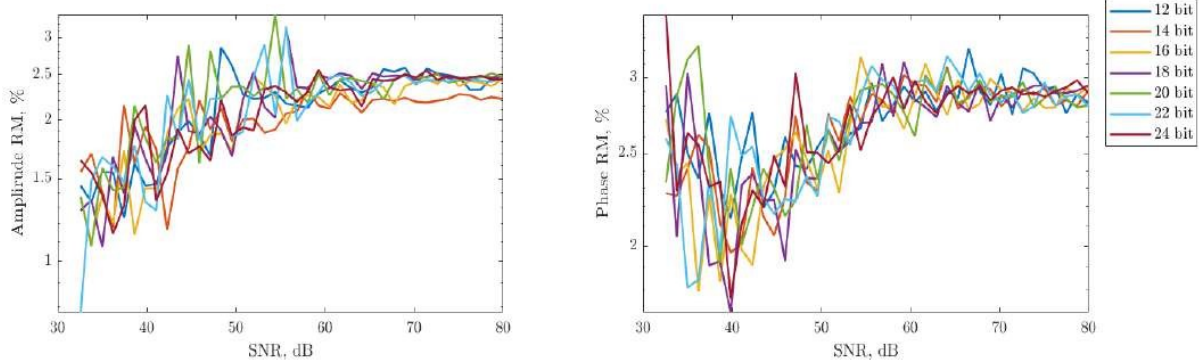


Рисунок 4.12 – Различимость сигналов ХСС на основе системы Рёсслера при различной разрядности АЦП, оценка методом численных возвратных преобразований, $\Delta s = 0.1$ (0.55 и 0.45)

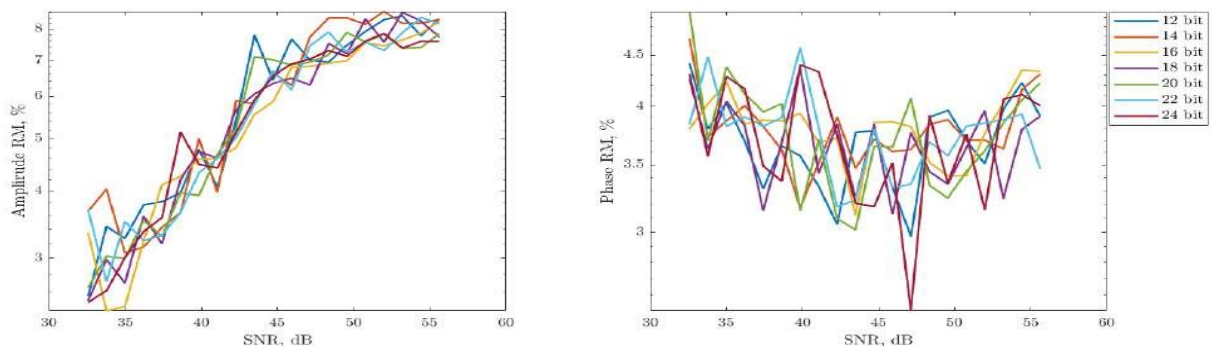


Рисунок 4.13 – Различимость сигналов ХСС на основе системы Рёсслера при различной разрядности АЦП, оценка методом возвратных преобразований, $\Delta s = 0.002$ (0.201 и 0.199).

На основе полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что для реализации ХСС необходимо учитывать разброс значений модулируемых параметров или коэффициента симметрии, так как при относительно малом разбросе модулируемых параметров изменения в динамике сигнала становятся ниже, чем уровень шумов ЦАП/АЦП, что ведет к невозможности достижения полной синхронизации. В то же время результаты экспериментов показали, что изменение разрядности ЦАП/АЦП с 12 до 24 бит никак не влияет на различимость сигналов ХСС.

4.2 Оценка характеристик модели хаотической системы связи, использующей генераторы сигналов с управляемой симметрией

В данном подразделе описаны эксперименты по оценке динамики хаотических режимов, возникающих в приемнике и передатчике прототипов проектируемой ХСС на основе консервативных и диссипативных хаотических систем.

Бифуркационные и спектральные диаграммы по параметрам и коэффициенту симметрии системы Носе-Гувера показаны на рисунках 4.14-4.15, соответственно. Отметим, что модуляция коэффициента симметрии существенно влияет на динамику консервативной системы Носе-Гувера, описанную в разделе 4.1.

Исследуя с использованием вышеупомянутых инструментов сигнал, генерируемый приемником с переключаемыми значениями параметра или коэффициента симметрии, можно оценить степень изменения свойств сигнала при различных способах модуляции.

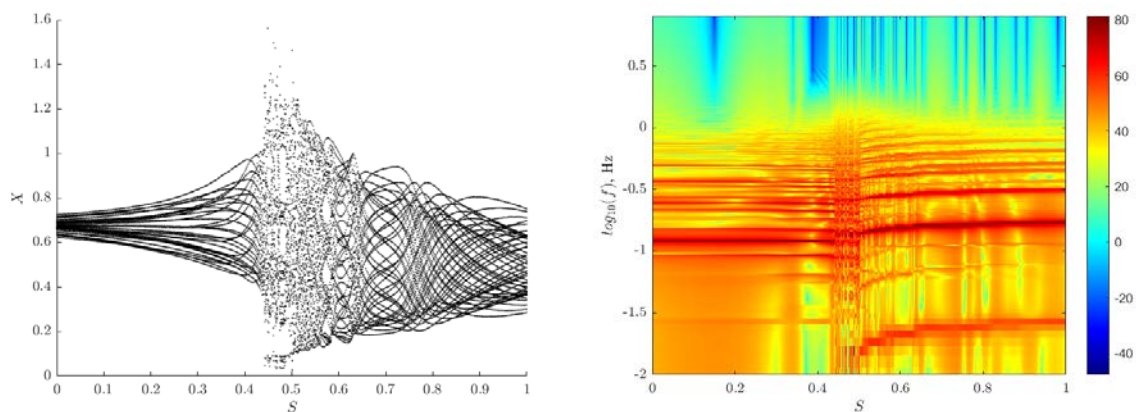
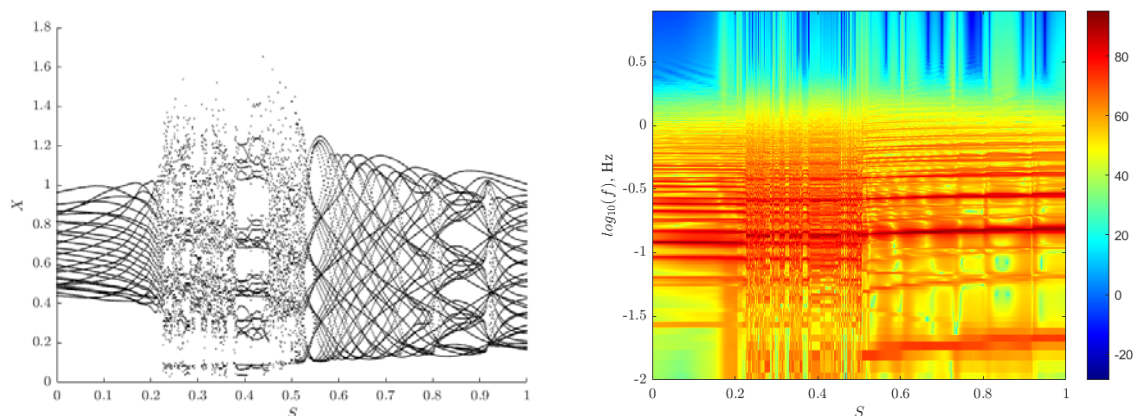
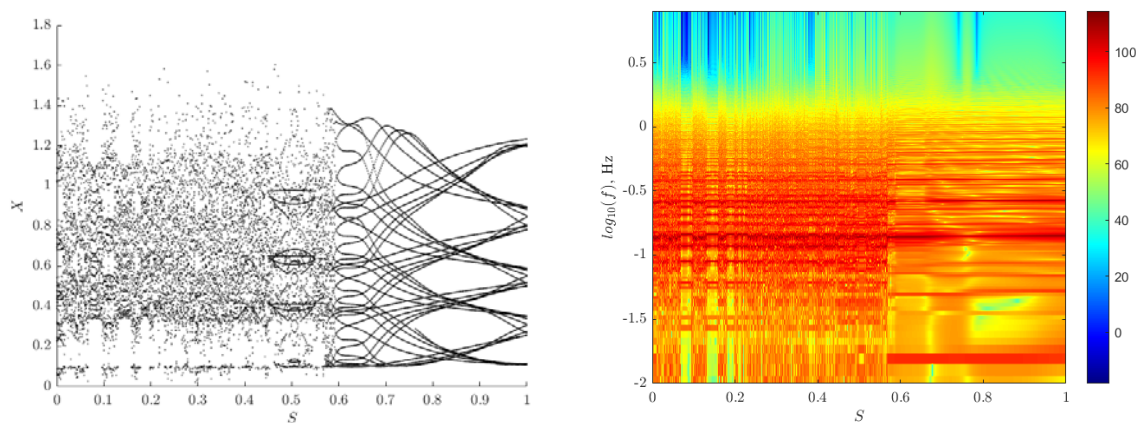
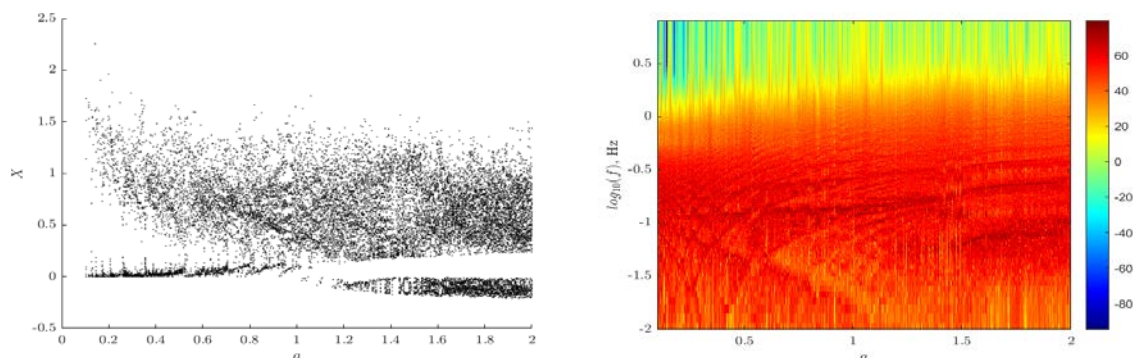
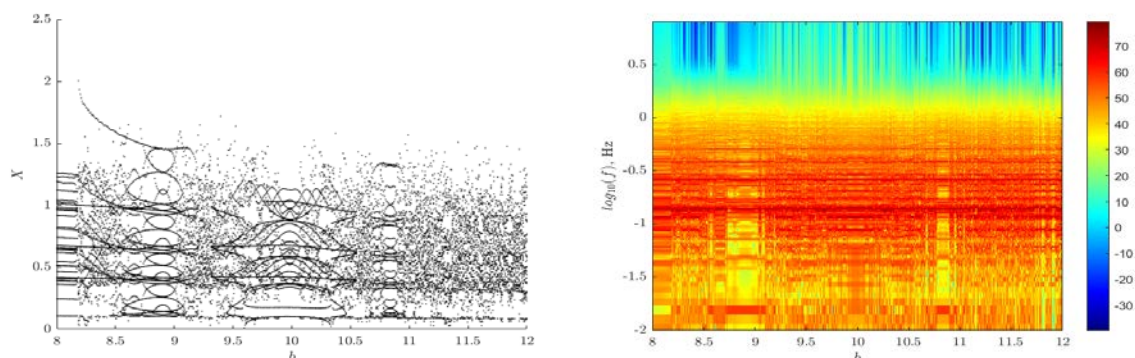
Шаг интегрирования $h = 0.05$ Шаг интегрирования $h = 0.01$ Шаг интегрирования $h = 0.001$

Рисунок 4.14 – s -диаграммы и s -спектрограммы системы Носе-Гувера, моделируемой с различными значениями шага интегрирования



Параметр a , шаг интегрирования $h = 0.01$



Параметр b , шаг интегрирования $h = 0.01$

Рисунок 4.15 – Бифуркационные диаграммы и бифуркационные спектрограммы для параметров a и b системы Носе-Гувера, моделируемой с различными шагами интегрирования

На рис. 4.16 – 4.17 приведены s -диаграммы и s -спектрограммы, а также бифуркационные диаграммы и бифуркационные спектрограммы для параметров a , b и c диссипативной системы Рёсслера. Отметим существенные различия в динамике консервативной и диссипативной систем при изменении параметра. Влияние изменения симметрии на динамику диссипативной системы Рёсслера оказывается существенно меньшим, чем в случае консервативной системы Носе-Гувера. С учетом теоретической возможности атаки на защищенные системы связи, основанные на консервативных системах, с применением реконструкции фазового пространства методом обращения решения, можно сделать вывод о предпочтительности использования диссипативных систем в ХСС с модуляцией на основе симметрии.

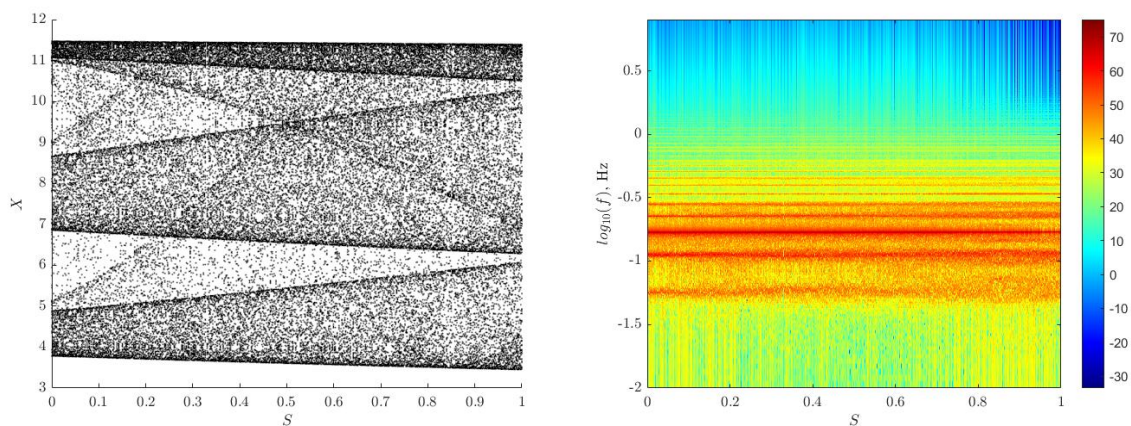
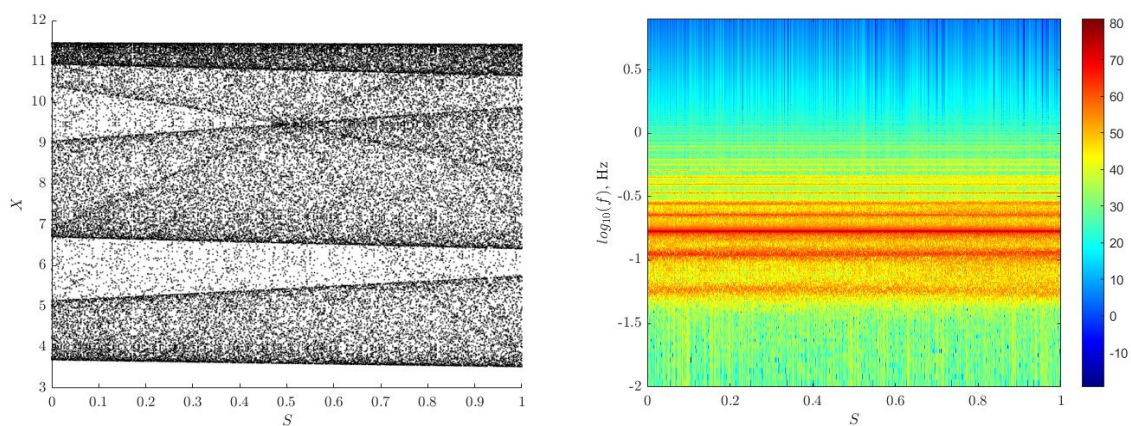
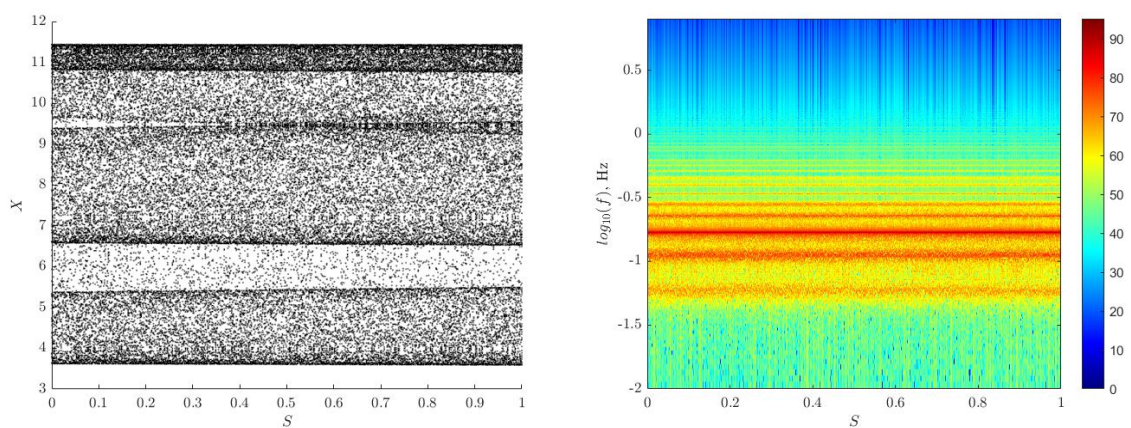
Шаг интегрирования $h = 0.01$ Шаг интегрирования $h = 0.005$ Шаг интегрирования $h = 0.001$

Рисунок 4.16 – s -диаграммы и s -спектрограммы системы Рёсслера, полученные при различных шагах интегрирования

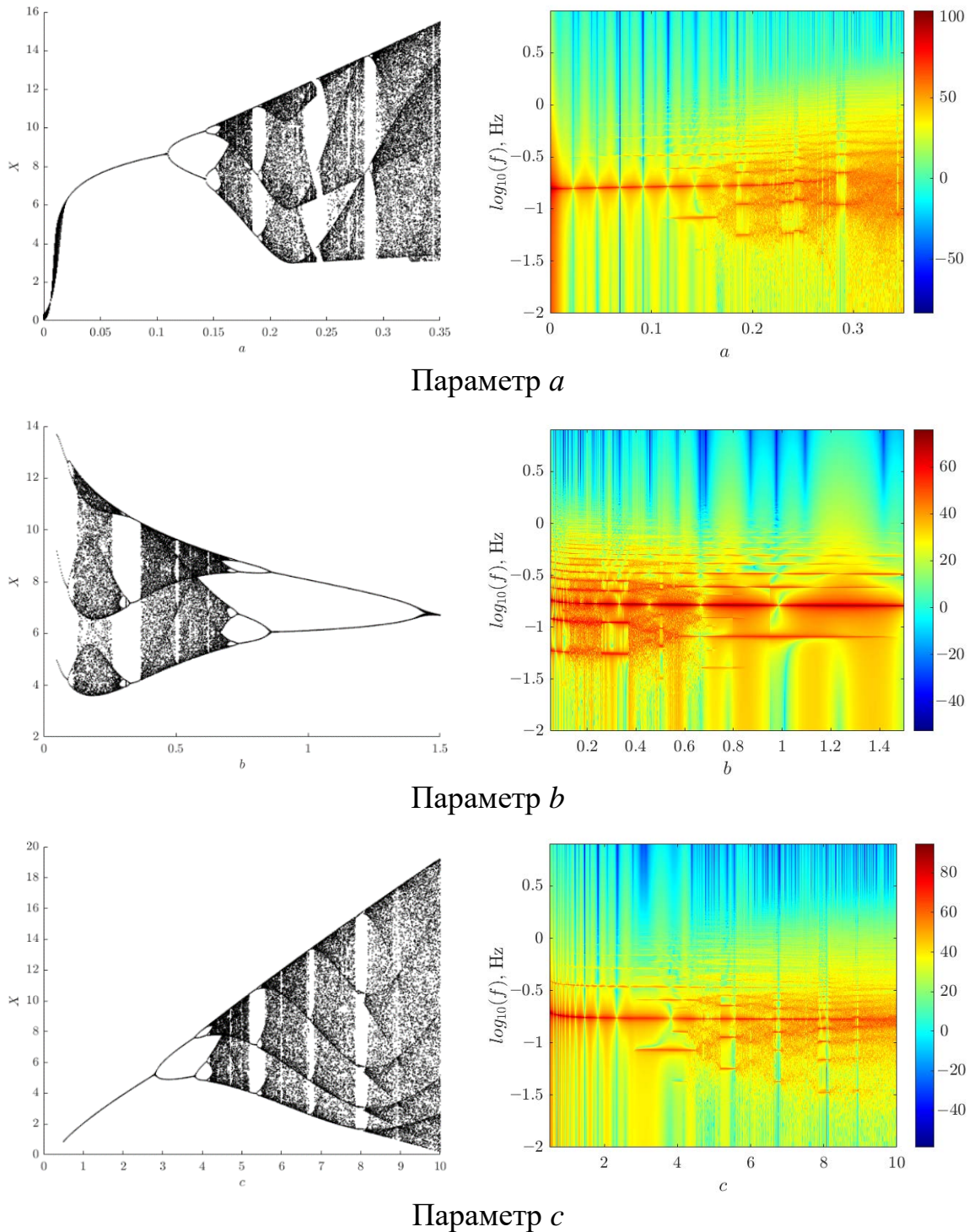


Рисунок 4.17 – Бифуркационные диаграммы и бифуркационные спектрограммы для параметров a , b и c системы Рёсслера, моделируемой с шагом интегрирования $h = 0.01$

Сравнивая бифуркационные диаграммы параметров для систем Носе-Гувера и Рёсслера, можно заметить, что изменение параметров каждой из моделей в значительной степени меняет динамику колебаний системы. Подобные изменения

могут быть обнаружены при атаке путем анализа частотных характеристик сигнала. Кроме того, исследуя s -спектрограмму дискретной системы Носе-Гувера, можно сделать вывод, что изменение коэффициента симметрии в более существенной степени меняет динамику системы, чем у для модели системы Рёсслера. Данный эффект наблюдается при разных шагах интегрирования, чего не происходит в случае системы Рёсслера. На s -спектрограммах осциллятора Рёсслера заметно, что при малых значениях шага интегрирования динамика поведения системы меняется незначительно, что позволяет предположить, что ХСС на основе диссипативных моделей с модуляцией коэффициента симметрии обладают меньшей различимостью.

4.3 Оптимизация параметров синхронизации в моделях хаотических систем связи

Рассмотрим применение созданного программного обеспечения для определения оптимального коэффициента синхронизации в моделях когерентных систем связи с модуляцией коэффициентом симметрии. С помощью данного программного обеспечения в рамках диссертационного исследования проведено две серии экспериментов. В первой серии экспериментов исследовался вопрос зависимости времени синхронизации от коэффициента синхронизации и коэффициента симметрии. Как будет показано, коэффициент симметрии не оказывает влияния на время синхронизации. Во второй серии экспериментов было проведено исследование зависимости времени синхронизации от коэффициента синхронизации и уровня шума в канале.

Двумерные графики зависимости времени синхронизации от коэффициента синхронизации и коэффициента симметрии для системы Рёсслера приведены на рис. 4.18, для системы Лоренца на рис. 4.19 [119]. Для изучения предложенного

метода было проведено моделирование ведущей и ведомой системы с шагом интегрирования $h = 0.01$ и $\varepsilon = 10^{-8}$ [75].

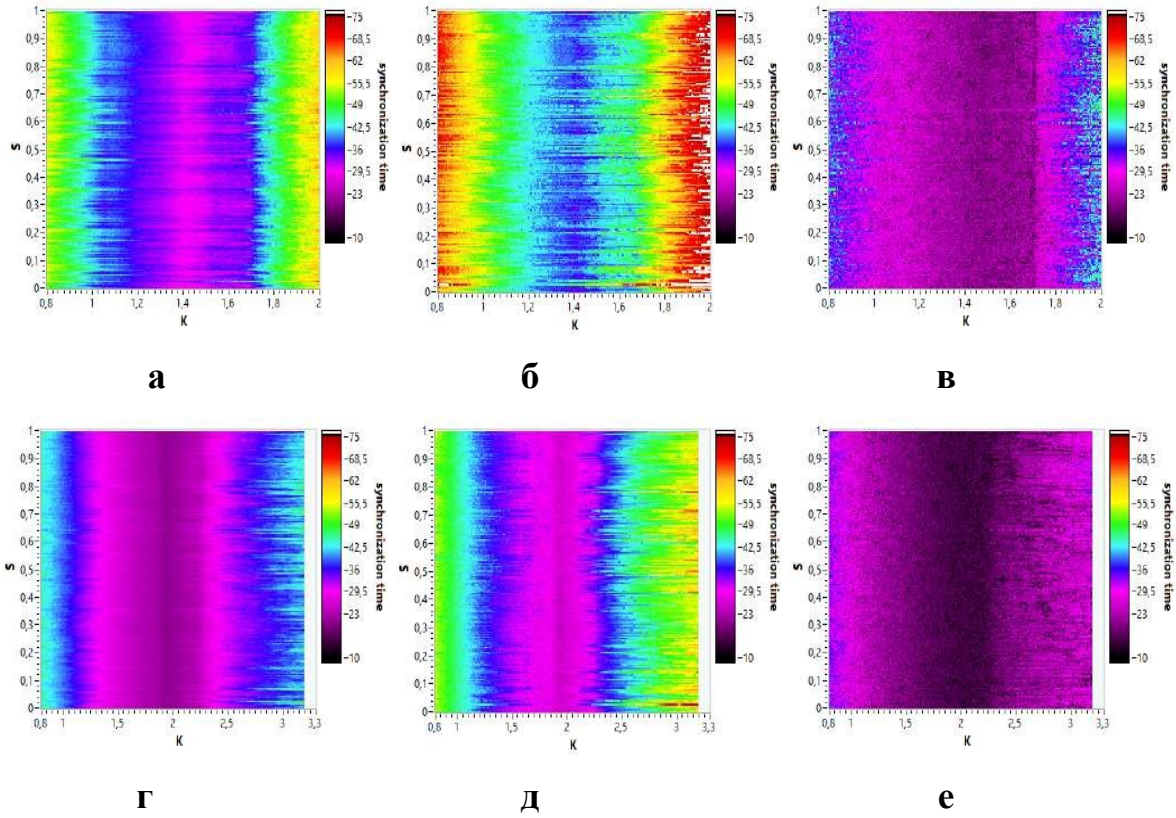


Рисунок 4.18 – Сравнение среднего, максимального и минимального времени синхронизации для переменной X (а, б, в) и переменной Y (г, д, е) системы Рёсслера [119]

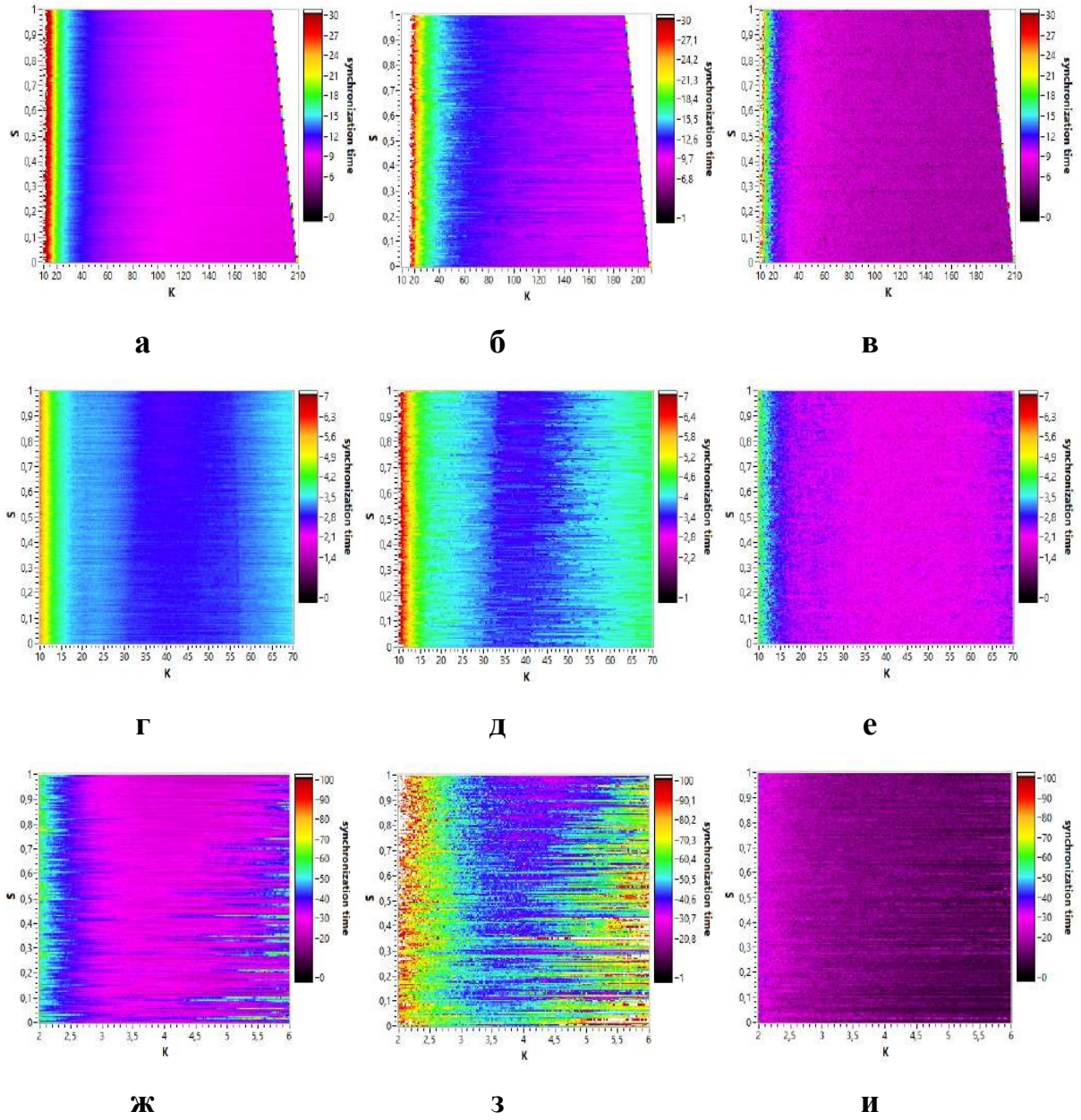


Рисунок 4.19 – Сравнение среднего, максимального и минимального времени синхронизации для переменной X (а, б, в), переменной Y (г, д, е) и переменной Z (ж, з, и) системы Лоренца [119]

Таблица 4.1 – Оптимальные значения коэффициентов синхронизации для систем Рёсслера и Лоренца [119]

	Переменная	Оптимальный коэффициент синхр.	Среднее время синхр., с.	Худший случай синхр., с.	Лучший случай синхр., с.
Система Рёсслера	X	1.40	29	44	14
	Y	1.93	23	30	7
Система Лоренца	X	188	9	12	3
	Y	40	2.8	4	2
	Z	3.5	29	50	12

Цвета графика соответствуют значениям времени синхронизации. Максимальное и минимальное время синхронизации отмечены красным и фиолетовым соответственно. Белым цветом выделены области, в которых синхронизация не была достигнута за 50 секунд моделирования для соответствующей пары коэффициентов симметрии и синхронизации. Черный цвет означает что время синхронизации составило менее 1 секунды.

Как следует из рис. 4.18-4.19, значение коэффициента симметрии практически не влияет на время синхронизации. По максимальному, минимальному и среднему значениям расчетного времени синхронизации можно сделать вывод, что оптимальное значение k для исследуемой системы равно 1.4, при этом коэффициент симметрии можно выбрать произвольно из интервала $[0; 1]$.

Результаты второй серии экспериментов по оценке оптимального значения коэффициента синхронизации с точки зрения минимального числа битовых ошибок при наличии шума в канале связи представлены на рис. 4.20.

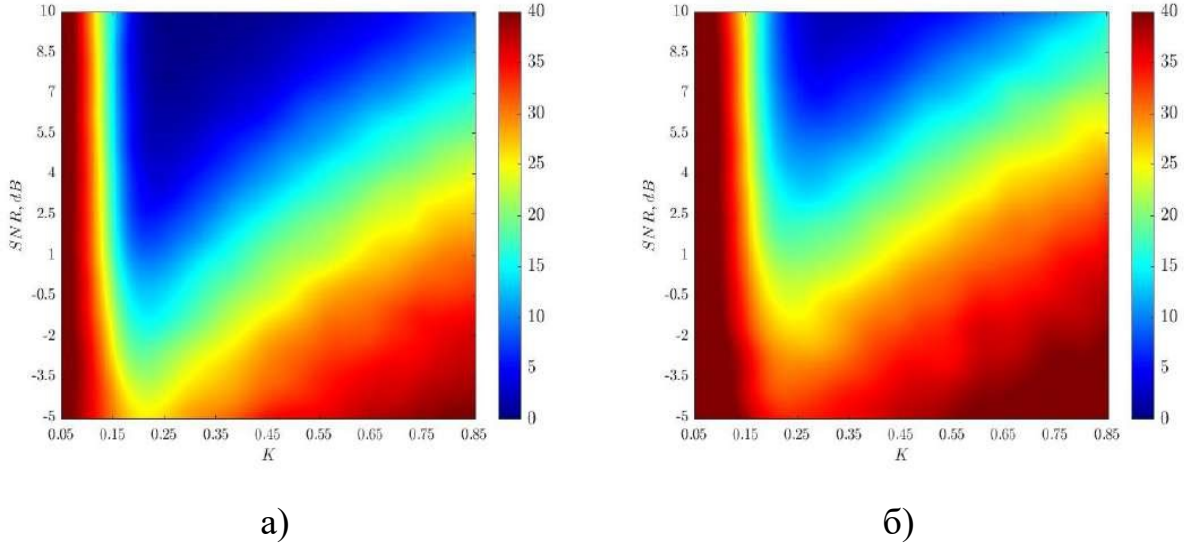


Рисунок 4.20 – Значение времени синхронизации в зависимости от коэффициента синхронизации и соотношения сигнал-шум при (а) 5000 отсчетов на символ (б) 2500 отсчетов на символ для системы Рёсслера, $h = 0.01$

Синхронизируем ведущую и ведомую системы, используя полученные оптимальные коэффициенты $k = 1.4$, $s = 0.5$.

Сравнение ошибок синхронизации, полученных при моделировании систем Рёсслера с различными значениями k , показано на рис. 4.21. Видно, что найденный ранее оптимальный коэффициент синхронизации действительно обеспечивает минимальное время синхронизации.

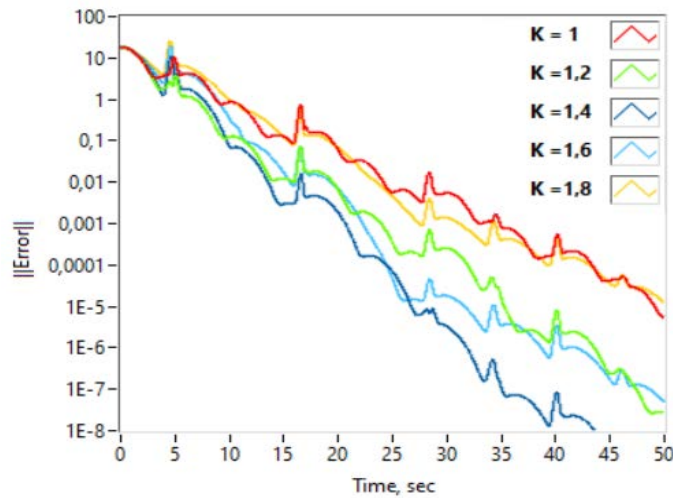


Рисунок 4.21 – Нормы ошибок синхронизации для разных коэффициентов симметрии [75]

Для минимизации времени синхронизации было предложено использовать оптимизацию выбора значений коэффициентов симметрии и синхронизации. Предлагаемая методика включает оценку набора начальных условий и вычисление среднего, максимального и минимального времени синхронизации для различных пар параметров синхронизации. Результаты экспериментов показали, что полученные значения коэффициентов позволяют достичь полной синхронизации быстрее, чем все остальные значения. Более того, было обнаружено, что коэффициент симметрии практически не влияет на время синхронизации по сравнению с коэффициентом синхронизации.

Модуляция коэффициента симметрии в адаптивных хаотических моделях может быть менее различимой по сравнению с традиционным подходом, основанным на параметрах нелинейности.

4.4 Исследование и оценка пропускной способности канала в моделях хаотических систем связи

В данном подразделе описаны эксперименты по оценке пропускной способности канала связи моделируемой ХСС с использованием разработанного в диссертационном исследовании программного обеспечения и моделей генераторов хаотических сигналов.

Путем выбора разных значений порога точности синхронизации Δx и разницы между значениями коэффициента симметрии ΔS , был получен график, показанный на рисунке 4.22. Шум в данных появляется из-за влияния начальных условий в момент начала синхронизации. Таким образом, разброс значений в каждой последовательности показывает наилучший и наихудший случай по времени синхронизации.

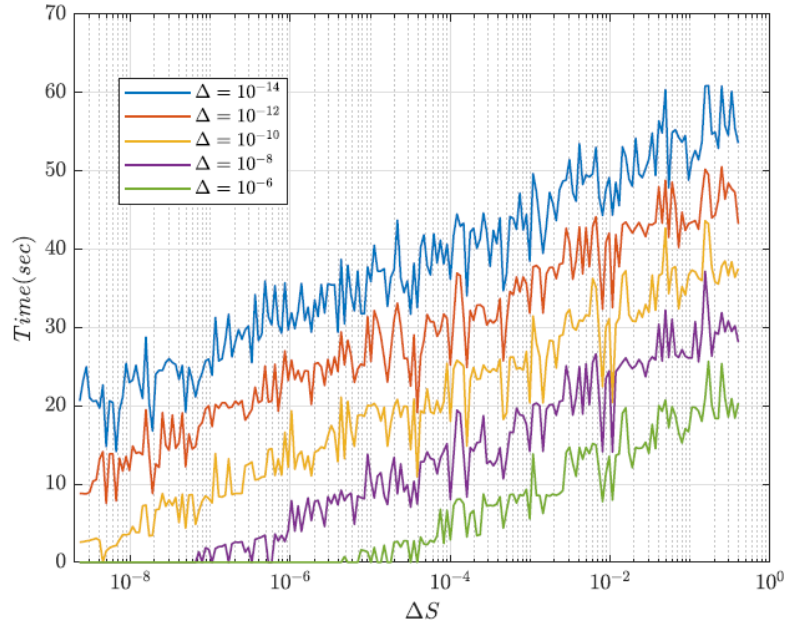


Рисунок 4.22 – Зависимость времени синхронизации от пороговой ошибки синхронизации Δx [82].

Обобщим полученные результаты в таблице 4.2. Принцип заполнения этой таблицы таков: берется наихудшее из достигнутых времен синхронизации для данного ΔS при шаге по времени $h = 0.01$, и находится соответствующее количество отсчетов с оценкой времени, необходимого для передачи этих отсчетов при частоте дискретизации 1 ГГц. Полученная таблица приблизительно показывает некоторые реалистичные скорости передачи данных, которые возможны при использовании модуляции на основе изменения коэффициента симметрии с использованием двоичного алфавита.

Таблица 4.2 – Зависимость скорости передачи двоичных данных от разности коэффициентов симметрии при заданной минимальной ошибке синхронизации $\Delta x = 10^{-6}$ ($f_{\text{samp}} = 1$ ГГц).

ΔS	Скорость передачи, Мбит/с.
0.1	0.4
0.01	0.5
0.001	0.666

Приведенные в таблице 4.2 данные позволяют проектировщику ХСС выбрать разность между коэффициентами симметрии, соответствующими различным битам передаваемого сообщения.

4.5 Исследование свойств моделируемой ХСС с точки зрения помехозащищенности

Важной характеристикой ХСС является помехозащищенность. Созданные в рамках диссертационного исследования инструменты оценки помехозащищенности были описаны в разделе 3.7. В данном разделе изложены результаты практической апробации созданного инструментария моделирования при оценке помехозащищенности моделей ХСС.

Рассмотрим передачу тестового сообщения длиной 1500 символов в ХСС при различном уровне шума в канале связи. На рис. 4.23–4.26 показаны результаты экспериментов по исследованию интенсивности битовых ошибок при различных уровнях шума и различных модулируемых коэффициентах симметрии. Моделирование выполнялось с шагом интегрирования $h = 0.01$ для обеих хаотических систем.

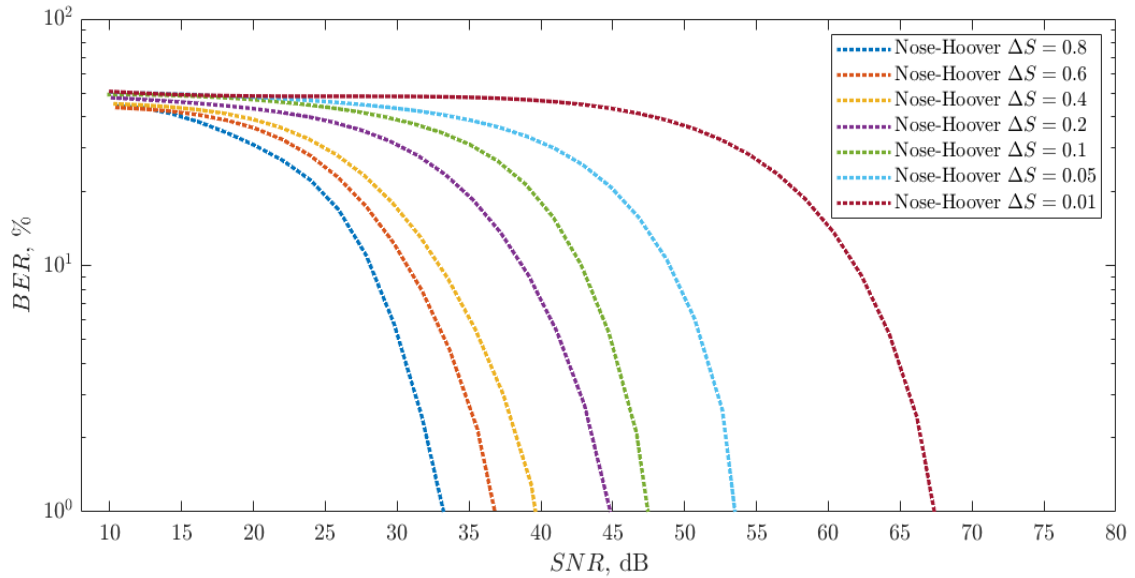


Рисунок 4.23 – Интенсивность битовых ошибок при различных уровнях шума и различных моделируемых коэффициентах симметрии для ХСС на основе системы Носе-Гувера

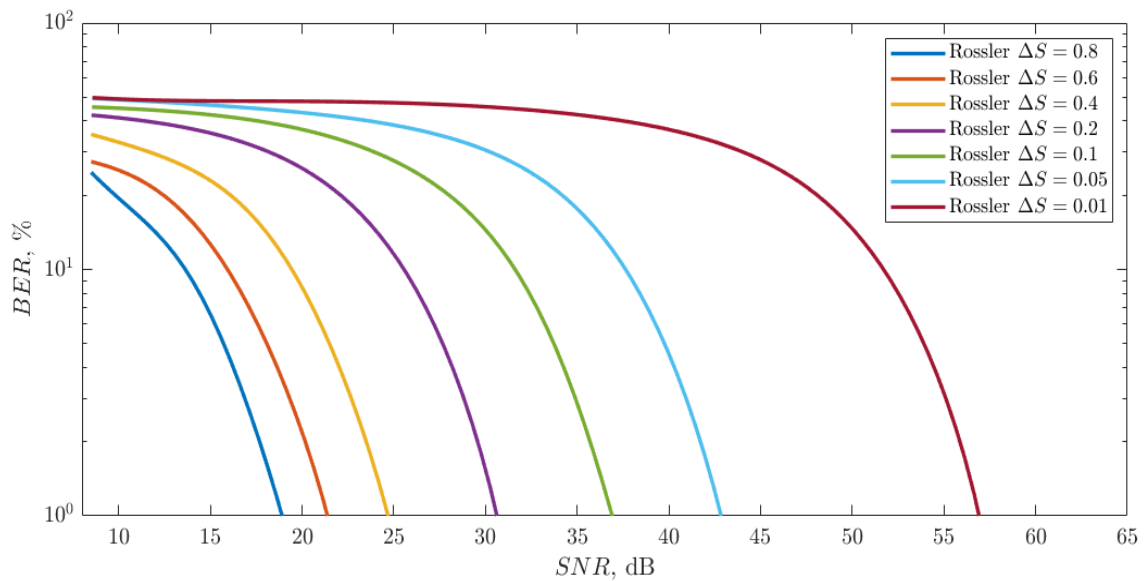


Рисунок 4.24 – Интенсивность битовых ошибок при различных уровнях шума и различных моделируемых коэффициентах симметрии для ХСС на основе системы Рёсслера

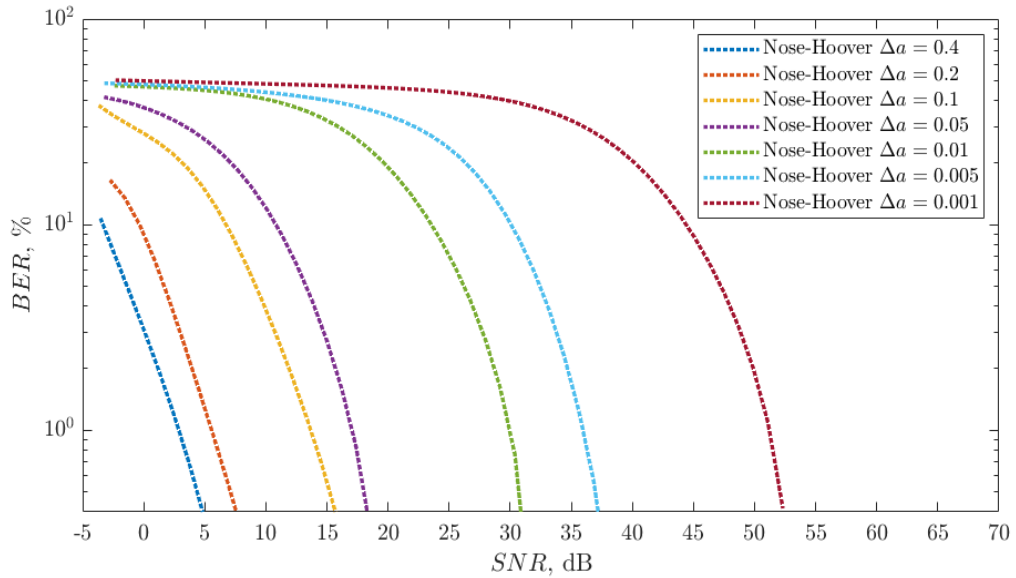


Рисунок 4.25 – Интенсивность битовых ошибок при различных уровнях шума и различных моделируемых параметрах для ХСС на основе системы Носе-Гувера

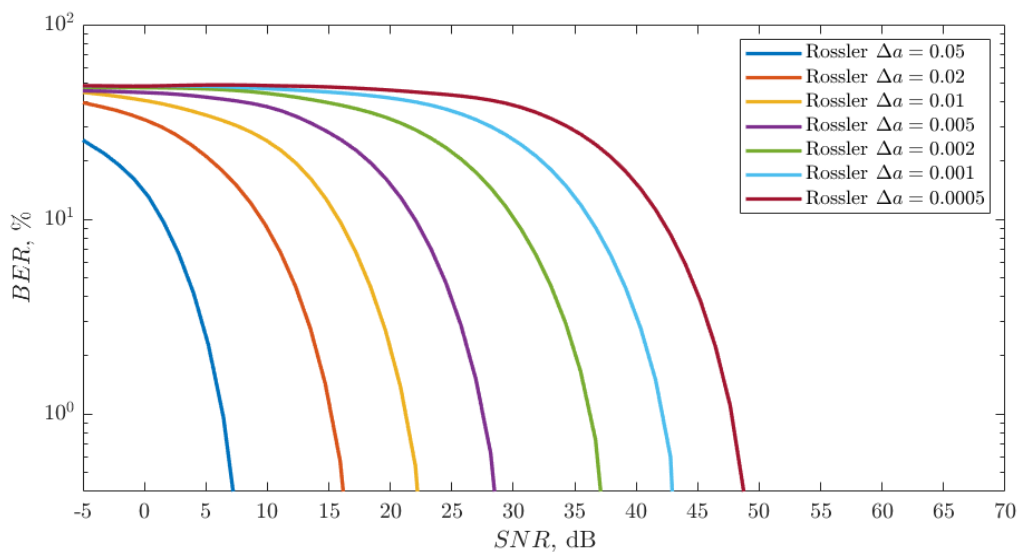


Рисунок 4.26 – Интенсивность битовых ошибок при различных уровнях шума и различных моделируемых параметрах для ХСС на основе системы Рёсслера

В результате экспериментального исследования было выявлено, что ХСС с модуляцией коэффициента симметрии на основе системы Рёсслера оказалась менее чувствительна к шуму в канале связи, чем ХСС на основе системы Носе-Гувера. При применении системы Рёсслера обеспечивается безошибочная передача сообщений при SNR (отношении сигнал/шум) на 11–15 дБ ниже, чем при использовании системы Носе-Гувера, в зависимости от того, насколько отличаются

коэффициенты симметрии, соответствующие передаваемым символам. В тоже время, в случае ХСС с модуляцией параметра значительных преимуществ от использования консервативной или диссипативной системы выявлено не было. Также стоит заметить, что ХСС с модуляцией по параметру обеспечивается безошибочная передача сообщений при SNR на 15–25 дБ ниже, чем в случае ХСС с модуляцией коэффициента симметрии. Однако стоит учесть, что такое преимущество в устойчивости к шуму достигается за счет значительного изменения динамики систем при переключении в передатчике параметра системы, которое может быть распознано методами спектрального анализа. В случае ХСС с модуляцией коэффициента симметрии, происходит незначительное изменение динамики при переключении адаптивного коэффициента, что обеспечивает более безопасную передачу информации. Таким образом, предлагаемый инструментарий моделирования ХСС позволяет выбрать оптимальные решения с точки зрения базовой хаотической системы, настройки параметров симметрии и синхронизации.

4.6 Анализ разработанных инструментов оценки различимости сигналов

Одним из этапов создания ХСС является проведение теоретической и экспериментальной оценки различимости сигналов при модуляции. Инструменты оценки различимости, предложенные в диссертации, были описаны в разделе 3.7. В настоящем разделе приведены некоторые результаты экспериментов с использованием разработанного программного обеспечения.

4.6.1 Спектральный анализ

Пример раскрытия передаваемого сообщения путем оценки различимости сигналов для хаотической системы связи, реализованную методом параметрической модуляции показан на рисунке 4.27.

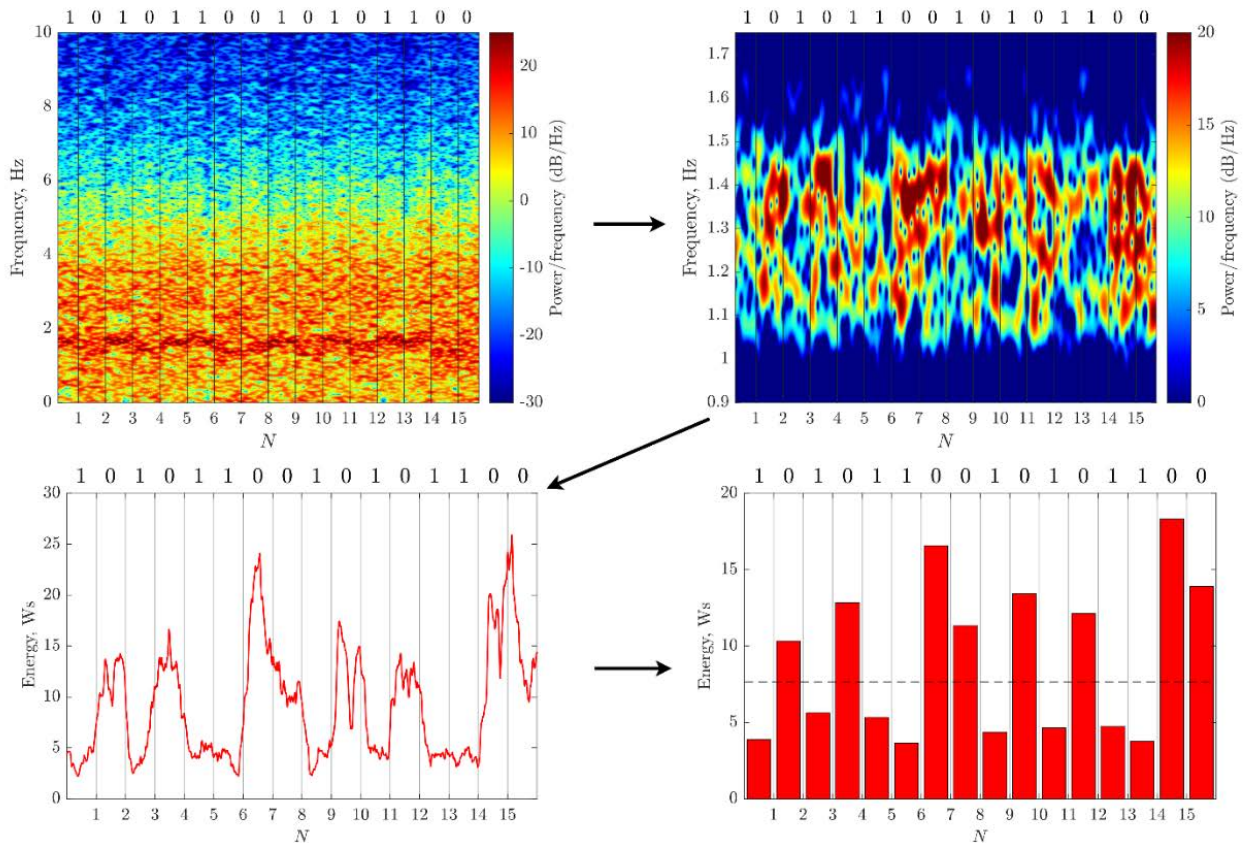


Рисунок 4.27 – Этапы атаки на ХСС с помощью спектрального анализа [108]

На данном примере видно, что спектр сигнала при передаче бинарного сообщения длиной 16 символов не имеет особых паттернов, которые можно выделить невооружённым глазом. Однако, если с помощью полосового фильтра выделить полосу частот и провести расчет энергии уже отфильтрованного сигнала, то на основании полученных результатов можно расшифровать передаваемое сообщение.

4.6.2 Рекуррентный анализ

На рис. 4.28 представлен разработанный алгоритм рекуррентного анализа хаотических сигналов и результаты его применения для случая, когда логические 0 и 1 кодируются парой параметров $a = \{0.2, 0.3\}$.

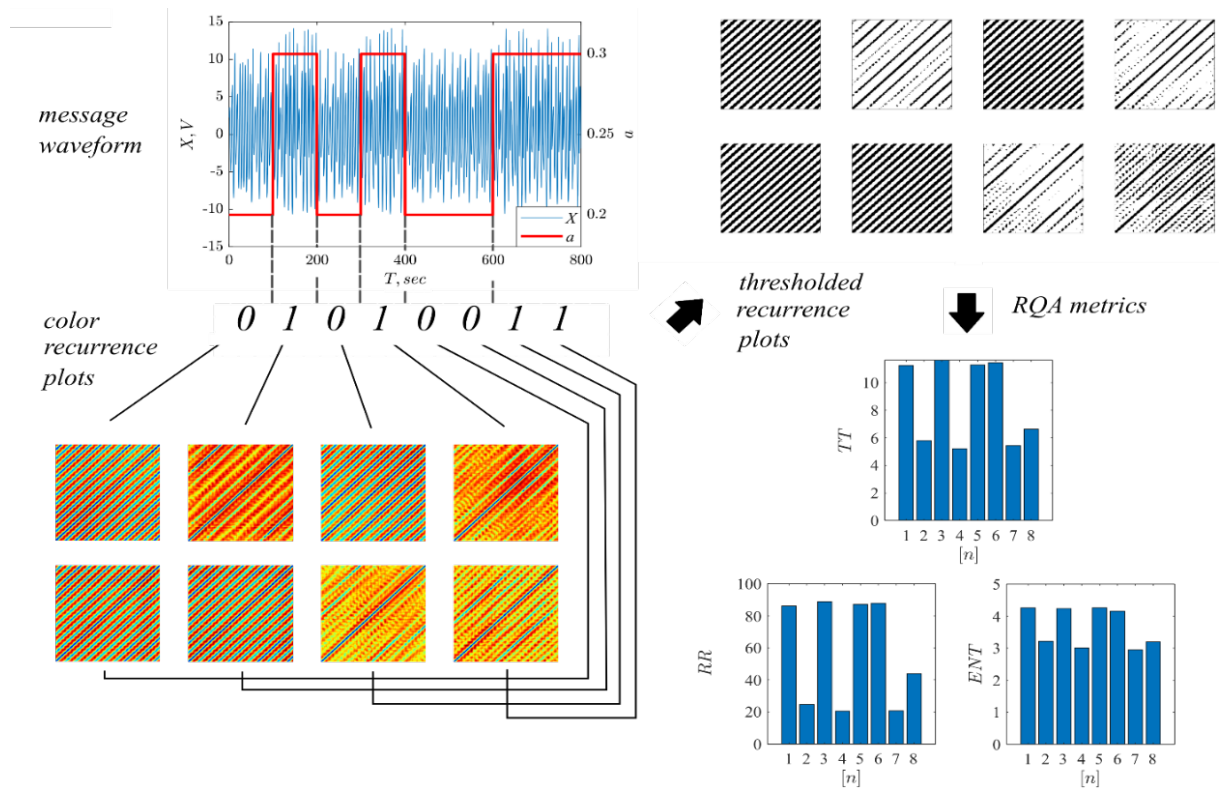


Рисунок 4.28 – Расшифровка сообщения хаотической системы связи с помощью оконного количественного анализа повторяемости [111]

В случае параметрической модуляции (рис. 4.28) можно отметить, что разница сигналов при передаче различных символов заметна. Более того, если спектрограммы для пары параметров $a = \{0.27, 0.3\}$ практически неразличимы (рис. 4.29), то с помощью РКА можно различить символы даже при различии $\Delta a = 0.01$, см. рис. 4.33.

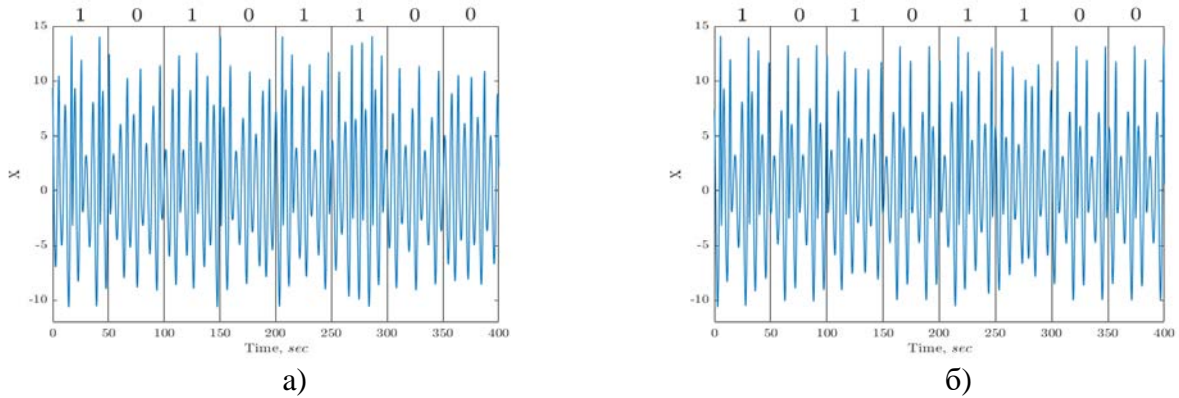


Рисунок 4.29 – На этом графике показана разница между усредненным значением метрики для символа 0 и символа 1. С увеличением длины передаваемого символа эта разница увеличивается (рис. 4.30б), а значит, повышается и достоверность распознавания [111]

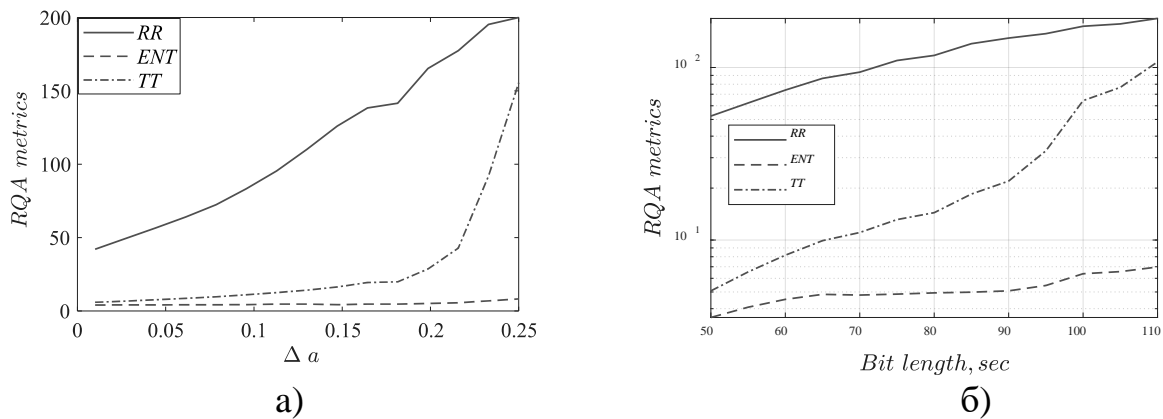


Рисунок 4.30 – Зависимость метрик рекуррентного анализа от: а) разницы в значении параметра модуляции и б) длительности передачи одного бита [111].

Результаты экспериментов по применению рекуррентного анализа для атаки на когерентные системы связи показали потенциальную применимость этого подхода. Наиболее чувствительными метриками анализа оказались энтропия и время захвата.

4.6.3 Экспериментальная оценка средств анализа на основе численных возвратных преобразований

В разделе описаны эксперименты с программными средствами, основанными на новой модификации алгоритма возвратных преобразований, позволяющей получить численную оценку различимости сигналов при модуляции для разрабатываемой системы связи.

Входными параметрами настройки QRMA являются разрешение двумерных гистограмм N ($N \times N$) и ϵ – порог отсекаения единичных точек, влияющих на вычисление разницы между двумерными гистограммами. Оценка влияния параметров ϵ и N представлена на рисунках 4.31 и 4.32, соответственно.

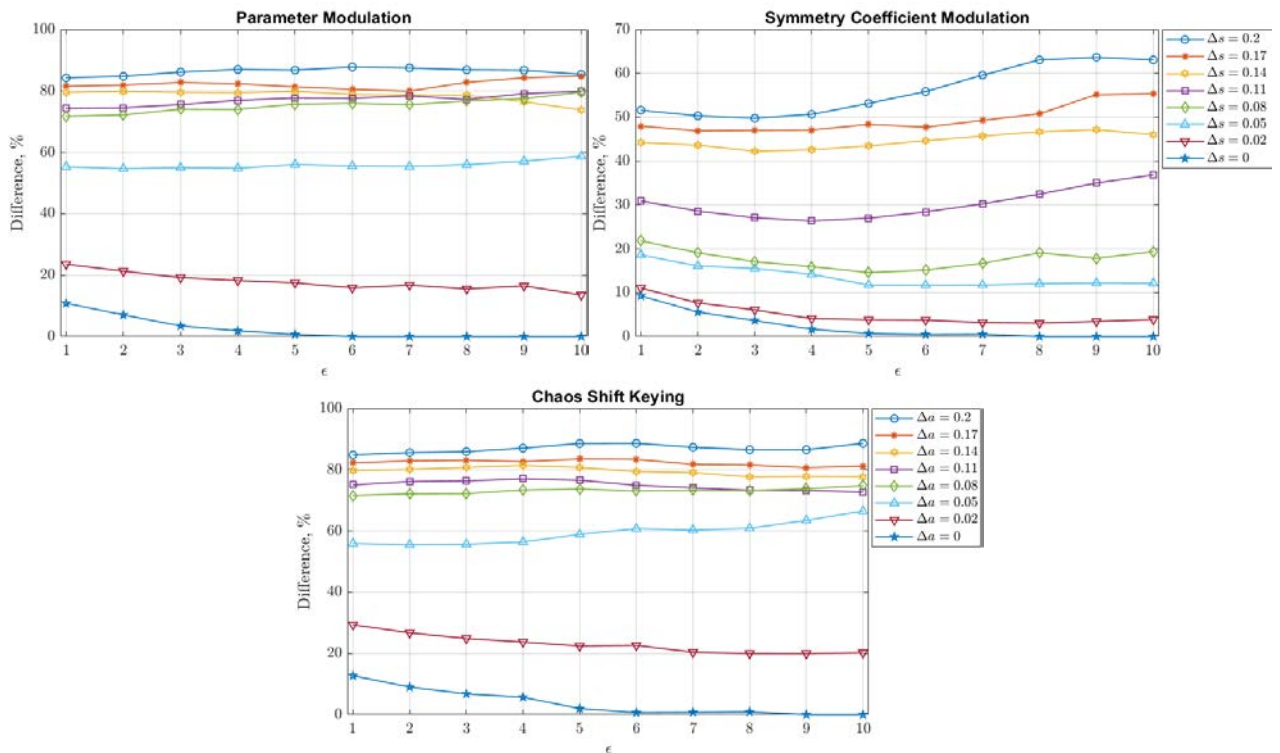


Рисунок 4.31 – Влияние параметра ϵ на расчетное значение разницы между сигналами [108]

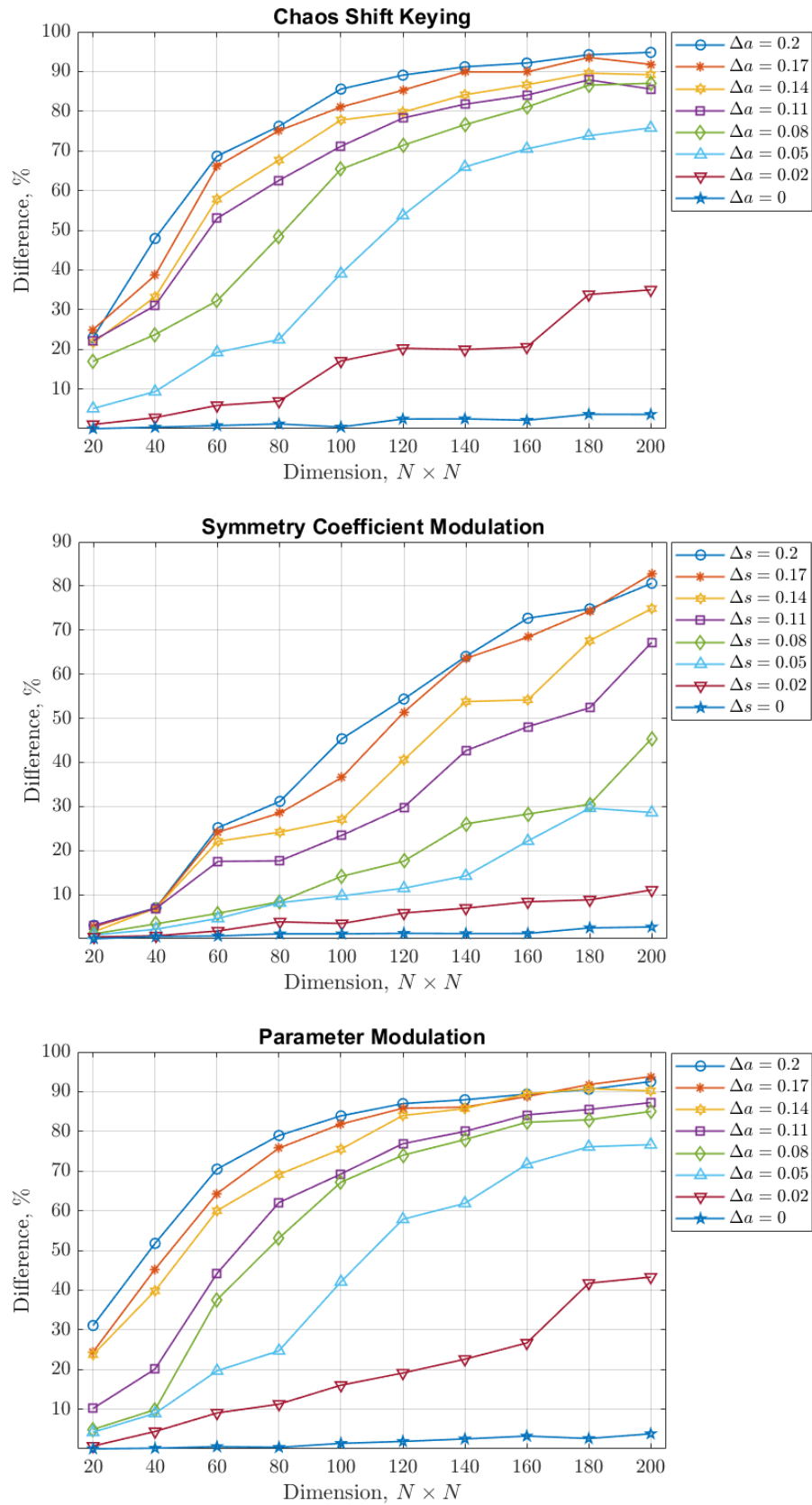


Рисунок 4.32 – Влияние разрешения диаграмм на расчетное значение разницы между сигналами [108]

Увеличение значения ϵ снижает чувствительность количественного расчета разницы к наличию случайных выборок, шума или преднамеренного размытия сигнала. В тоже время чувствительность метода можно варьировать путем изменения разрешения двумерных гистограмм. Стоит отметить, что для качественного проведения анализа необходимо правильно подбирать значения ϵ и разрешения диаграмм, т.к. может наблюдаться довольно высокое значение разницы между двумерными гистограммами на относительно больших отрезках сигнала с одинаковыми наборами параметров и коэффициентами симметрии. В дальнейших экспериментальных исследованиях значение установлено равным $\epsilon = 3$, а разрешение диаграмм составляет 120×120 пикселей.

4.6.4 Сравнение метрик оценки различимости сигналов хаотических систем связи

С целью апробации инструментов оценки ХСС были смоделированы атаки на системы связи с модуляцией типа CSK, PM и SCM. В качестве методов атаки выбраны алгоритмы QRMA, RQA и спектральный анализ.

На рис. 4.33 – 4.35 приведены графики, показывающие расчетное значение разницы между сигналами в момент передачи разных символов. На данных графиках по оси X отложена разница между модулирующими параметрами Δa (CSK, PM) или коэффициентами симметрии Δs (SCM), а по оси Y – значение соответствующей метрики.

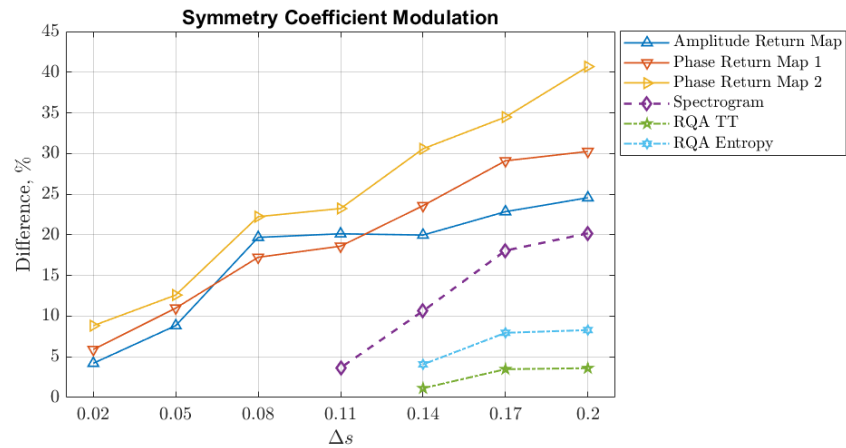


Рисунок 4.33 – Сравнение эффективности атак QRMA, RQA и спектрального анализа на ХСС на основе модуляции коэффициента симметрии [108]

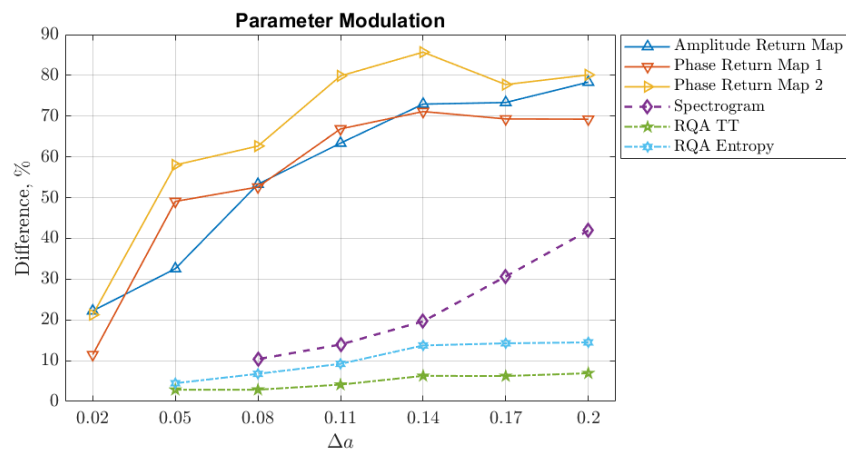


Рисунок 4.34 – Сравнение эффективности атак QRMA, RQA и спектрального анализа на ХСС на основе PM [108]

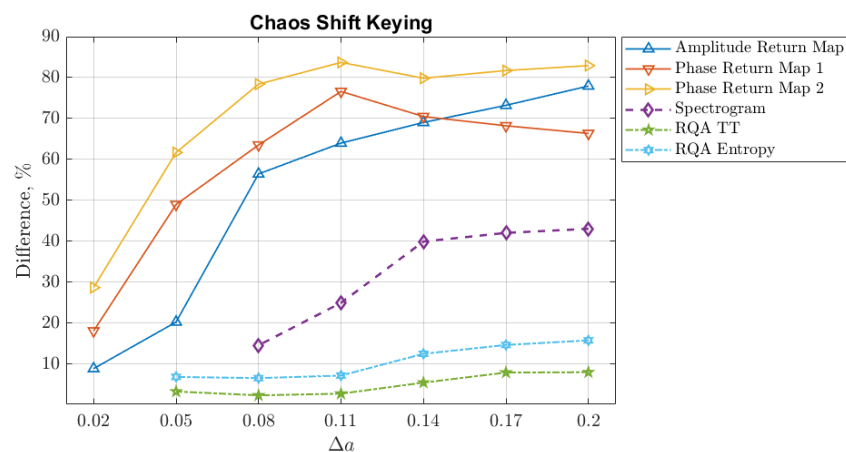


Рисунок 4.35 – Сравнение эффективности атак QRMA, RQA и спектрального анализа на ХСС на основе CSK [108]

Согласно экспериментальным результатам, предлагаемый в настоящей работе способ атаки когерентных ХСС на основе численной оценки возвратных преобразований является наиболее чувствительным и эффективным. Детальное сравнение методов атаки подробно представлено в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Сравнение различных способов атаки

Метод атаки	Метод модуляции и	Разница при значении $\Delta a/\Delta s = 0.2$	Преимущество фазового QRMA при анализе максимумов и минимумов, раз
Амплитудный QRMA	CSK	77.93	1.07
	PM	78.32	1.02
	SCM	24.56	1.66
Фазовый QRMA при анализе соседних экстремумов	CSK	66.33	1.25
	PM	69.25	1.16
	SCM	30.25	1.35
Фазовый QRMA при анализе максимумов и минимумов	CSK	82.93	—
	PM	80.12	—
	SCM	40.69	—
Спектральный анализ	CSK	43.02	1.93
	PM	41.92	1.91
	SCM	20.19	2.02
Время захвата, рекуррентный анализ	CSK	7.95	10.43
	PM	6.92	11.58
	SCM	3.6	11.16
Энтропия, рекуррентный анализ	CSK	15.73	5.27
	PM	14.49	5.53
	SCM	8.29	4.9

Сравнение показало, что метод QRMA обладает наибольшей чувствительностью, в то время как модуляция на основе симметрии является наиболее устойчивой ко всем типам атак, что подтверждает теоретические положения работы.

4.6.5 Сравнение способов модуляции когерентных хаотических систем связи

Важнейшим элементом исследования является экспериментальное сравнение разработанного способа модуляции хаотических сигналов с известными. Напомним, что для хаотических когерентных систем связи в основном применяется два основных типа модуляции – параметрическая модуляция и переключение хаотических режимов, для которых также можно оценить различимость сигналов при модуляции. При параметрической модуляции информационный сигнал влияет на значения параметров хаотического генератора на стороне передатчика, в тоже время при переключении хаотических режимов в зависимости от значения бита информационного сигнала происходит перекоммутация между несколькими разными хаотическими генераторами на стороне передатчика. Сравнение различимости сигналов для разных способов модуляции показаны на рисунках 4.36-4.38.

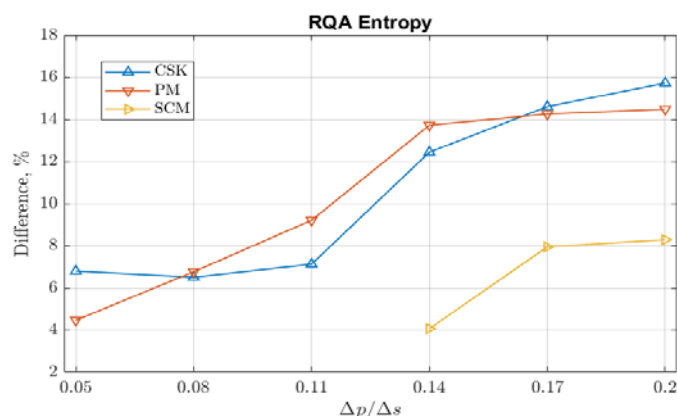


Рисунок 4.36 – Сравнение различимости сигналов при различных способах модуляции с применением энтропии возвратного преобразования [108]

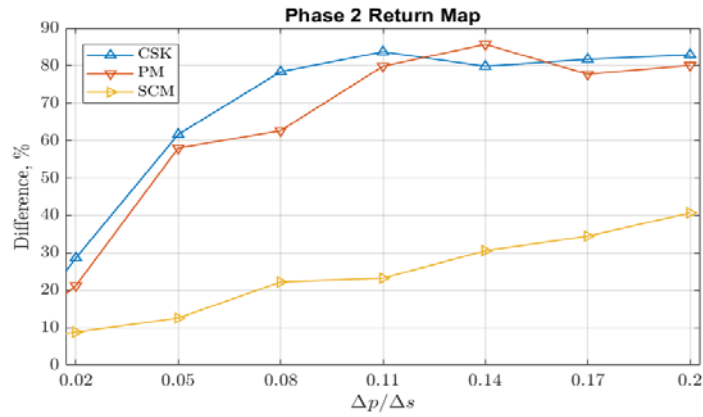


Рисунок 4.37 – Сравнение различимости сигналов при различных способах модуляции с использованием анализа фазовых численных возвратных преобразований [108]

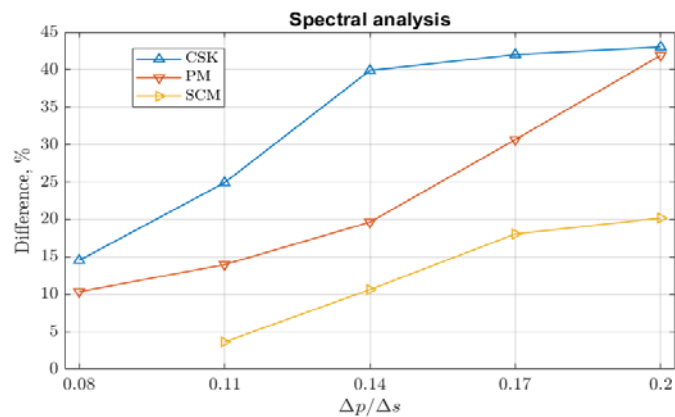


Рисунок 4.38 – Сравнение различимости сигналов при различных способах модуляции с использованием спектрального анализа [108]

Проведенные эксперименты подтверждают, что предлагаемый в настоящей работе способ модуляции на основе управления симметрии конечно-разностной схемы позволяет создать способ передачи данных в ХСС с меньшей различимостью модулируемого сигнала. Установлено, что предложенный способ модуляции на основе управляемой симметрии конечно-разностных схем обеспечивает на 10-15% более низкую различимость сигналов при оценке с использованием метрик спектрального и рекуррентного анализа, и на 40-50% при оценке методами численных возвратных преобразований. Также стоит отметить, что при малых разбросах значений моделируемых параметров/коэффициентов симметрии оценить различимость сигналов с использованием рекуррентного и

спектрального анализа не удалось. Т.е., при малом разбросе значений параметров/коэффициентов синхронизации данные способы атаки на ХСС становятся неэффективными. При этом предлагаемый алгоритм анализ на основе численных возвратных преобразований продемонстрировал более высокую чувствительность и позволяет различать такие сигналы, что подтверждает перспективность применения данного подхода. Детальное сравнение методов модуляции, исследованных в работе, подробно представлено в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Сравнение различимости сигналов для различных способов модуляции [108]

Метод атаки	Вид модуляции	Разница при Δa или $\Delta s = 0.2$	Преимущество SCM, раз
Фазовый QRMA	CSK	82.93	2.04
	PM	80.12	1.97
	SCM	40.69	–
Спектральный анализ	CSK	43.02	2.13
	PM	41.92	2.08
	SCM	20.19	–
Время захвата при рекуррентном анализе	CSK	15.73	1.89
	PM	14.49	1.75
	SCM	8.29	–

Результаты экспериментов показали перспективность предлагаемого в диссертации способа модуляции для построения когерентных ХСС. Способ модуляции на основе изменения симметрии конечно-разностной схемы показывает более высокие показатели защищенности по сравнению с модуляцией параметра бифуркации и переключением хаотических режимов. В то же время, полученные результаты необходимо проверить с точки зрения помехозащищенности, оценив исследуемые способы модуляции при одинаковом уровне помехоустойчивости систем, что описано в разделе 4.7.

4.7 Плоскость COVERTY-BER как инструмент оценки помехоустойчивости хаотических систем связи

Одним из способов оценки характеристик ХСС является метрика COVERTY-BER, отражающая число битовых ошибок от различимости сигналов. Используем данную метрику для оценки характеристик предлагаемых решений в области генерации и модуляции хаотических сигналов.

На рис. 4.39 приведены графики различимость-помехоустойчивость для модели системы связи на основе генераторов хаотических колебаний, полученных дискретизацией системы Рёсслера полуявными численными методами с управляемой симметрией. При соотношении сигнал/шум от 10 до 25 дБ модуляция по коэффициенту симметрии оказывается значительно более эффективной: несмотря на низкую различимость модуляции по параметру для заданных значений параметров, при таких условиях прочитать сообщения из-за высокого числа битовых ошибок практически невозможно.

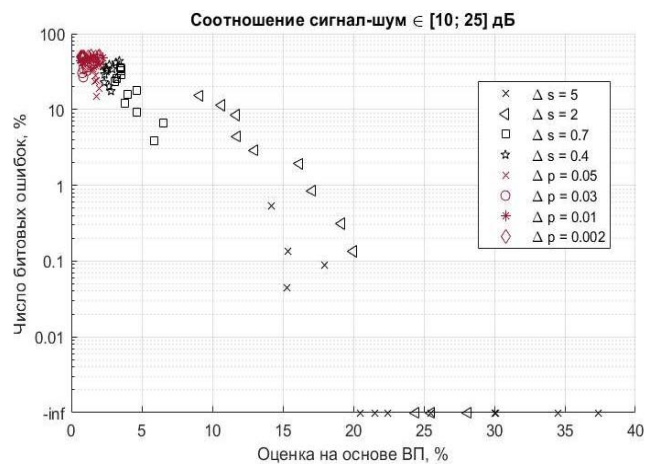


Рисунок 4.39 – Зависимость различимости и помехоустойчивости для системы связи на основе дискретизированной системы Рёсслера при SNR от 10 до 25 дБ

При соотношении сигнал-шум от 25 до 40 дБ ситуация меняется: некоторые значения разности параметров при модуляции параметра s приводят к достижению меньшей различимости при приемлемом (очень низком) числе битовых ошибок.

При этом, однако, нулевой процент битовых ошибок возможен только при модуляции по коэффициенту симметрии.

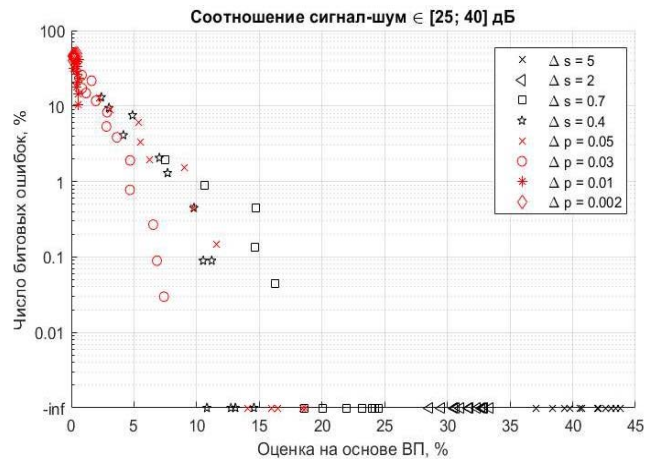


Рисунок 4.40 – Зависимость различимости-помехоустойчивости для системы связи на основе дискретизированной системы Ресслера при SNR от 25 до 40 дБ

При использовании в качестве основы ХСС консервативных систем, таких как система Носе-Гувера, также наблюдается преимущество модуляции по коэффициенту симметрии над модуляцией по параметру. Графики различимости и помехоустойчивости для системы связи на основе дискретной хаотической системы Носе-Гувера полученной с помощью полуявных численных методов интегрирования с управляемой симметрией приведены на рис. 4.41.

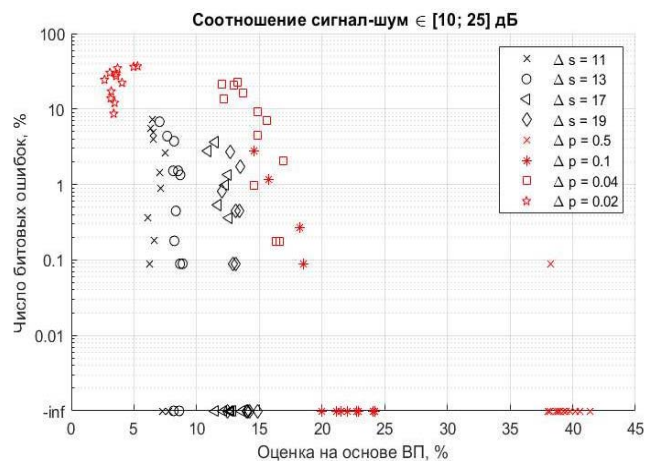


Рисунок 4.41 – Зависимость различимости и помехоустойчивости для системы связи на основе дискретизированной системы Носе-Гувера при SNR от 10 до

25 дБ

Анализируя экспериментальные результаты анализа двух моделей ХСС, полученных дискретизацией непрерывных систем Рёсслера и Носе-Гувера с управляемой симметрией, можно сделать вывод об определенных преимуществах консервативных систем перед диссипативными при построении ХСС. Используя генератор хаоса на основе системы Носе-Гувера можно добиться очень малой различимости сигналов при модуляции при нулевом числе битовых ошибок в условиях соотношения сигнал шум 10-25 дБ. Это проиллюстрировано на рисунке 4.42.

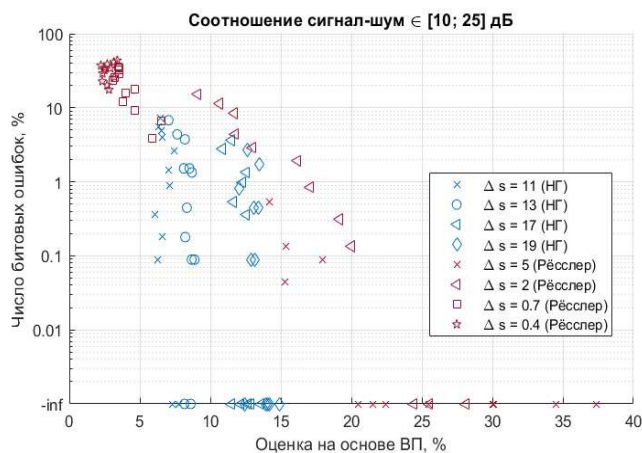


Рисунок 4.42 – Сравнение отношений различимости и помехоустойчивости для систем связи на основе дискретизированных систем Носе-Гувера (НГ) и Рёсслера

4.8 Выводы по главе

Экспериментальные исследования имитационных и полунатурных моделей ХСС, описанные в последней главе диссертации, показывают что использование генераторов хаотических сигналов на основе консервативных систем, дискретизированных полужавными численными методами интегрирования, а также нового способа модуляции хаотических сигналов через управление коэффициентом симметрии конечно-разностной схемы позволяет добиться наилучших результатов с точки зрения минимизации числа битовых ошибок и

снижения различимости сигналов при модуляции по сравнению с применением диссипативных систем и параметрической модуляции. По результатам проведенных экспериментов также можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что коэффициент симметрии конечно-разностной модели не оказывает существенного влияния на скорость синхронизации, что позволяет использовать практически любые значения данного коэффициента при реализации генераторов хаотических сигналов в составе ХСС.

2. Показано, что коэффициент синхронизации оказывает существенное влияние на производительность системы связи. Обнаружено, что при наличии в системе связи шума оптимальный коэффициент синхронизации отличается от такового для случая, когда шум отсутствует.

Разработанные в диссертационном исследовании методы и алгоритмы оптимизации коэффициентов синхронизации позволяют определить оптимальные параметры синхронизации, что может значительно увеличить скорость передачи сообщений. В то же время с помощью созданного ПО удалось выявить наиболее подходящие параметры синхронизации с точки зрения целостности передачи данных наиболее скрытные наборы параметров для модуляции в условиях одинаковой устойчивости к шуму в канале связи.

Обобщая вышеизложенное, можно отметить, что благодаря предлагаемому математическому и программному обеспечению генераторов хаотических сигналов с новым способом модуляции возможно улучшить характеристики перспективных ХСС.

В рамках экспериментальных работ получены следующие результаты:

1. Разработан и исследован набор компьютерных моделей генераторов хаотических колебаний на основе конечно-разностных схем хаотических систем с управляемой симметрией. Построенные исполняемые модели реализованы, в том числе, в арифметике с фиксированной запятой при различной длине машинного слова. Продемонстрировано сохранение режимов колебаний при масштабировании конечно-разностной схемы к заданному типу данных.

2. Протестирована производительность предложенных типовых генераторов и приемников ХСС (критерии – число битовых ошибок, различимость сигналов, оцениваемая методом возвратных преобразований) в условиях цифрового шума, порождаемого АЦП-ЦАП, и аддитивного шума в канале передачи данных. Установлено, что разрядность АЦП-ЦАП на уровне 12 бит существенно снижает производительность ХСС при заданных условиях, однако начиная с разрядности 14 бит, производительность улучшается. В то же время применять более высокоразрядные ЦАП-АЦП практически нецелесообразно. При разрядности 24 бита поведение ХСС не отличается от производительности аналогичной системы, реализованной с типом данных double.

3. С помощью предложенных моделей и нового способа модуляции хаотических сигналов был реализован прототип хаотической системы связи на основе хаотической системы Рёсслера, осуществляющий модуляцию сигнала с помощью управляемой симметрии конечно-разностной схемы. Проведенные эксперименты и оценка основных характеристик ХСС подтверждают основные теоретические положения диссертационного исследования и наглядно демонстрируют преимущества предлагаемых решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем диссертационном исследовании разработаны новые математические и компьютерные модели генераторов хаотических сигналов, рассматриваемые в контексте когерентных хаотических систем связи. Предложен новый способ модуляции хаотических сигналов с применением управляемой симметрии фазового пространства дискретных нелинейных моделей, позволяющий повысить характеристики технических систем, использующих хаотические сигналы в качестве несущих. Разработаны программные инструменты моделирования и оценки характеристик ХСС, основанных на предлагаемых генераторах хаотических сигналов. Выделены основные характеристики систем связи на основе детерминированного хаоса: скрытность передачи данных, которая рассчитывается путем оценки различимости сигналов при модуляции, устойчивость к помехе в канале передачи данных, пропускная способность и защищенность канала передачи. Показано, что для эффективного решения задачи разработки перспективных ХСС необходимо выполнить ряд требований к генераторам хаотических сигналов, а именно обеспечить высокую степень адекватности конечно-разностной схемы генератора непрерывному прототипу, устойчивость к дрейфу динамических режимов и деградации хаотических колебаний, возможность реализации нескольких способов модуляции, максимально большое пространство параметров лежащей в основе генератора конечно-разностной модели при минимальном числе арифметических операций в исполняемой модели генератора. Продемонстрировано, что выполнение данных взаимно противоречивых требований возможно с применением современного математического аппарата полуявных симметричных численных методов интегрирования.

Для проведения экспериментальной части работы спроектирован виртуальный стенд, моделирующий когерентную хаотическую систему связи с различными способами модуляции сигналов. В качестве основной среды

разработки программного обеспечения была выбрана специализированная среда графического проектирования виртуальных приборов NI LabVIEW с модулем расширения FPGA Module, реализующим автоматическую генерацию кода для ПЛИС.

Предложенное математическое обеспечение включает в себя новые математические и исполняемые модели приемников и передатчиков хаотических сигналов, основанные на численных методах интегрирования с управляемой симметрией. Разработана библиотека универсальных модулей генераторов хаотических колебаний, реализующих как традиционные, так и новый способ модуляции хаотических сигналов.

Предложен и программно реализован алгоритм оптимизации параметров синхронизации дискретных хаотических систем с управляемой симметрией. Показано, что оптимизация коэффициента синхронизации с помощью разработанных средств позволяет повысить скорость синхронизации сигнала в канале связи с сигналом на стороне приемника, что позволяет сократить длину сигнала при передаче одного бита информации что позволяет увеличить скорость передачи данных в проектируемой ХСС.

Разработаны алгоритмы и программный модуль оценки различимости сигналов ХСС. В качестве инструментов для оценки различимости выбраны спектральный анализ, рекуррентный анализ, а также предложен новый способ численной оценки на основе модифицированного метода возвратных преобразований. Экспериментально показано, что применение разработанных средств позволяет повысить скрытность ХСС путем уменьшения различимости сигналов при модуляции. Созданное ПО позволяет разрабатывать и моделировать генераторы хаотических сигналов, обладающие широким диапазоном параметров, а также профилировать характеристики ХСС на их основе в соответствии с техническим заданием.

Для подтверждения теоретических положений диссертации проведен комплекс экспериментальных исследований с применением разработанных инструментов моделирования и проектирования ХСС. В ходе экспериментов был

спроектирован и исследован прототип проводной хаотической системы связи с заданными характеристиками. Показано, что предлагаемые средства моделирования и анализа ХСС позволяют сократить время разработки, унифицировать структуру ХСС и повысить качество проектных решений с точки зрения скрытности и скорости передачи данных. Результаты работы могут быть использованы при создании перспективных систем связи, оперирующих с хаотическими и шумоподобными сигналами, а также в научных исследованиях в области нелинейной динамики.

Основные результаты работы

1. Разработан новый способ модуляции хаотических сигналов, использующий особые свойства полуживых 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. В серии компьютерных и полунатурных экспериментов 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.

Практическая ценность

Практическая ценность полученных результатов заключается в повышении характеристик перспективных ХСС за счет внедрения нового математического и программного обеспечения генераторов хаотических сигналов с модуляцией на

основе управляемой симметрии конечно-разностной схемы. Полученные результаты позволяют также улучшить характеристики технических систем, оперирующих хаотическими сигналами, за счет большей адекватности математических моделей хаотических систем, полученных полужавными методами интегрирования, непрерывным прототипам.

Созданное программное обеспечение позволяет проводить оптимизацию коэффициентов синхронизации дискретных хаотических систем лежащих в основе генераторов и приемников в хаотических системах связи.

Предложенный способ оценки различимости сигналов в ХСС позволяет численно оценить разницу между динамикой различных сигналов при наличии как амплитудных, так и фазовых изменений, и тем самым обеспечивает оценку и верификацию характеристик разрабатываемых решений в области генерации хаотических сигналов и проектирования ХСС.

Дальнейшими направлениями исследований могут являться создание новых способов модуляции хаотических сигналов, основанных на управляемых свойствах других численных методов, например, метода явной средней точки с управляемым положением средней точки, а также разработка перспективных способов синхронизации хаотических систем, использующих обратимость численного решения во времени.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящей диссертации применяются следующие условные обозначения и сокращения:

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь

ЦАП – аналогово-цифровой преобразователь

КДПС – Композиционно-диагональные методы с переменной симметрией

МОП – Модель-ориентированное проектирование

ОДУ – обыкновенное дифференциальное уравнение

ПО – программное обеспечение

ХСС – Хаотическая система связи

BER – Bit Error Rate (число или процент битовых ошибок)

CD – Composition Diagonally implicit method (композиционный метод с неявной диагональю)

CSK – Chaos Shift Keying (модуляция, основанная на переключении хаотических режимов)

PM – Parameter Modulation (модуляция параметра бифуркации)

QRMA – Quantified Return Map Analysis (Численный анализ на основе обратных преобразований)

RM – Return Map (Возвратное преобразование)

SCM – Symmetry Coefficient Modulation (модуляция коэффициента симметрии)

SNR – Signal to Noise Ratio (Отношение сигнал/шум)

ГЛОССАРИЙ

В настоящей диссертации применяются следующие основные специальные термины:

Аттрактор — компактное подмножество фазового пространства динамической системы, все траектории из некоторой окрестности которого асимптотически стремятся к нему.

Виртуальный прибор — программная модель некоторого гипотетического прибора, при взаимодействии с пользователем проявляющая себя как реально существующий прибор.

Динамическая система — математическая модель, представляющая собой функциональную зависимость между временем и положением в фазовом пространстве каждой фазовой переменной системы.

Дискретизация — 1) процесс преобразования непрерывной модели динамической системы в дискретную по времени, описываемую разностной схемой; 2) процесс преобразования аналогового сигнала в цифровой посредством квантования по уровню и времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shannon C.E. Communication in the presence of noise // Proceedings of the IEEE, 1949, – Т. 37. – С. 1049–1056.
2. Tse C.K., Lau F.C.M. Chaos-based digital communication systems // Operating Principles, Analysis Methods and Performance Evaluation (Springer Verlag, Berlin, 2004), 2003.
3. Kurian A.P., Puthusserypady S., Htut S.M. Performance enhancement of DS/CDMA system using chaotic complex spreading sequence // IEEE Transactions on wireless communications, 2005. – Т. 4, 2005. – С. 984–989.
4. Vali R., Berber S.M., Nguang S.K. Analysis of chaos-based code tracking using chaotic correlation statistics // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2011. – Т. 59, – С. 796–805.
5. Hasler M., Schimming T. Optimal and suboptimal chaos receivers // Proceedings of the IEEE, 2002. – Т. 90, – С. 733–746.
6. Yu J., Yao Y.D. Detection performance of chaotic spreading LPI waveforms // IEEE transactions on wireless communications, 2005. – Т. 4, – С. 390–396.
7. Lynnyk V., Čelikovský S. On the anti-synchronization detection for the generalized Lorenz system and its applications to secure encryption // Kybernetika, 2010. – Т. 46, – С. 1–18.
8. Vitali S., Rovatti R., Setti G. Improving PA efficiency by chaos-based spreading in multicarrier DS-SS systems // 2006 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. 2006. – С. 4–12.
9. Mazzini G., Setti G., Rovatti R. Chaotic complex spreading sequences for asynchronous DS-SS. I. System modeling and results // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 1997. – Т. 44, – С. 937–947.
10. Dedieu H., Kennedy M.P., Hasler M. Chaos shift keying: modulation and demodulation of a chaotic carrier using self-synchronizing Chua's circuits // IEEE

Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, 1993. – T. 40, – C. 634–642.

11. Parlitz U., Chua L.O., Kocarev L., Halle K.S., Shang A. Transmission of digital signals by chaotic synchronization // International Journal of Bifurcation and Chaos, 1992. – T. 2, – C. 973–977.

12. Kolumbán G., Kennedy M.P., Chua L.O. The role of synchronization in digital communications using chaos. I. Fundamentals of digital communications // IEEE Transactions on circuits and systems I: Fundamental theory and applications, 1997. – T. 44, – C. 927–936.

13. Kennedy M.P., Kolumbán G., Kis G., Jákó Z. Performance evaluation of FM-DCSK modulation in multipath environments // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2000. – T. 47, – C. 1702–1711.

14. Rovatti R., Mazzini G., Setti G. Interference bounds for DS-CDMA systems based on chaotic piecewise-affine Markov maps // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2000. – T. 47, – C. 885–896.

15. Schweizer J., Schimming T. Symbolic dynamics for processing chaotic signal. ii. communication and coding // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2001. – T. 48, – C. 1283–1295.

16. Mazzini G., Rovatti R., Setti G. Sequence synchronization in chaos-based DS-CDMA systems // ISCAS'98. Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (Cat. No. 98CH36187). 1998. – T. 4. – C. 485–488.

17. Jovic B., Unsworth C.P., Sandhu G.S., Berber S.M. A robust sequence synchronization unit for multi-user DS-CDMA chaos-based communication systems // Signal Processing, 2007. – T. 87, – C. 1692–1708.

18. Kaddoum G., Roviras D., Chargé P., Fournier-Prunaret D. Robust synchronization for asynchronous multi-user chaos-based DS-CDMA // Signal Processing, 2009. – T. 89, – C. 807–818.

19. Peterson R.L., Borth D.E., Ziemer R.E. An introduction to spread-spectrum communications. Prentice-Hall, Inc., 1995.

20. Burel G., Boudier C. Blind estimation of the pseudo-random sequence of a direct sequence spread spectrum signal // MILCOM 2000 Proceedings. 21st Century Military Communications. Architectures and Technologies for Information Superiority (Cat. No. 00CH37155). 2000. – Т. 2. – С. 967–970.

21. Tam W.M., Lau F.C.M., Tse C.K., Lawrance A.J. Exact analytical bit error rates for multiple access chaos-based communication systems // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2004. – Т. 51, – С. 473–481.

22. Kolumbán G., Vizvári B., Schwarz W., Abel A. Differential chaos shift keying: A robust coding for chaos communication // Proc. NDES. 1996. – Т. 96. – С. 87–92.

23. Дмитриев А.С., Кислов В.Я., Панас А.И., others. Система связи с шумовой несущей: А. СССР, 1985.

24. Pecora L.M., Carroll T.L. Synchronization in chaotic systems // Physical review letters, 1990. – Т. 64, – С. 821.

25. Дмитриев А.С., Панас А.И., Старков С.О. Эксперименты по передаче музыкальных и речевых сигналов с использованием динамического хаоса: Препринт № 12 (600) // М.: ИРЭ РАН, 1994.

26. Molisch A.F. Ultra-wide-band propagation channels // Proceedings of the IEEE, 2009. – Т. 97, – С. 353–371.

27. Nkakanou B., Delisle G.Y., Hakem N. Experimental characterization of ultra-wideband channel parameter measurements in an underground mine // Journal of Computer Networks and Communications, – Т. 2011.

28. Дмитриев А.С., Кузьмин Л.В., Лазарев В.А., Рыжов А.И., Андреев Ю.В., Попов М.Г. Самоорганизующаяся сверхширокополосная беспроводная сенсорная сеть // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов, 2017. – Т. 8, – С. 47–53.

29. Jovic B. Application of chaotic synchronization to secure communications // In: Synchronization Techniques for Chaotic Communication Systems. Springer, 2011. – С. 135–169.

30. Kolumbán G., Kennedy M.P., Chua L.O. The role of synchronization in digital communications using chaos. II. Chaotic modulation and chaotic synchronization // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 1998. – T. 45, – C. 1129–1140.
31. Kaddoum G. Wireless chaos-based communication systems: A comprehensive survey // *IEEE Access*, 2016. – T. 4, – C. 2621–2648.
32. Sushchik M., Tsimring L.S., Volkovskii A.R. Performance analysis of correlation-based communication schemes utilizing chaos // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 2000. – T. 47, – C. 1684–1691.
33. Xu W.K., Wang L., Kolumbán G. A novel differential chaos shift keying modulation scheme // *International journal of Bifurcation and chaos*, 2011. – T. 21 – C. 799–814.
34. Xu W., Wang L., Chen G. Performance analysis of the CS-DCSK/BPSK communication system // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2014. – T. 61, – C. 2624–2633.
35. Lin F.Y., Tsai M.C. Chaotic communication in radio-over-fiber transmission based on optoelectronic feedback semiconductor lasers // *Optics Express*, 2007. – T. 15, – C. 302–311.
36. Kis G., Jako Z., Kennedy M.P., Kolumbán G. Chaotic communications without synchronization, 1998.
37. Shannon C.E. Communication theory of secrecy systems // *The Bell system technical journal*, 1949. – T. 28, – C. 656–715.
38. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи // М.: Физматлит, 2002. – Т. 252, – С. 7.
39. Cuomo K.M., Oppenheim A.V., Strogatz S.H. Synchronization of Lorenz-based chaotic circuits with applications to communications // *IEEE Transactions on circuits and systems II: Analog and digital signal processing*, 1993. – T. 40, – C. 626–633.

40. Downes P.T. Secure communication using chaotic synchronization // *Chaos in Communications*. 1993. – Т. 2038. – С. 227–234.
41. Pérez G., Cerdeira H.A. Extracting messages masked by chaos // *Physical Review Letters*, 1995. – Т. 74, – С. 1970.
42. Short K.M., Parker A.T. Unmasking a hyperchaotic communication scheme // *Physical Review E*, 1998. – Т. 58, – С. 1159.
43. Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D. Extracting information masked by the chaotic signal of a time-delay system // *Physical Review E*, 2002. – Т. 66, – С. 026215.
44. Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е., Храмова А.Е. Универсальные скейлинговые закономерности переходных процессов // *Доклады академии наук*. 2002. – Т. 383. – С. 322–325.
45. Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е., Храмова А.Е. Универсальные закономерности переходных процессов // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*, 2002. – Т. 45, – С. 880–886.
46. Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. О применении хаотической синхронизации для скрытой передачи информации // *Успехи физических наук*, – Т. 179, 2009. – С. 1281–1310.
47. Yang T., Chua L.O. Secure communication via chaotic parameter modulation // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, – Т. 43, 1996. – С. 817–819.
48. Kaddoum G., Chargé P., Roviras D., Fournier-Prunaret D. A methodology for bit error rate prediction in chaos-based communication systems // *Circuits, Systems and Signal Processing*, 2009. – Т. 28, – С. 925–944.
49. Kolumban G. Theoretical noise performance of correlator-based chaotic communications schemes // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 2000. – Т. 47, – С. 1692–1701.
50. Leung H., Yu H., Murali K. Ergodic chaos-based communication schemes // *Physical Review E*, 2002. – Т. 66, – С. 036203.

51. Zhou Z., Zhou T., Wang J. Performance of multiple-access DCSK communication over a multipath fading channel with delay spread // *Circuits, Systems & Signal Processing*, 2008. – T. 27, – C. 507–518.
52. Chen P., Wang L., Lau F.C.M. One analog STBC-DCSK transmission scheme not requiring channel state information // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2013. – T. 60, – C. 1027–1037.
53. Kaddoum G., Olivain J., Beaufort Samson G., Giard P., Gagnon F. Implementation of a differential chaos shift keying communication system in gnu radio, 2012.
54. Yong S.K., Chong C.C., Lee S.S. UWB-DCSK communication systems for low rate WPAN applications // *2005 IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. 2005. – T. 2. – C. 911–915.
55. Fang Y., Xu J., Wang L., Chen G. Performance of MIMO relay DCSK-CD systems over Nakagami fading channels // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2012. – T. 60, – C. 757–767.
56. Fang Y., Wang L., Chen G. Performance of a multiple-access DCSK-CC system over Nakagami-m fading channels // *2013 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. 2013. – C. 277–280.
57. Xu J., Xu W., Wang L., Chen G. Design and simulation of a cooperative communication system based on DCSK/FM-DCSK // *Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. 2010. – C. 2454–2457.
58. Wang S., Wang X. M -DCSK-based chaotic communications in MIMO multipath channels with no channel state information // *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2010. – T. 57, – C. 1001–1005.
59. Kaddoum G., Gagnon F. Design of a high-data-rate differential chaos-shift keying system // *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2012. – T. 59, – C. 448–452.
60. Баранник В.В., Королёва Н.А., Гуржий П.Н. Двухуровневое изофотное кодирование цветowych координат // *Системи обробки інформації*, 2005. – С. 89–93.

61. Мамедов А.С.о. К вопросу о применении трехуровневого кодирования при передаче информации по телекоммуникационным сетям // Наука-промышленности и сервису, 2010. – С. 75–83.
62. Крук Е.А., Трифонов П.В. Адаптивное многоуровневое кодирование в многочастотных системах/ЕА Крук, ПВ Трифонов//Научно-технические ведомости СПбГТУ Адаптивное многоуровневое кодирование в многочастотных системах // Научно-технические ведомости СПбГТУ, 2005. – С. 59–65.
63. Butusov D., Karimov T., Voznesenskiy A., Kaplun D., Andreev V., Ostrovskii V. Filtering techniques for chaotic signal processing // Electronics, 2018. – Т. 7, – С. 450.
64. Reedy J., Lunzman S. Model based design accelerates the development of mechanical locomotive controls, SAE Technical Paper, Tech. rep. 2010.
65. Ahmadian M., Nazari Z.J., Nakhaee N., Kostic Z. Model based design and SDR // 2005 The 2nd IEE/EURASIP Conference on DSPEnabledRadio (Ref. No. 2005/11086). 2005. – С. 8–16.
66. Congress G.C. General Motors Developed Two-Mode Hybrid Powertrain With MathWorks Model-Based Design; Cut 24 Months Off Expected Dev Time // BioAge Group, 2009. – Т. 26,
67. Dias B.M.D.A., Laganá A.A.M., Justo J.F., Yoshioka L.R., Santos M.M.D., Gu Z. Model-based development of an engine control module for a spark ignition engine // IEEE Access, 2018. – Т. 6, – С. 53638–53649.
68. Denney E. A Software Safety Certification Plug-in for Automated Code Generators // Feasibility Study and Preliminary Design, NASA Ames Research Center, 2006.
69. Андреев В.С. Математическое и программное обеспечение систем автоматизации проектирования цифровых систем обработки сигналов, Андреев Валерий Сергеевич. Санкт-Петербург, 2013, Ph.D. dissertation 2013.
70. Бутусов Д.Н. Автоматизация проектирования встраиваемых систем, СПбГЭТУ" ЛЭТИ". СПб., 2012, Ph.D. dissertation 2012.

71. Жуков К.Г., Бутусов Д.Н. Коррекция погрешности решения дифференциальных уравнений второго порядка // Информатика, телекоммуникации и управление, 2010. – С. 121–126.
72. Островский В.Ю. Автоматизация исследовательского проектирования цепей с мемристивными элементами, 2022.
73. Đaković F. Komparativna analiza edukacijskih platformi NI ELVIS II i NI ELVIS III, Josip Juraj Strossmayer University of Osijek. Faculty of Electrical ..., Ph.D. dissertation 2020.
74. Odema M., Adly I., Ghali H.A. LabVIEW-based interactive remote experimentation implementation using NI myRIO // 2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE). 2019. – С. 214–218.
75. Rybin V., Tutueva A., Karimov T., Kolev G., Butusov D., Rodionova E. Optimizing the Synchronization Parameters in Adaptive Models of Rössler system // 2021 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). 2021. – С. 1–4.
76. Tutueva A.V., Karimov T.I., Andreev V.S., Zubarev A.V., Rodionova E.A., Butusov D.N. Synchronization of chaotic systems via adaptive control of symmetry coefficient in semi-implicit models // 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC). 2020. – С. 143–146.
77. Butusov D.N., Karimov A.I., Tutueva A.V. Symmetric extrapolation solvers for ordinary differential equations // 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW). 2016. – С. 162–167.
78. Voroshilova A., Wafubwa J. Discrete competitive lotka–volterra model with controllable phase volume // Systems, 2020. – Т. 8, – С. 17.
79. Butusov D.N., Ostrovskii V.Y., Karimov A.I., Andreev V.S. Semi-explicit composition methods in memcapacitor circuit simulation // International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems (IJERTCS), 2019. – Т. 10, – С. 37–52.

80. Terentev A.A., Butusov D.N., Fedoseev P.S. Novel Composition ODE Solver based on Semi-Implicit Integration // 2020 XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). 2020. – C. 128–132.
81. Reich S. Linearly implicit time stepping methods for numerical weather prediction // BIT Numerical Mathematics, – T. 46, 2006. – C. 607–616.
82. Karimov T., Rybin V., Kolev G., Rodionova E., Butusov D. Chaotic communication system with symmetry-based modulation // Applied Sciences, 2021. – T. 11, – C. 3698.
83. Hairer E., Nørsett S.P., Wanner G. Solving ordinary differential equations I. Nonstiff problems, volume 8 of. Springer Series in Computational Mathematics, 1993.
84. Butusov D., Tutueva A., Fedoseev P., Terentev A., Karimov A. Semi-Implicit Multistep Extrapolation ODE Solvers // Mathematics, 2020. – T. 8, – C 943.
85. Tutueva A., Moysis L., Rybin V., Zubarev A., Volos C., Butusov D. Adaptive symmetry control in secure communication systems // Chaos, Solitons & Fractals, 2022. – T. 159, – C. 112181.
86. Butusov D.N., Karimov T.I., Lizunova I.A., Soldatkina A.A., Popova E.N. Synchronization of analog and discrete Rössler chaotic systems // 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2017. – C. 265–270.
87. Karimov A., Tutueva A., Karimov T., Druzhina O., Butusov D. Adaptive generalized synchronization between circuit and computer implementations of the Rössler system // Applied Sciences, 2020. – T. 11, – C. 81.
88. Sira-Ramirez H., Cruz-Hernández C. Synchronization of chaotic systems: A generalized Hamiltonian systems approach // International Journal of bifurcation and chaos, 2001. – T. 11, – C. 1381–1395.
89. Jackson E.A., Grosu I. An open-plus-closed-loop (OPCL) control of complex dynamic systems // Physica D: Nonlinear Phenomena, 1995. – T. 85, – C. 1–9.
90. Kharel R. Design and implementation of secure chaotic communication systems, Northumbria University, Ph.D. dissertation 2011.

91. Boccaletti S., Kurths J., Osipov G., Valladares D.L., Zhou C.S. The synchronization of chaotic systems // *Physics reports*, 2002. – Т. 366, – С. 1–101.
92. Mahmoud E.E. Complex complete synchronization of two nonidentical hyperchaotic complex nonlinear systems // *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 2014. – Т. 37, – С. 321–328.
93. Mbe E.S.K., Fotsin H.B., Kengne J., Wofo P. Parameters estimation based adaptive generalized projective synchronization (GPS) of chaotic Chua's circuit with application to chaos communication by parametric modulation // *Chaos, Solitons & Fractals*, 2014. – Т. 61, – С. 27–37.
94. Yu J., Hu C., Jiang H., Fan X. Projective synchronization for fractional neural networks // *Neural Networks*, 2014. – Т. 49, – С. 87–95.
95. Хрисанфова С.О., Кадина Е.Ю., Губина Е.В., Коган Л.В., Осипов Г.В. Динамика системы двух нелинейно связанных маятников // *Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика*, 2016. – Т. 24, – С. 4–20.
96. Pikovsky A.S., Rosenblum M.G., Osipov G.V., Kurths J. Phase synchronization of chaotic oscillators by external driving // *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1997. – Т. 104, – С. 219–238.
97. Osipov G.V., Hu B., Zhou C., Ivanchenko M.V., Kurths J. Three types of transitions to phase synchronization in coupled chaotic oscillators // *Physical Review Letters*, 2003. – Т. 91, – С. 024101.
98. Osipov G.V., Pikovsky A.S., Rosenblum M.G., Kurths J. Phase synchronization effects in a lattice of nonidentical Rössler oscillators // *Physical Review E*, 1997. – Т. 55, – С. 2353.
99. Shahverdiev E.M., Sivaprakasam S., Shore K.A. Lag synchronization in time-delayed systems // *Physics Letters A*, 2002. – Т. 292, – С. 320–324.
100. Yang T. A survey of chaotic secure communication systems // *International journal of computational cognition*, 2004. – Т. 2, – С. 81–130.
101. Boccaletti S., Farini A., Arecchi F.T. Adaptive synchronization of chaos for secure communication // *Physical Review E*, 1997. – Т. 55, – С. 4979.

102. 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.
103. Haken H. An approach to self-organization // *Self-organizing systems: The emergence of order*. New York, 1987. – C. 417–437.
104. Karimov T.I., Druzhina O.S., Andreev V.S., Tutueva A.V., Kopets E.E. Bifurcation spectral diagrams: a tool for nonlinear dynamics investigation // *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*. 2021. – C. 119–123.
105. Ostrovskii V.Y., Tutueva A.V., Rybin V.G., Karimov A.I., Butusov D.N. Continuation analysis of memristor-based modified Chua's circuit // *2020 International Conference Nonlinearity, Information and Robotics (NIR)*. 2020. – C. 1–5.
106. Djurović I., Rubežić V. Chaos detection in chaotic systems with large number of components in spectral domain // *Signal Processing*, 2008. – T. 88, – C. 2357–2362.
107. Patzold M., Gutierrez C.A. Spectrogram analysis of multipath fading channels under variations of the mobile speed // *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. 2016. – C. 1–6.
108. Rybin V., Butusov D., Rodionova E., Karimov T., Ostrovskii V., Tutueva A. Discovering chaos-based communications by recurrence quantification and quantified return map analyses // *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2022. – T. 32, – C. 2250136.
109. Marwan N., Kurths J., Saperin P. Generalised recurrence plot analysis for spatial data // *Physics Letters A*, – T. 360, 2007. – C. 545–551.
110. Chen Y., Yang H. Multiscale recurrence analysis of long-term nonlinear and nonstationary time series // *Chaos, Solitons & Fractals*, – T. 45, 2012. – C. 978–987.
111. Karimov T., Rybin V., Druzhina O., Ostrovskii V., Protasova D. Revealing Chaos-Based Steganographic Transmission by the Recurrence Quantification Analysis // *International Conference on Mathematics and its Applications in new Computer Systems*. 2022. – C. 385–392.

112. Li S., Chen G., Alvarez G. Return-map cryptanalysis revisited // *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2006. – Т. 16, – С. 1557–1568.
113. Yang T., Yang L.B., Yang C.M. Cryptanalyzing chaotic secure communications using return maps // *Physics Letters A*, 1998. – Т. 245, – С. 495–510.
114. 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)*. 2020. – С. 88–91.
115. Островский В.Ю., Тутуева А.В., Андреев В.С., Рыбин В.Г. Фазовый бифуркационный анализ нелинейных динамических систем // *Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям*. 2020. – Т. 1. – С. 127–130.
116. Li J.S., Huston J.P. Non-linear dynamics of operant behavior: a new approach via the extended return map // *Reviews in the Neurosciences*, 2002. – Т. 13, – С. 31–58.
117. Karimov T., Druzhina O., Karimov A., Tutueva A., Ostrovskii V., Rybin V., Butusov D. Single-coil metal detector based on spiking chaotic oscillator // *Nonlinear Dynamics*, – Т. 107, 2022. – С. 1295–1312.
118. Lü J., Chen G., Cheng D., Celikovsky S. Bridge the gap between the Lorenz system and the Chen system // *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2002. – Т. 12, – С. 2917–2926.
119. Rybin V., Kolev G., Kopets E., Dautov A., Karimov A., Karimov T. Optimal Synchronization Parameters for Variable Symmetry Discrete Models of Chaotic Systems // *2022 11th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*. 2022. – С. 1–5.
120. Рыбин В. Г. Хаотические системы связи с модуляцией сигнала на основе управляемой симметрии полуживных конечно-разностных моделей // *Труды учебных заведений связи*. – 2024. – Т. 10. – №. 1. – С. 6-16.
121. Дубов М. А. Незатонная оценка параметров радиосигналов с цифровыми видами модуляции : дис. – Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 2013.

122. Дмитриев А. С., Рыжов А. И., Маурисио С. Т. К. Введение в статистическую теорию относительной передачи информации на основе хаотических сигналов //Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2023. – Т. 31. – №. 4. – С. 421-438.

123. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.

124. Бутусов Д. Н., Каримов А. И., Каримов Т. И. Аппаратно-ориентированные численные методы интегрирования //СПб. Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2016. – Т. 192.

125. Bouali S. A 3D strange attractor with a distinctive silhouette. The butterfly effect revisited //arXiv preprint arXiv:1311.6128. – 2013.

126. 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.

127. 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.

128. 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. – Т. 34. – №. 01. – С. 2450009.

129. 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. – Т. 12. – №. 7. – С. 982.

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

131. 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.

132. 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.

133. 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ

**ООО «Научно-производственная фирма
«Модем»**

ИНН 7813133391 / КПП 781401001
197341, Санкт-Петербург,
Коломяжский пр-т, д.27, лит.А, эт/пом 7/31-Н
р/сч. 40702810555040009437 в «Северо-Западный
банк» ПАО Сбербанк г. Санкт-Петербург
к/сч. 30101810500000000653 БИК 044030653
Код ОКОНХ 14760 Код ОКПО 53307496
ОГРН 1037828009273

тел./факс (812) 340-0102; 340-0103
E-mail: sales@npfmodem.spb.ru
www.npfmodem.spb.ru

№ 67 от 04.03.2024 г.

«УТВЕРЖДАЮ»
Генеральный директор
ООО НПФ «Модем»



к.т.н. Горохов С.Г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Рыбина Вячеслава Геннадьевича на соискание ученой степени кандидата технических наук, выполненной на тему «Математическое и компьютерное моделирование генераторов хаотических колебаний на основе численных методов с управляемой симметрией»

Комиссия в составе Назарова Юрия Валерьевича кандидата технических наук, зам. генерального директора по развитию, эксперта ИЕС (комитет ТС 57/WG 20) и Исакова Александра Борисовича кандидата технических наук, руководителя НИР. Составила настоящий акт о том, что научные результаты, полученные Рыбиным В.Г., используются в проектной деятельности ООО НПФ «Модем», а именно программное обеспечение для моделирования когерентных хаотических систем связи, включающее исполняемые модели, инструменты анализа и тестирования когерентных хаотических систем связи.

Полученные результаты нашли свое применение в НИОКР по созданию перспективных широкополосных систем передачи данных в сетях связи по ЛЭП. Разработанный Рыбиным В.Г. комплекс программ позволил повысить точность моделирования и сократить время проектирования.

Зам. генерального директора
по развитию, к.т.н.

Назаров Ю.В.

Руководитель НИР
к.т.н.

Исаков А.Б.




СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
 ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ
 МИНОБРНАУКИ РОССИИ
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Санкт-Петербургский государственный
 электротехнический университет «ЛЭТИ» им.
 В.И. Ульянова (Ленина)
 (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)
 ул. Профессора Попова, д.5 литера Ф,
 Санкт-Петербург, 197022
 Телефон: (812) 234-46-51; факс: (812) 346-27-58;
 e-mail: info@etu.ru; <https://etu.ru>
 ОКПО 02068539; ОГРН 1027806875381
 ИНН/КПП 7813045402/781301001


 ПРИБЛИЖИТЕЛЬНО ТУТ ПРОВЕРЖДАЮ»
 Проректор по учебной работе
 СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
 С.А. Галунин
 _____ 2024 г.

А К Т

о внедрении результатов диссертационной работы
Рыбина Вячеслава Геннадьевича «Математическое и
компьютерное моделирование генераторов хаотических колебаний
на основе численных методов с управляемой симметрией»

Составлен комиссией в составе:

Председатель: зам. зав. кафедрой по учебно-методической работе, к.т.н. Андреев В.С.

Члены комиссии: доцент, к.т.н. Боброва Ю.О., доцент, к.т.н. Каримов Т.И.

Комиссия составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы **Рыбина Вячеслава Геннадьевича «Математическое и компьютерное моделирование генераторов хаотических колебаний на основе численных методов с управляемой симметрией»** используются при обучении бакалавров по дисциплине «Моделирование нелинейных динамических систем» и магистров по дисциплине «Современные численные методы и средства моделирования» на кафедре САПР СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Комиссия отмечает, что в учебном процессе применяются предложенные автором дискретные модели генераторов хаотических колебаний на основе полуявных методов численного интегрирования с управляемой симметрией, методы построения математических моделей нелинейных систем, описываемых обыкновенными дифференциальными уравнениями, а также разработанное программное обеспечение для анализа нелинейных систем.

Председатель:

Заместитель заведующего кафедрой
систем автоматизированного проектирования
по учебно-методической работе, к.т.н.



Андреев В.С.

Члены комиссии:

к.т.н., доцент



Боброва Ю.О.

к.т.н., доцент



Каримов Т.И.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018660169

Программа построения динамических карт нелинейных систем на основе старшего показателя Ляпунова

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») (RU)*

Авторы: *Бутусов Денис Николаевич (RU), Пестерев Дмитрий Олегович (RU), Рыбин Вячеслав Геннадьевич (RU), Конец Екатерина Евгеньевна (BY)*

Заявка № 2018616820

Дата поступления 02 июля 2018 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 17 августа 2018 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ислюев Г.П. Ислюев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018660424

**Программа исследования симметричности дискретных
моделей хаотических систем**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ
«ЛЭТИ») (RU)*

Авторы: *Горяинов Сергей Вадимович (RU), Козак Мария
Николаевна (RU), Андреев Валерий Сергеевич (RU), Конец
Екатерина Евгеньевна (BY), Рыбин Вячеслав Геннадьевич (BY)*

Заявка № 2018615799

Дата поступления 07 июня 2018 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 23 августа 2018 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019616796

**Программа моделирования и анализа хаотических
переходных процессов в нелинейных системах**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ
«ЛЭТИ») (RU)*

Авторы: *Островский Валерий Юрьевич (RU), Красильников
Александр Витальевич (RU), Рыбин Вячеслав Геннадьевич (BY)*

Заявка № **2019615890**

Дата поступления **21 мая 2019 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **29 мая 2019 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

 **Г.П. Ивлиев**



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019617202

Программа расчета ляпуновского спектра для нелинейных динамических систем, реализованных полуявными алгоритмами интегрирования

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») (RU)*

Авторы: *Бутусов Денис Николаевич (RU), Пестерев Дмитрий Олегович (RU), Рыбин Вячеслав Геннадьевич (RU), Тутуева Александра Вадимовна (RU)*

Заявка № 2019615772

Дата поступления 21 мая 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 04 июня 2019 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Излиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019666875

**Программа построения фазовых и комбинированных
бифуркационных диаграмм**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ
«ЛЭТИ»)* (RU)

Авторы: *Островский Валерий Юрьевич (RU), Рыбин Вячеслав
Геннадьевич (RU), Каримов Артур Искандарович (RU), Каримов
Тимур Искандарович (RU), Бутусов Денис Николаевич (RU)*

Заявка № **2019665936**

Дата поступления **06 декабря 2019 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **16 декабря 2019 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Излиев Г.П. Излиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020617462

**Программа визуализации областей мультстабильности на
параметрических диаграммах нелинейных динамических
систем**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ
«ЛЭТИ») (RU)*

Авторы: *Островский Валерий Юрьевич (RU), Тутуева Александра
Вадимовна (RU), Каримов Артур Искандарович (RU), Рыбин
Вячеслав Геннадьевич (RU)*

Заявка № 2020616513

Дата поступления 02 июля 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 08 июля 2020 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023616256

**Программа для расчета наибольшей Ляпуновской
экспоненты с использованием распределенных
вычислений на основе технологии CUDA**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования «Санкт-
Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (RU)*

Авторы: *Рыбин Вячеслав Геннадьевич (RU), Ширнин Кирилл
Витальевич (RU), Пестерев Дмитрий Олегович (RU), Бабкин
Иван Анатольевич (RU), Трубина Анастасия Андреевна (RU),
Колев Георгий Юрьевич (RU)*

Заявка № 2023614575

Дата поступления 14 марта 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 23 марта 2023 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e40f0a94edbd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.11.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023616798

Программа для расчета Ляпуновских показателей с использованием распределенных вычислений на основе технологии CUDA

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (RU)*

Авторы: *Рыбин Вячеслав Геннадьевич (RU), Бутусов Денис Николаевич (RU), Ширнин Кирилл Витальевич (RU), Квитко Дмитрий Витальевич (RU), Федосеев Петр Сергеевич (RU)*

Заявка № 2023614561

Дата поступления 14 марта 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 03 апреля 2023 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e40f0a94edbd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.12.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023615744

**Программа для построения одномерных и двумерных
бифуркационных диаграмм с использованием
распределенных вычислений на основе технологии
CUDA**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (RU)*

Авторы: *Рыбин Вячеслав Геннадьевич (RU), Бутусов Денис Николаевич (RU), Островский Валерий Юрьевич (RU), Ширнин Кирилл Витальевич (RU), Баязитов Олег Олегович (RU)*

Заявка № 2023614783

Дата поступления 14 марта 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 17 марта 2023 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e40f0a94edbd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.12.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов