

На правах рукописи



Мохсени Тимур Исхакович

**Относительная передача информации на основе хаотических
радиоимпульсов**

Специальность 1.3.4 – «Радиофизика»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН).

- | | |
|----------------------------------|---|
| Научный
руководитель | — Дмитриев Александр Сергеевич
доктор физико-математических наук,
профессор |
| Официальные
оппоненты | — Лобов Евгений Михайлович
доктор технических наук, доцент кафедры
«Радиотехнические системы»
Московского технического университета
связи и информатики

Сысоева Марина Вячеславовна
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры физики Санкт-
Петербургского политехнического
университета Петра Великого |
| Ведущая организация | — Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского (г.
Нижний Новгород) |

Защита состоится «19» декабря 2025 г., в 11-00 на заседании диссертационного совета 24.1.111.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН) по адресу: 125009, г. Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и на сайте <http://cplire.ru/rus/dissertations/Moskheni/index.html>

Автореферат разослан «___» _____ 202 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук



Л. В. Кузьмин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работы по использованию динамического хаоса для передачи информации, в частности беспроводной передачи информации ведутся как минимум с начала 90-х годов двадцатого века. Кроме общего и давнего интереса к схемам связи с использованием шумовых и шумоподобных сигналов [1–3], в динамическом хаосе исследователей привлекло такое явление как хаотическая синхронизация [4, 5]. Именно на него возлагались большие надежды при разработке первых схем связи с использованием хаотических сигналов [6–10].

Однако довольно быстро выяснилось, что предложенные схемы значительно более чувствительны к шумам и искажениям в канале связи, чем традиционные схемы передачи, использующие регулярные сигналы [11]. Поэтому были предприняты попытки использования динамического хаоса для передачи информации без использования явления хаотической синхронизации. В первую очередь они были связаны с использованием способов относительной передачи, в которых вместе с сигналом, несущим информацию, через канал передается опорный сигнал, а в приемнике осуществляется их взаимная корреляция для детектирования принятых бит. К тому времени эти методы были хорошо известны, в том числе для шумовых и шумоподобных сигналов [3]. Однако хаотические сигналы «вдохнули» в них новую жизнь. Методы относительной передачи информации, предложенные первоначально для регулярных и шумовых сигналов, в последние десятилетия широко применяются в схемах связи, использующих в качестве носителя данных хаотические сигналы.

Наиболее популярной стала схема относительной хаотической манипуляции (Differential Chaos Shift Keying – DCSK), предложенная в работе [12]. В DCSK при передаче каждый двоичный информационный символ с длительностью T_0 представляется в виде двух фрагментов хаотического сигнала с продолжительностью $T_0/2$ каждый, при этом второй фрагмент хаотического сигнала является либо копией первого, либо его инвертированной копией. Первый фрагмент выступает в качестве опорного, второй фрагмент несет

информацию. Последовательность таких пар хаотических фрагментов передается в канал связи. В приемнике двоичный информационный символ для каждой пары переданных фрагментов хаотического сигнала определяется путем сравнения результата корреляции второго фрагмента хаотического сигнала из пары и первого фрагмента с нулевым порогом. Результат корреляции больше нуля (первый и второй фрагменты хаотического сигнала в паре совпадают) соответствует передаче «1», результат корреляции меньше нуля (второй фрагмент хаотического сигнала в паре инвертирован по отношению к первому) соответствует передаче «0».

Чтобы получить идентичные фрагменты хаотического сигнала, служащие в качестве опорного и несущего информацию при передаче, используется задержка сигнала равная половине времени продолжительности бита. При физической реализации схемы связи, использующей метод модуляции DCSK, блоки модуляции и демодуляции, отвечающие за задержку сигнала, будут иметь тракт с эквивалентной длиной $CT_б/2$, где C – скорость света. Соответственно, при скорости передачи 500 Кбит/с длительность задержки будет порядка микросекунды, а необходимая длина тракта для задержки сигнала будет составлять около 300 м. Такие требования значительно усложняют реализацию компактных систем связи, использующих DCSK и аналоговые хаотические сигналы. Потенциальным решением проблемы больших задержек является переход к цифровым методам формирования фрагментов хаотического сигнала. Однако в этом случае вступают в силу серьезные ограничения по возможной максимальной скорости передачи.

Еще две схемы с относительной передачей: схема манипуляции с корреляционной задержкой (Correlation Delay Shift Keying – CDSK) и схема симметричной хаотической манипуляции (Symmetric Chaos Shift Keying – SCSK) были предложены и проанализированы в работе [13]. Но, как показали сами авторы, характеристики этих схем оказались на 2-3 дБ хуже в каналах с белым шумом, чем у схемы DCSK и особого интереса к ним в дальнейшем не наблюдалось.

Таким образом, к началу 2000 годов появились схемы применения хаотических сигналов для систем беспроводных коммуникаций на основе методов относительной передачи, которые по своим статистическим характеристикам были близки к классическим узкополосным системам связи. Однако даже у лучшей из них были проблемы с практической реализацией.

Следует отметить, что техника генерации хаоса в микроволновом диапазоне, а также ряд других критических элементов необходимых для создания беспроводных средств коммуникаций были уже в значительной степени готовы к появлению практически реализуемых схем [14].

Такая схема была предложена в 2000 году [15, 16]. Это была прямохаотическая схема связи (ПХСС), использующая в качестве носителя информации хаотические радиоимпульсы. В последующие годы она успешно развивалась: на ее основе удалось создать малогабаритные сверхширокополосные приемопередатчики и сети на их основе. Она также была принята в качестве опционального решения в стандарт сверхширокополосной персональной беспроводной связи IEEE 802.15.4a.

Актуальность работы. На сегодняшний день ПХСС является единственной практически реализованной и используемой схемой беспроводной связи на основе динамического хаоса. Кроме того, она играет важную роль в развитии сверхширокополосных средств беспроводной связи [17, 18] и в сверхширокополосных беспроводных сенсорных сетях различного назначения. Вместе с тем современные требования к беспроводным средствам коммуникаций бросают новые вызовы. В первую очередь это относится к массовому применению беспроводных, малопотребляющих, достаточно высокоскоростных средств связи для Интернета вещей, Интернета для робототехники и других массовых применений. Эти задачи требуют расширения возможностей средств связи с хаотическими сигналами, включая разработку и применение новых методов модуляции, разделения каналов и множественного доступа. Необходимость решения этих вопросов определяет актуальность диссертации.

Цель диссертационной работы состоит в разработке и экспериментальной апробации прямохаотической схемы относительной передачи/приема информации $((DC)^2$ – Direct Chaotic Differentially Coherent transmission scheme), обладающей существенно более широкими возможностями по методам модуляции, разделению каналов и типам множественного доступа по сравнению с исходным вариантом прямохаотической схемы связи с энергетическим приемом, при отсутствии необходимости использования задержек большой длительности, присущей схеме относительной передачи DCSK.

Основные задачи, решаемые в работе.

- создание схемы относительной передачи/приема данных на основе хаотических радиоимпульсов с малыми длительностями задержек;
- теоретический анализ помехоустойчивости предлагаемой схемы относительной передачи;
- реализация и исследование математической модели предлагаемой схемы относительной передачи;
- разработка метода многопользовательского доступа для предлагаемой схемы и его исследование;
- проектирование, сборка и экспериментальная оценка работоспособности лабораторного макета схемы относительной передачи.

Научная новизна результатов заключается в том, что:

- предложена и разработана схема относительной передачи/приема информации, использующая в качестве носителя информации хаотические радиоимпульсы, в которой отсутствует проблема задержек большой длительности, свойственная известным существующим схемам относительной передачи на основе хаоса;
- предложена, построена и исследована математическая модель прямохаотической схемы относительной передачи, и осуществлены комплексные расчеты ее динамики;

- получены теоретические оценки помехоустойчивости предлагаемой прямохаотической схемы относительной передачи;
- предложен метод разделения каналов на основе корреляционных свойств хаотических радиоимпульсов, и исследованы возможности его применения для многопользовательского доступа в прямохаотической схеме относительной передачи;
- создан и испытан экспериментальный макет прямохаотической схемы относительной передачи по проводному каналу связи.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что предложена, прямохаотическая схема относительной передачи/приема, использующая задержки с малой длительностью, что делает ее практически реализуемой. Предложенная схема исследована и экспериментально апробирована. Результаты работы могут быть использованы при разработке и создании сверхширокополосных приемопередатчиков для систем связи, в том числе систем связи с множественным доступом и беспроводных сенсорных сетей.

Методология и методы исследования.

В работе использовались следующие методы исследования: 1) теоретическое исследование поставленной задачи и поиски путей ее решения; 2) компьютерное моделирование; 3) создание макетов компонентов схемы передачи, макета схемы передачи в целом и их экспериментальное исследование. На этапе теоретического исследования была создана структурная модель новой прямохаотической схемы относительной передачи. На этапе компьютерного моделирования была разработана и построена математическая модель предложенной схемы, представляющая собой систему дифференциальных уравнений, переменные которой описывают поведение сигнала в различных точках схемы. Модель была реализована в виде программы в среде MatLab и численно исследована. Экспериментальные исследования были проведены на специально созданном лабораторном макете предложенной схемы, включающей в себя передатчик и приемник схемы, соединенные каналом связи в виде фрагмента высокочастотного кабеля. Передатчик макета состоит из источника хаотических радиоимпульсов,

делителя мощности пополам, модулятора, задержки на время большее или равное времени автокорреляции и сумматора. Приемник состоит из делителя мощности пополам, задержки, идентичной задержке в передатчике, перемножителя и фильтра нижних частот (ФНЧ), выступающего в качестве интегратора.

Положения, выносимые на защиту:

- предложенная схема относительной передачи информации, использующая в качестве носителя хаотические радиоимпульсы, базируется на корреляционных свойствах хаотических сигналов. В отличие от схемы DCSK практическая реализация схемы $(DC)^2$ использует задержки небольшой длительности;
- компьютерное моделирование предложенной схемы относительной передачи информации подтверждает достоверность заложенных в схему идей;
- результаты исследования предложенного метода разделения каналов в прямохаотической схеме относительной передачи информации доказывают возможность реализации множественного доступа;
- экспериментальные результаты, полученные на спроектированном и собранном макете передатчика с приемником предложенной схемы относительной передачи, доказывают ее практическую реализуемость.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность диссертационной работы подтверждается соответствием расчетов и оценок, полученных и используемых автором, теоретическим положениям известным из литературы, соответствием результатов экспериментальных испытаний полученным теоретическим оценкам, техническими характеристиками разработанных программных и аппаратных решений.

Основные результаты проведенных исследований докладывались и обсуждались на следующих международных и российских научных конференциях: Международной научно-технической конференции «Перспективные Технологии в средствах передачи информации» (Владимир-Суздаль, Россия, 2011); V, VI, VIII, XI, XIII, XIV Всероссийской научно-

технической конференции «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, Россия, 2011, 2012, 2014, 2015, 2019, 2020); VII Международной Крымской школе-конференции «Emergent Dynamics of Oscillatory Networks» (Меллас, Россия, 2012); II, V, VIII Всероссийских Армандовских чтениях (Муром, Россия, 2012, 2015, 2018); Международной молодежной конференции «Информационные системы и технологии» (Москва, Россия, 2012); 55й, 57й, 58й научной конференции МФТИ (Долгопрудный, Россия, 2012, 2014, 2015); X международной школе-конференции «Хаотические автоколебания и образование структур» (Саратов, Россия, 2013); 26й, 28й, 30й, 32й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, Россия, 2016, 2018, 2020, 2022); Международной конференции «Динамические системы в науке и технологиях DSST-2018» (Алушта, Россия, 2018); XVIII, XIX научных школах «Нелинейные волны» (Н. Новгород, Россия, 2018, 2020); Всероссийской с международным участием молодежной научно-практической конференции и выставке «Радиотехнические системы» (Ярославль, Россия, 2019); конференции «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях СИНХРОИНФО 2019» (Ярославль, Россия, 2019); II Всероссийской научно-практической конференции «Физика, техника и технология сложных систем» (Ярославль, Россия, 2019); Всероссийских открытых Армандовских чтениях (Муром, Россия, 2020, 2022).

По теме, относящейся к диссертации, опубликовано 54 печатных работы, в том числе, 18 статей в изданиях, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ (среди них 11 статей входят в международные реферативные базы данных SCOPUS и Web of Science), 35 работ в трудах научных конференций, 1 глава монографии. Непосредственно в самой диссертационной работе используется 26 печатных работ, в том числе 9 статей в изданиях, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ (все 9 статей входят в международные реферативные базы данных SCOPUS и Web of Science), 16 работ в трудах научных конференций, 1 глава монографии. Три из перечисленных

докладов были отмечены Оргкомитетами конференций грамотами и призовыми местами.

Личный вклад автора заключается в участии в постановке научных задач, определении методов и подходов к их решению, участии в разработке прямохаотической схемы относительной передачи, компьютерном моделировании, проведении расчетов для аналитической оценки помехоустойчивости прямохаотической схемы относительной передачи, участии в проектировании и создании экспериментального макета прямохаотической схемы относительной передачи, подготовке и проведении экспериментов по прямохаотической относительной передаче данных с разработанным макетом. Все вошедшие в диссертационную работу результаты получены самим автором, либо при его прямом участии.

Структура и объем диссертации: диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Содержит 101 страницу, 36 рисунков, 1 таблицу. Список цитированной литературы содержит 100 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, определены цели и задачи исследований, сформулированы научная новизна и положения, выносимые на защиту, изложено краткое содержание работы.

В **Первой главе** приведен обзор известных некогерентных схем передачи/приема данных на основе хаотических сигналов. Рассмотрены наиболее известные схемы из класса схем относительной передачи: DCSK, CSDK, FM-DCSK (Frequency Modulated Differential Chaos Shift Keying – частотно модулированная относительная хаотическая манипуляция); а также некогерентная ПХСС с энергетическим приемом. В главе приведена структура и подробно описаны свойства этих схем. Несмотря на существенные различия все приведенные в главе схемы относительной передачи обладают требованием

наличия у себя в тракте передатчика и приемника задержек с длительностью сопоставимой с длительностью бита и более. Данное требование существенно усложняет реализацию компактных средств связи на их основе.

На сегодняшний день ПХСС является единственной практически реализованной рабочей некогерентной схемой на основе хаотических сигналов, но у нее также имеются ограничения по возможным типам модуляции и множественного доступа.

На основании материалов обзора сделан вывод об актуальности задачи создания новых практически реализуемых схем прямохаотической связи с расширенными возможностями по типам модуляции и множественного доступа.

Во **Второй главе** предлагается прямохаотическая схема относительной передачи, использующая в качестве носителей информации хаотические радиоимпульсы. Рассматривается структура предлагаемой схемы. Приводится описание ее математической модели, а также результаты проведенного моделирования.

В предлагаемой прямохаотической схеме относительной передачи используются хаотические радиоимпульсы с большой базой B ($B = 2\Delta F \cdot T_{\text{и}}$, где ΔF – полоса несущего информацию импульса, а $T_{\text{и}}$ – его длительность) или процессингом K ($K = \Delta F \cdot T_{\text{и}}$). Обычно процессинг имеет величину от десятков до сотен. Это означает, что время автокорреляции хаотических радиоимпульсов мало и составляет незначительную часть от их длительности. Если, например, использовать сверхширокополосные хаотические сигналы в микроволновом диапазоне частот, то при полосе несущего сигнала 2 ГГц, время его автокорреляции составляет единицы наносекунд. Сдвинутый на такой или больший интервал времени хаотический сигнал будет практически ортогонален исходному сигналу. Задержки с подобными временами запаздывания легко и компактно реализуются, например, с помощью тонких микроволновых кабелей с длиной в несколько десятков сантиметров. Структура предлагаемой схемы относительной передачи показана на рисунках 1, 2.

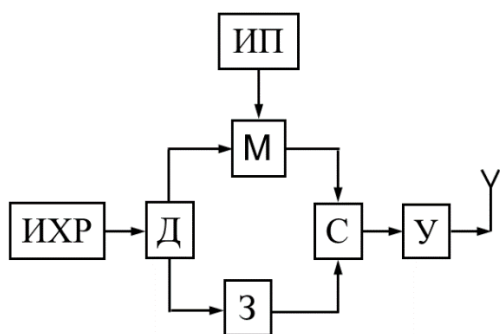


Рисунок 1 – Структура передатчика: ИХР – источник хаотических радиоимпульсов; Д – делитель мощности пополам; ИП – информационная последовательность; М – модулятор; З – задержка; С – сумматор; У – усилитель.

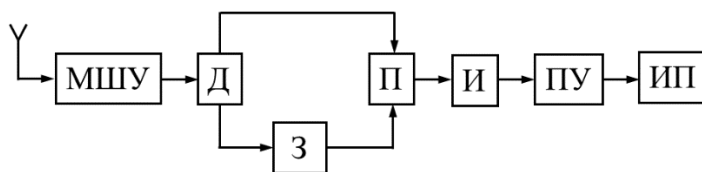


Рисунок 2 – Структура приемника: МШУ – малошумящий усилитель; Д – делитель мощности пополам; З – задержка; П – перемножитель; И – интегратор; ПУ – пороговое устройство; ИП – информационная последовательность.

Передатчик. Источник хаотических радиоимпульсов (ИХР) формирует импульсы длительностью $T_{и}$, промежутки между импульсами – защитные интервалы имеют длительность $T_{з}$. Сумма $T_{и}$ и $T_{з}$ представляет собой длительность передаваемого бита $T_{б}$. Каждый импульс поступает в делитель мощности пополам (Д), после которого попадает в два канала. В первом канале он поступает на модулятор (М), где модулируется потоком информационного сигнала (ИП – информационный поток) путем умножения на ± 1 , а во втором канале поступает на блок задержки (З), где задерживается на время τ , большее либо равное времени автокорреляции сигнала источника. Умножение на $+1$ соответствует передаче «1», умножение на -1 – передаче «0». После этого сигналы поступают на сумматор (С), суммарный сигнал поступает на вход в антенны и излучается.

Приемник. Принятый антенной сигнал делится пополам и попадает в два канала. В первом канале никаких действий с сигналом не производится, и он поступает на перемножитель (П). Во втором канале сигнал задерживается на время τ после чего также поступает на перемножитель. Импульс, полученный с выхода перемножителя, попадает на интегратор (И), где интегрируется в течение времени $T_{и}$. Затем сигнал поступает на пороговое устройство (ПУ) с нулевым

порогом. Если поступивший сигнал больше нуля, то пороговое устройство фиксирует прием «1», если же он меньше нуля, то фиксируется прием «0».

На основе структуры предлагаемой прямохаотической схемы относительной передачи была построена ее математическая модель. Модель включала в себя генератор хаоса с 2.5 степенями свободы, описываемый системой из 5 дифференциальных уравнений; также фильтр нижних частот второго порядка, описываемый системой из 2 дифференциальных уравнений; плюс по 1 уравнению для описания остальных операций, производимых с потоком импульсов в передатчике и приемнике. Переменные системы уравнений представляют значения сигнала в различных точках схемы. В процессе моделирования успешно передавались потоки двоичных бит.

В отличие от схемы относительной передачи DCSK в предлагаемой схеме относительной передачи используются задержки значительно меньшей длительности, что облегчает ее практическую реализацию в микроволновом диапазоне частот.

В **Третьей главе** производятся расчеты аналитической оценки помехоустойчивости прямохаотической схемы относительной передачи данных, а также приводятся результаты расчетов для разных значений процессинга импульсов. Исследуется возможность и потенциал использования хаотических импульсов с различным процессингом (сверх- и гиперширокополосные) в качестве носителей информации в предлагаемой прямохаотической схеме относительной передачи.

Под сверхширокополосными системами связи в настоящее время понимаются системы, использующие сигналы с относительной полосой не менее 20% или с абсолютной полосой не менее 500 МГц в диапазоне частот от 3.1 до 10.6 ГГц. Под гиперширокополосными системами принято понимать системы связи на основе сигналов с полосой частот не менее 10 ГГц. Процессинг K зависит как от полосы сигнала, так и от его длительности. В принципе, значения процессинга как сверхширокополосного, так и гиперширокополосного сигнальных элементов, несущих информацию, могут варьироваться в широких пределах, начиная с

единиц и кончая сотнями тысяч и более. Однако именно величина процессинга будет в основном определять устойчивость схемы связи к шумам.

В главе получено аналитическое выражение для вероятности ошибок на принятый бит $P_{\text{ош}}$:

$$P_{\text{ош}} = f \left(N_c \Delta F T_{\text{и}} / \sqrt{N_c N_0 \Delta F T_{\text{и}} \left(2 + \frac{N_0}{2N_c} + \frac{5N_c}{2N_0} \right)} \right), \quad (1)$$

где $f(x) = \left[1 - \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \right]$, N_c – спектральная плотность хаотических импульсов источника, N_0 – спектральная плотность шума в канале, ΔF – полоса частот хаотических импульсов источника.

Количественные оценки вероятностей ошибок при наличии внешнего шума для различных значений процессинга хаотических радиоимпульсов представлены на рисунке 3.

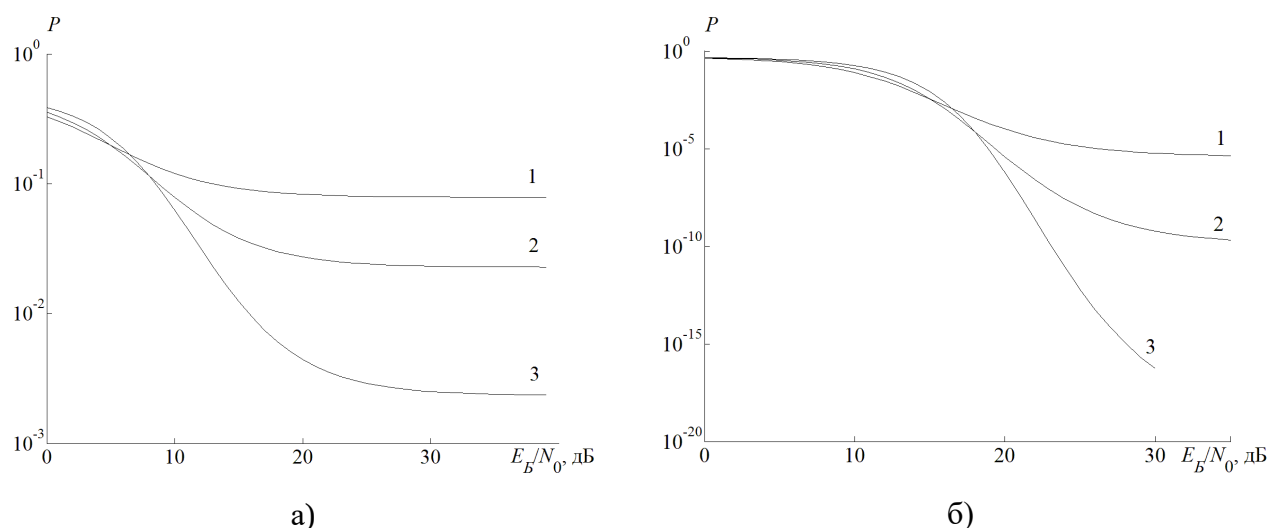


Рисунок 3 – Зависимости вероятности ошибки от отношения энергии бита к спектральной плотности шума при значениях процессинга K : а) кривая 1 – $K = 5$, кривая 2 – $K = 10$, кривая 3 – $K = 20$; б) кривая 1 – $K = 50$, кривая 2 – $K = 100$, кривая 3 – $K = 200$.

Расчет вероятностей ошибок производился по формуле (1). Из рисунка 3а видно, что при значениях $K \leq 20$ вероятность ошибки в рассматриваемой схеме передачи нельзя снизить до величины меньше 10^{-3} даже при очень больших отношениях сигнал/шум. С другой стороны, при $K > 100$ вероятность ошибки меньше 10^{-5} уже при отношениях E_B/N_0 меньше 20 дБ (рисунок 3б). Для таких

значений процессинга отношение сигнал/шум (SNR), при котором возможно извлечение сигнала, становится уже меньше 0 дБ. При дальнейшем увеличении процессинга полезный сигнал может быть извлечен даже из-под шума.

Исходя из сделанных оценок, можно утверждать, схема относительной передачи с хаотическими радиоимпульсами является неплохим кандидатом для класса беспроводных сверх- и гиперширокополосных систем передачи информации.

В Четвертой главе исследуется возможность реализации режима многопользовательского доступа в предлагаемой прямохаотической схеме относительной передачи. Рассматривается структура режима множественного доступа для предлагаемой схемы. Приводится описание построенной математической модели режима многопользовательского доступа, а также результаты проведенного моделирования.

При достаточно большом процессинге сигнала предлагаемая схема относительной передачи будет оставаться работоспособной даже при значительном уровне внешних шумов (SNR). В качестве этих внешних шумов могут, в частности, выступать сигналы других хаотических передатчиков, работающих в том же диапазоне частот. Это свойство схемы может быть положено в основу организации работы системы связи с множественным доступом. Пусть имеется M пар передатчиков и приемников. Все передатчики одновременно излучают, вообще говоря, разные сигналы, которые попадают, как к своим приемникам в качестве полезного сигнала (точнее часть сигнала, попадающего в «свой» приемник, является полезной, а часть представляет собой собственный шум схемы), так и в «чужие» приемники в качестве шумового (интерферирующего) сигнала. Для получения теоретической оценки будем считать, что во всех M передатчиках используются генераторы хаоса с одинаковыми статистическими и спектральными характеристиками выходного сигнала, время автокорреляции хаотического сигнала равно τ_0 , длительности импульсов во всех парах приемопередатчиков равны. Времена задержек в j -ой паре приемопередатчиков $\tau_j = j \cdot \tau_0$, $j = 1, 2, 3, \dots, M$. Такой

набор задержек обеспечивает отсутствие корреляции своего сигнала в любом из M приемников с чужими сигналами.

В главе получены теоретические оценки зависимости числа пользователей M от процессинга K при вероятности ошибок 10^{-3} , которые представлены в таблице 1.

Таблица 1. Зависимость числа пользователей M и скорости передачи R в схеме $(DC)^2$ от процессинга K при вероятности ошибок 10^{-3} и полосе сигнала 2 ГГц.

K	15	100	150	200	300	400	800	1000	2000	4000
M	1	2	3	4	6	7	11	12	20	31
R , Мбит/с	64	10	6.6	5.0	3.3	2.5	1.25	1.0	0.5	0.25

Для практического подтверждения возможности организации многопользовательского доступа на основе схемы относительной передачи и проверки полученных теоретических оценок было проведено компьютерное моделирование. При этом задержки в приемопередатчиках подбирались таким образом, чтобы исключить возможность относительного корреляционного приема «чужих» сигналов. Это достигалось тем, что в передатчиках использовались сигналы с одинаковым временем автокорреляции τ , длины импульсов и защитных интервалов были одинаковы, а линии задержек у приемников и передатчиков в парах с номерами 1, 2, ..., M были равны, соответственно: τ , $2\cdot\tau$, ..., $M\cdot\tau$. Аналогично схеме с 1 парой передатчик/приемник модель схемы с несколькими парами передатчиков и приемников представляет собой систему дифференциальных уравнений. Моделирование в целом дало хорошее совпадение с оценками в таблице 1. В качестве примера приведем результаты для $M = 4$. Согласно таблице 1, вероятность ошибки $p = 10^{-3}$ достигается при процессинге $K > 200$. Расчеты проводились для процессингов 100, 200 и 300. При процессинге 100 и длительности информационной последовательности 1000 бит в каждом из каналов обнаруживалось более 10 ошибок. При процессинге 200, для той же длины последовательности, наблюдались единичные ошибки. При моделировании с процессингом 300 ошибки для последовательности длиной 1000 бит не наблюдались.

Таким образом, как теоретические оценки, так и результаты моделирования подтверждают возможность использования прямохаотической схемы относительной передачи в многопользовательских системах сверхширокополосной беспроводной связи.

В **Пятой главе** предлагается созданный на основе прямохаотической схемы относительной передачи экспериментальный макет. Цель данной главы – создание и исследование макета схемы относительной передачи для получения экспериментальных результатов, доказывающих работоспособность предложенного решения и его практическую реализуемость, обоснованные ранее при теоретических исследованиях и компьютерном моделировании.

В главе производится описание принципов функционирования и характеристик разработанного макета. Приводятся экспериментальные результаты работы с макетом при передаче данных по проводному каналу.

Макет передатчика в эксперименте соответствует схеме передатчика на рисунке 1. В качестве рабочего диапазона частот для экспериментов был выбран участок спектра частот 200...500 МГц. Делитель Д в передатчике имеет рабочую полосу 1 ГГц. При инверсном включении такое же устройство использовалось в качестве сумматора. В передатчике и приемнике необходимо иметь одинаковые задержки (τ) с временем запаздывания, равным или превышающим время автокорреляции импульсов, формируемых ИХР. За время 4–5 нс автокорреляционная функция хаотических радиоимпульсов источника спадает примерно на порядок относительно максимума. Для формирования задержек с таким запаздыванием был использован коаксиальный СВЧ-кабель длиной 1 м.

Следующий элемент схемы передатчика – модулятор. Его функция заключается в манипуляции знаком входного сигнала: на выходе модулятора нужно иметь сигнал того же знака, что и на входе при передаче «1» и сигнал противоположного входному сигналу знака при передаче «0». Модулятор состоит из двухпозиционного ключа, инвертирующего элемента и сумматора. В качестве инвертирующего элемента была использована задержка на время спадания автокорреляционной функции источника до минимума. В первом минимуме знак

автокорреляционной функции отрицателен, а по абсолютному значению меньше максимума на 20...30%. Таким образом, на выходе инвертирующего блока формируется хаотический импульс, знак значений которого противоположен знаку значений входного импульса. Сравнение с нулевым порогом значений максимума и минимума автокорреляционной функции будет всегда давать противоположный по знаку результат, что соответствует критерию детектирования бит на приемнике. Минимум автокорреляционной функции сигнала источника находится при задержке приблизительно 1 нс. Это соответствует запаздыванию во фрагменте кабеля длиной 0.23 м. Именно такой фрагмент кабеля и использовался в макете в качестве элемента, инвертирующего поток импульсов.

В экспериментальной установке источник хаотических радиоимпульсов формирует импульсы длительностью $T_{\text{и}} = 2$ мкс. Защитные интервалы между импульсами имеют длительность $T_{\text{з}} = 4$ мкс, что соответствует скважности 3. Соответственно $T_{\text{б}} = 6$ мкс. В передатчике каждый импульс, сформированный источником, поступает в делитель Д, после которого попадает в два канала. В первом канале он поступает в модулятор, а во втором канале задерживается на время $\tau \approx 5$ нс. В зависимости от значения информационного бита импульс либо проходит без изменений (передача «1»), либо инвертируется (передача «0»). Сигналы с выхода модулятора и линии задержки суммируются, суммарный сигнал усиливается и поступает в коммуникационный канал.

Макет приемника в эксперименте соответствует схеме приемника на рисунке 2. Перемножитель был реализован на широкополосной микросхеме перемножения аналоговых сигналов с рабочей полосой частот от 0 до 1 ГГц. Обработка сигнала с выхода перемножителя осуществлялась в два этапа. На первом этапе при помощи осциллографа с полосой частот 500 МГц производилась первичная обработка сигнала, т.е. исключение из него компонент выше 500 МГц, оцифровка и формирование текстовых файлов, содержащих информацию (csv-файлов) и записываемых на внешнее устройство обработки сигнала (персональный компьютер). На втором этапе в среде Matlab осуществлялось

интегрирование сигнала с помощью цифрового фильтра нижних частот (ФНЧ). На созданном макете схемы относительной передачи была проведена серия экспериментов с использованием СВЧ-кабеля в качестве физического канала связи. В процессе экспериментов макет предлагаемой схемы работал в непрерывном режиме, передавая поток импульсов. Длина кабеля, выступавшего в роли канала передачи, составляла 50 см. В результате экспериментов потоки данных были успешно переданы от передатчика на приемник.

Типичные результаты экспериментов представлены на рисунках 4, 5. На рисунке 4 изображен фрагмент из 10 импульсов генератора источника, на рисунке 5 изображен фрагмент огибающей тех же 10 импульсов на выходе ФНЧ приемника. Из рисунка 5 видно, что путем сравнения с нулевым порогом из этих 10 импульсов может быть продетектирована последовательность символов 1000101100.

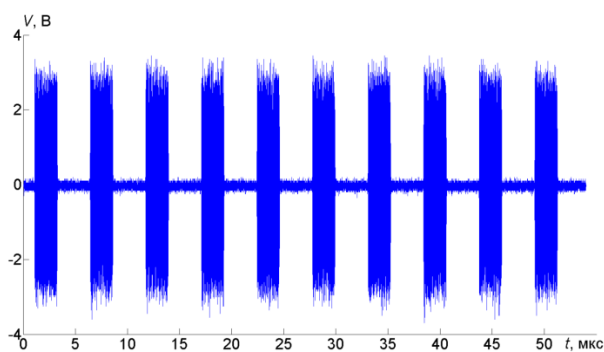


Рисунок 4 – Импульсы на выходе ИХР передатчика.

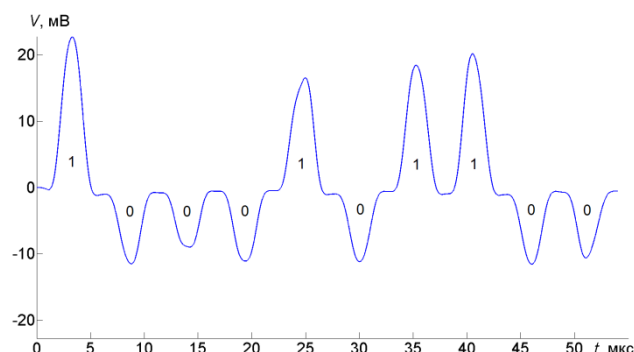


Рисунок 5 – Сигнал на выходе ФНЧ приемника.

В ходе проведенных исследований была разработана и изготовлена установка для относительной СШП прямохаотической передачи. На этой установке были впервые проведены эксперименты по передаче цифровой информации и показаны практическая реализуемость и работоспособность предлагаемой прямохаотической схемы относительной передачи.

В **Заключении** суммируются полученные результаты и делаются выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Предложена схема передачи информации на основе хаотических радиоимпульсов, которая относится к классу схем с относительной передачей. Предложенная схема обладает расширенными возможностями по методам модуляции и множественному доступу по сравнению с исходной ПХСС. В схеме отсутствуют задержки большой длительности, присущие предшествующим схемам относительной передачи с использованием хаотических сигналов.

2. Создана и описана математическая модель предложенной схемы относительной передачи. Приведены результаты проведенного моделирования, демонстрирующие работоспособность схемы.

3. Теоретически исследована возможность и потенциал использования хаотических импульсов с различным процессингом (сверх- и гиперширокополосные) в качестве носителей информации в предложенной прямохаотической схеме относительной передачи. Для этого приведены полученные результаты аналитических расчетов характеристик помехоустойчивости схемы для различных значений процессинга импульсов источника от единиц до миллионов.

4. Предложен метод разделения каналов в прямохаотической схеме относительной передачи, основанный на корреляционных свойствах хаотических радиоимпульсов. Показана возможность реализации режима многопользовательского доступа в предложенной схеме.

5. Создан лабораторный макет новой прямохаотической схемы относительной передачи, на котором в ходе экспериментальных исследований подтверждена работоспособность схемы и ее практическая реализуемость, обоснованные ранее при теоретических исследованиях и компьютерном моделировании.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах из списка ВАК РФ

1. Дмитриев А.С., Мохсени Т.И., Сьерра-Теран К.М. Относительная передача информации на основе хаотических радиоимпульсов // Радиотехника и Электроника, 2018, т. 63, № 10, с. 1–9.
2. Дмитриев А.С., Мохсени Т.И., Сьерра-Теран К.М. Сверх- и гиперширокополосная относительная передача информации на основе хаотических радиоимпульсов // Прикладная нелинейная динамика, 2018, т. 26, № 4, с. 59–74.
3. Dmitriev A.S., Mokhseni T.I., Sierra-Teran C.M. Differentially coherent communication scheme based on chaotic radio pulses // Nonlinear phenomena in complex systems, 2018, vol. 21, no. 3, p. 237–246.
4. Дмитриев А.С., Мохсени Т.И., Сьерра-Теран К.М. Моделирование системы относительной передачи информации на основе хаотических радиоимпульсов в среде ADS // Прикладная нелинейная динамика, 2019, т. 27, № 5, с. 72–86.
5. Дмитриев А.С., Мохсени Т.И., Сьерра-Теран К.М. Многопользовательский доступ в системах относительной передачи информации на основе хаотических радиоимпульсов // Письма в ЖТФ, 2020, т. 46, № 13, с. 47–50.
6. Дмитриев А.С., Мохсени Т.И. Множественный доступ в системах относительной передачи информации с хаотическими радиоимпульсами // Радиотехника и Электроника, 2021, т. 66, № 5, с. 476–482.
7. Дмитриев А.С., Мохсени Т.И., Петросян М.М. Экспериментальная реализация относительной схемы беспроводной передачи информации на хаотических радиоимпульсах // Письма в ЖТФ, 2022, т. 48, № 18, с. 10–13.
8. Дмитриев А.С., Мохсени Т.И., Петросян М.М. Экспериментальное исследование относительной схемы передачи на хаотических радиоимпульсах // Радиотехника и Электроника, 2023, т. 68, № 2, с. 165–170.

9. Мохсени Т.И., Петросян М.М. Эксперименты по прямохаотической относительной передаче данных в проводном канале связи // Прикладная нелинейная динамика, 2023, т. 31, № 1, с. 21–31.

Доклады на конференциях

1. Дмитриев А.С., Мохсени Т.И., Сьерра-Теран К.М. Схема относительной передачи информации на основе хаотических радиоимпульсов // Тезисы докладов молодых ученых XVIII научной школы «Нелинейные Волны – 2018», 26 февраля – 4 марта, 2018, Нижний Новгород, Россия, с. 115–116.

2. Дмитриев А.С., Мохсени Т.И., Сьерра-Теран К.М. Относительная сверхширокополосная передача двоичной информации на основе хаотических радиоимпульсов // Труды VIII Всероссийских Армандовских чтений (II Всероссийская научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн»), 26–28 июня, 2018, Муром, Россия, с. 62–70.

3. Дмитриев А.С., Мохсени Т.И., Сьерра-Теран К.М. Схема относительной передачи двоичной информации на основе сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов // Труды 28-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», т. 2, 9–15 сентября, 2018, Севастополь, Россия, с. 350–355.

4. Дмитриев А.С., Мохсени Т.И., Сьерра-Теран К.М. Относительная передача двоичной информации на основе сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов // Тезисы докладов международной конференции Динамические системы в науке и технологиях (DSST-2018), 17–21 сентября, 2018, Алушта, Россия, с. 109–111.

5. Мохсени Т.И., Сьерра-Теран К.М. Сверхширокополосная прямохаотическая относительная передача информации // Радиотехнические системы, 26–27 апреля, 2019, Ярославль, Россия, с. 5–9.

6. Dmitriev A.S., Mokhseni T.I., Sierra-Teran C.M. Direct chaotic differentially coherent communication scheme // SYCHROINFO (Systems of signal synchronization, generating and processing in telecommunications), 01–03 July 2019, Yaroslavl, Russia, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8813929>.

7. Дмитриев А.С., Мохсени Т.И., Сьерра-Теран К.М. Сверхширокополосная прямохаотическая относительная передача данных // Тезисы докладов XIII Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь», 25–27 ноября, 2019, Москва, Россия, с. 190–194.

8. Мохсени Т.И., Сьерра-Теран К.М. Моделирование прямохаотической относительной схемы передачи данных в среде ADS // Тезисы докладов XIX научной школы Нелинейные Волны – 2020, 29 февраля – 6 марта, 2020, Нижний Новгород, Россия, с. 175–176.

9. Дмитриев А.С., Мохсени Т.И., Сьерра-Теран К.М. Беспроводная относительная передача информации с множественным доступом на основе хаотических радиоимпульсов // Тезисы докладов XIX научной школы Нелинейные Волны – 2020, 29 февраля – 6 марта, 2020, Нижний Новгород, Россия, с. 103–104.

10. Мохсени Т.И., Сьерра-Теран К.М. Моделирование прямохаотической системы относительной передачи информации в среде ADS // Труды II всероссийской научно-практической конференции «Физика, техника и технология сложных систем», 27–28 апреля, Ярославль, Россия, 2020, с. 190–191.

11. Дмитриев А.С., Мохсени Т.И., Сьерра-Теран К.М. Многопользовательский доступ в системах относительной передачи информации с хаотическими носителями // Труды Всероссийских открытых Армандовских чтений (Всероссийская научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн»), 23–25 июня, 2020, Муром, Россия, с. 260–264.

12. Мохсени Т.И. Схемотехническая модель относительной передачи данных на основе хаотических радиоимпульсов // Труды 30-й Международной

Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», т. 2, 6–12 сентября, 2020, Севастополь, Россия, с. 104–105.

13. Дмитриев А.С., Мохсени Т.И., Сьерра-Теран К.М. Многопользовательский доступ в беспроводных системах относительной передачи информации с хаотическими носителями // Труды 30-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», т. 2, 6–12 сентября 2020, Севастополь, Россия, с. 98–99.

14. Мохсени Т.И., Сьерра-Теран К.М. Схемотехническое моделирование системы относительной передачи данных на основе хаотических радиоимпульсов // Тезисы докладов XIV Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь», 23–25 ноября, Москва, Россия, 2020, с. 192–196.

15. Дмитриев А.С., Мохсени Т.И., Петросян М.М. Прямохаотическая относительная передача данных в реальном канале связи // Труды Всероссийских открытых Армандовских чтений (Всероссийская научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн»), 28–30 июня, 2022, Муром, Россия, с. 169–175.

16. Дмитриев А.С., Мохсени Т.И., Петросян М.М. Эксперименты по прямохаотической относительной передаче информации в реальном канале связи // Труды 32-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 11–17 сентября 2022, Севастополь, Россия, выпуск 4, с. 27–28.

Монографии

1. Андреев Ю.В., Гуляев Ю.В., Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Кузьмин Л.В., Лазарев В.А., Рыжов А.И., Мохсени Т.И. Процессы передачи и обработки информации в системах со сложной динамикой. М.: Техносфера, 2019. 320 с.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ В АВТОРЕФЕРАТЕ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котельников В.А. Сигналы с максимальной и минимальной вероятностями обнаружения // РЭ. 1959. №3. С. 354–358.
2. Харкевич А.А. Передача сигналов модулированным шумом // Электросвязь. 1957. № 11. С. 42–46.
3. Петрович Н.Т., Размахнин М.К. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Советское радио, 1969. 232 с.
4. Pecora L.M., Carroll T.L. Synchronization in chaotic systems // Phys. Rev. Lett. 1990. V. 64. No. 8. P. 821–824.
5. Волковский А.Р., Рульков Н.В. Синхронный хаотический отклик нелинейной системы передачи информации с хаотической несущей // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. № 3. С. 71–75.
6. Kocarev L., Halle K.S., Eckert K. et al. Experimental demonstration of secure communications via chaotic synchronization // Int. J. Bifurcation and Chaos. 1992. V. 2. No. 3. P. 709–713.
7. Cuomo M. K., Oppenheim A.V., Strogatz S.H. Synchronization of Lorenz-based chaotic circuits with applications to communications // IEEE Trans. Circuits and Systems. 1993. V. 40. No. 10. P. 626–633.
8. Downes P.T. Secure communication using chaos synchronization // SPIE. 1993. V. 2038. P. 227–234.
9. Бельский Ю.Л., Дмитриев А.С. Передача информации с помощью детерминированного хаоса // РЭ. 1993. Т. 38. № 7. С. 1310–1315.
10. Dedieu H., Kennedy M., Hasler M. Chaos shift keying: Modulation and demodulation of a chaotic carrier using self-synchronising Chua's circuits // IEEE Trans. Circuits and Systems. 1993. V. CAS-40. No. 10. P. 634–642.
11. Бельский Ю.Л., Дмитриев А.С. Влияние возмущающих факторов на работоспособность системы передачи информации с хаотической несущей // РЭ. 1995. Т. 40. № 2. с. 265–281.

12. Kolumban G., Vizvari B., Schwarz W., Abel A. Differential chaos shift keying: A robust coding for chaotic communication // in Proc. NDES'96. 1996, P. 87–92.
13. Sushchik M., Tsirning L.S., Volkovskii A.R. Performance analysis of correlation-based communication schemes utilizing chaos // IEEE Trans. on Circuits and Systems. 2000. V. 47. No. 12. P. 1684–1691.
14. Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Максимов Н.А. и др. Перспективы создания прямохаотических систем связи в радио и СВЧ-диапазонах // Радиотехника. 2000. № 3. С. 9–20.
15. Дмитриев А.С., Панас А.И., Старков С.О. и др. Способ передачи информации с помощью хаотических сигналов: Пат. РФ № 2185032. 27.07.2000.
16. Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Панас А.И., Старков С.О. Прямохаотические схемы передачи информации в сверхвысокочастотном диапазоне // РЭ. 2001. Т. 46. № 2. С. 224–233.
17. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Клецов А.В. и др. Сверхширокополосная беспроводная связь и сенсорные сети // РЭ. 2008. Т. 53. № 10. С. 1278–1289.
18. Дмитриев А.С., Лазарев В.А., Герасимов М.Ю., Рыжов А.И. Сверхширокополосные беспроводные нательные сенсорные сети // РЭ. 2013. Т. 58. № 12. С. 1160–1170.