

На правах рукописи



**Самойлов Владислав Сергеевич**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ  
АДАПТИВНОГО КОДИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ  
СООБЩЕНИЙ В ЛОКАЛЬНЫХ СЕТЯХ ТЕЛЕМЕТРИИ И  
УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность: 2.2.15 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Владимир – 2026 г.

Работа выполнена на кафедре «Радиотехника и радиосистемы» ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» - (ВлГУ)

|                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Научный руководитель</b>  | <b>Самойлов Александр Георгиевич,</b><br>доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Радиотехники и радиосистем» ВлГУ, г. Владимир.                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Официальные оппоненты</b> | <b>Бабанов Николай Юрьевич,</b><br>доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроника и сети ЭВМ» Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексеева.<br><br><b>Тоискин Василий Евгеньевич,</b><br>доктор технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизированные системы боевого управления» Филиала «Военной академии ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого», г. Серпухов. |
| <b>Ведущая организация</b>   | Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, г. Рязань.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

Защита диссертации состоится «29» сентября 2026 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.281.01 при ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» - (ВлГУ) по адресу 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, корпус 3, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВлГУ и на сайте университета [https://diss.vlsu.ru/uploads/media/Dissertacija\\_V.S.Samoilova.pdf](https://diss.vlsu.ru/uploads/media/Dissertacija_V.S.Samoilova.pdf)

Автореферат разослан «05» июля 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Самойлов С.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время сети управления и телеметрии широко используются в различных отраслях народного хозяйства, включая аэрокосмическую промышленность, медицину, энергетику, транспорт, сельское хозяйство и др. Дистанционное управление объектами, мониторинг процессов и территорий являются основными функциями таких сетей. Важные задачи, выполняемые сетями управления и телеметрии, накладывают на них и жесткие требования, к основным из которых можно отнести устойчивость к внешним воздействиям, минимальную задержку передачи данных, высокую пропускную способность, энергоэффективность и высокую надежность.

Для обеспечения высоких качественных показателей цифровых сетей управления и контроля, часто работающих в условиях сложной помеховой обстановки, широко применяется помехоустойчивое кодирование передаваемой по сетям информации. Однако применение помехоустойчивого кодирования, наряду с положительным эффектом от его использования, создает и определенные проблемы, заключающиеся в увеличении времени доставки сообщений, росту передаваемого трафика и дополнительных расходов энергии. Поэтому тема диссертационного исследования, направленного на решение проблем, возникающих при использовании помехоустойчивого кодирования в сетях телеметрии и управления актуальна и своевременна.

**Степень разработанности темы.** В области применения методов и средств помехоустойчивого кодирования для повышения помехозащищенности передаваемой по каналам связи информации сделано много. Известно большое количество научных работ отечественных и зарубежных ученых, решавших задачи помехоустойчивого кодирования и его практического применения. Такие ученые как Л. М. Финк, И. С. Андронов, Н. П. Хворостенко, А. Г. Зюко, В. И. Борисов, В. М. Зинчук, Г. В. Овечкин, А. А. Сидоренко, Дж. Прокис, Л. Милстейн, Дж. Кларк, Э. Р. Берлекэмп, А. Витерби, У. Питерсон, И. С. Рид, Г. Соломон, Дж. Месси и многие другие развили теорию помехоустойчивого кодирования и методы его практического применения, однако проблема минимизации негативных эффектов от внедрения избыточности в сетевой трафик до настоящего времени нуждается в решении. Это и определило цель и задачи настоящей диссертационной работы.

**Цель работы:** Целью диссертационной работы является разработка и исследование методов, алгоритмов и реализующих их устройств адаптивного кодирования цифровых сообщений в локальных сетях телеметрии и управления.

Для реализации цели исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Предложить метод адаптации и определить набор параметров системы телеуправления для адаптивной подстройки.

2. Разработать и исследовать алгоритмы адаптивной перестройки параметров систем дистанционного управления и телеметрии.

3. Предложить методику определения достоверности передачи информации в адаптивных системах связи.

4. Создать приемно-передающие модули с адаптивным помехоустойчивым кодированием на примере каналов локальной сети управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА).

5. Провести модельные и натурные экспериментальные исследования синтезированных устройств.

**Объект исследования.** Объектом диссертационного исследования являются локальные сети управления и телеметрии.

**Предмет исследования.** Предметом исследования являются методы и алгоритмы адаптивного кодирования цифровых сообщений в локальных сетях телеметрии и управления.

**Научная новизна** достигнутых результатов состоит в следующем:

1. Для устранения выявленного противоречия при передаче по сетям дистанционного управления и телеметрии цифровых сообщений различной длительности предложено применять методы адаптивного помехоустойчивого кодирования цифровой информации.

2. Разработан и исследован новый метод адаптации каналов дистанционного управления, использующих короткие сообщения, путем снижения величины избыточности и увеличения длительности передаваемых символов.

3. Предложена методика адаптивного управления параметрами каналов дистанционного управления и телеметрии.

4. Исследованы разработанные алгоритмы адаптивной перестройки параметров канала управления и телеметрии на примере БПЛА.

5. Разработана и испытана методика определения достоверности принимаемой информации в адаптивных системах управления и телеметрии.

6. Предложен и исследован процесс синхронизации адаптивной приемно-передачи цифровых сигналов управления и телеметрии.

**Практическая значимость** результатов проведенного исследования состоит в следующем:

1. Разработан аппаратно-программный комплекс адаптивной перестройки параметров канала управления БПЛА, который демонстрирует выигрыш от

применения предложенных методов адаптивного кодирования цифровых сообщений в локальных сетях телеметрии и управления.

2. Предложенные методы и реализующие их алгоритмы адаптивной перестройки параметров каналов управления и телеметрии обеспечивают выигрыш по соотношению С/Ш до **4,5 дБ**.

3. Предложенные алгоритмы повышают достоверность передачи информации в локальных сетях управления и телеметрии до **80%**, либо сокращают время доставки сообщений.

4. Для разработчиков локальных систем управления и телеметрии разработаны практические рекомендации по внедрению и эксплуатации систем адаптивного помехоустойчивого кодирования передаваемой информации.

5. Результаты работы практически использованы в ООО «Ресурсный капитал», г. Владимир и в ООО «Студия 17», г. Москва

**Теоретическая значимость** диссертационной работы заключается в разработке и исследовании:

- новых методов адаптации каналов управления и телеметрии при сообщениях разной длительности;
- алгоритмов адаптивного управления параметрами канала управления и телеметрии;
- оценке достоверности передачи информации по каналам дистанционного управления;
- исследовании процессов синхронизации при приеме-передаче сигналов в адаптивных каналах управления и телеметрии.

**Методы исследования.** В работе использованы положения теории помехоустойчивого кодирования, теории адаптации, теории эксперимента, теории вероятностей и математической статистики, современные методы компьютерного моделирования.

**Реализация результатов работы.** Разработанные методы, алгоритмы и методика нашли практическое применение:

- При разработке и производстве систем дистанционного управления в кампании ООО «Ресурсный капитал», г. Владимир;
- При разработке программных продуктов кампанией ООО «Студия 17», г. Москва.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Алгоритмы адаптации, обеспечивающие повышение достоверности передачи цифровой информации на **4,5 дБ** в каналах дистанционного управления и телеметрии, работающих с различными по длительности сообщениями.

2. Предложенный и экспериментально исследованный метод адаптации, позволяющий при снижении скорости передачи информации, добиться повышения качества принимаемых информационных блоков **до 80%**.

3. Метод адаптивного управления избыточностью сетевого трафика каналов управления и телеметрии, защищенных помехозащитными кодами и работающих с различными по длительности сообщениями, позволяющий уменьшить используемые вычислительные ресурсы в среднем **на 27.7%**.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов исследования обусловлена корректностью математических выкладок, адекватностью моделей применительно к системам помехоустойчивого кодирования, согласованием результатов теоретического анализа с данными экспериментальных исследований, положительными результатами внедрения.

Результаты работы обсуждались на следующих научных конференциях:

- 73-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио, г. С. Петербург. – 2018.
- 37-й Всероссийской научно-технической конференции "Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем", г. Серпухов. - 2018;
- International Conference «MIST Aerospace», г. Красноярск. – 2018, 2019;
- XXV Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и системы» (ИСТ-2019), г. Н. Новгород. – 2019;
- XIII Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества», г. Москва. - 2019;
- International Conference «Materials Science and Engineering», Красноярск. – 2019, 2021;
- International Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering, APITECH-2019, Krasnoyarsk. – 2019;
- I International Scientific Conference «Contemporary Advances in Materials Science and Technology», Krasnoyarsk. - 2020;
- IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, г. Москва. – 2021;
- Международных научно-технических конференциях «Перспективные технологии в средствах передачи информации, г. Владимир. – 2019; 2021;
- 78-й Всероссийской конференции (с международным участием) "Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий" ("РЭУС-ИТ 2023"). Посвящённая "ДНЮ РАДИО", г. Москва. – 2023;
- Научно-технической конференции физического факультета ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород. – 2023;

- Научно-технической конференции АО «НПП ИСТОК им. Шокина, г. Фрязино, Моск. обл. – 2023;

- Международных научно-технических конференциях «Современные технологии в науке и образовании». – СТНО-2018, СТНО-2019, СТНО-2020, СТНО-2022, СТНО-2025, г. Рязань.

**Публикации.** Основные результаты диссертации изложены в 23 опубликованных работах, в том числе в 1 учебном пособии, 5-ти статьях в журналах из перечня ВАК, в 3-х статьях в изданиях, индексируемых в базе WoS и Scopus, в 2-х свидетельствах о регистрации программ для ЭВМ и в 12-ти других изданиях РИНЦ.

**Соответствие паспорту специальности.** Содержание диссертации соответствует пунктам 1 - 3, 5, 11 паспорта научной специальности 2.2.15 - «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения и приложения. Общий объем диссертационной работы вместе с приложениями составляет 145 страниц, 42 рисунка, 10 таблиц, списка литературы из 109 наименований и приложений с актами внедрения.

**Личный вклад автора.** Изложенные в диссертации теоретические и экспериментальные результаты исследования получены соискателем лично, либо при его непосредственном участии. Часть работ опубликованы им без соавторства.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования и проанализирована степень ее разработанности. Приведена постановка научной задачи, определены цели и задачи исследования, указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость выполненной работы, методы проведенного исследования. Обоснованы положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации результатов работы и их достоверности.

**В первой главе** выполнен комплексный анализ современных сетей телеметрии и управления, сформулированы ключевые требования к их функционированию, исследованы физические и стохастические факторы, влияющие на качество и время доставки сообщений, а также проведён сравнительный обзор методов помехоустойчивого кодирования. Рассмотрены особенности применения сетей телеметрии в критически важных отраслях (аэрокосмическая промышленность, медицина, энергетика, транспорт, сельское хозяйство, системы безопасности).

Проанализированы физические процессы, деградирующие качество радиоканалов: многолучевое распространение, интерференционные замирания, атмосферное ослабление, эффект Доплера и сбои синхронизации. Рассмотрены методы компенсации негативных воздействий: равномерное распределение мощности, OFDM,

ММО, разнесённый приём, адаптивные системы с обратной связью. Исследованы математические модели, необходимые для оценки качества канала, в том числе:

- формула расчёта времени восстановления синхронизации:

$$T_{\text{синх}} = T_{\text{ср}} + \frac{T_c}{P},$$

$T_{\text{ср}}$  - среднее время, необходимое для определения сбоя синхронизации,  $T_c$  - длительность одного синхросигнала,  $P$  - количество синхросигналов, отправляемых для восстановления синхронизации.

- время когерентности, связанное с доплеровским разбросом частоты  $f_d$ :

$$T_k = \frac{1}{f_d} > T_s,$$

где  $T_s$  - длительность символа,  $T_k$  - время когерентности канала,  $f_d$  - доплеровский разброс по частоте.

Сделан вывод о том, что детерминированные и случайные факторы распространения сигналов требуют применения комплексных мер защиты, среди которых особое значение приобретает адаптивное управление.

Выполнен анализ методов помехоустойчивого кодирования цифровой информации. Классифицированы и описаны основные типы кодов: блочные линейные (Хэмминга, CRC, БЧХ, Рида–Соломона), сверточные и турбокоды (LDPC). Для кода Хэмминга указаны параметры  $(n,k)$  и минимальное кодовое расстояние  $d_{\min}=3$ . Для кодов Рида–Соломона рассмотрено основное уравнение кодирования:

$$c(x) = m(x) * g(x),$$

где  $c(x)$  — кодовое слово,  $m(x)$  — информационный полином,  $g(x)$  — генераторный полином, который выбирается как  $(x-\alpha) \cdot (x-\alpha^2) \dots (x-\alpha^t)$ .

Схема радиоканала с помехоустойчивым кодированием представлена на Рис. 1.

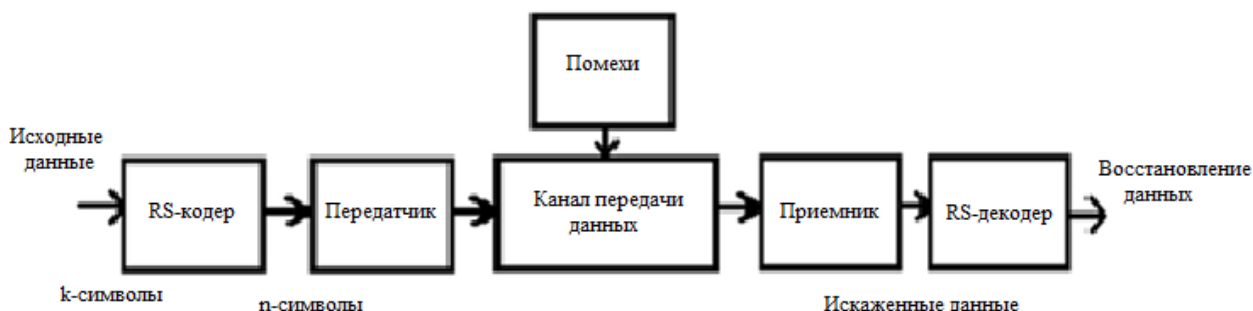


Рис. 1. Схема применения кода Рида-Соломона.

Описан принцип итеративного декодирования турбокодов с использованием алгоритма суммирования произведений. Показано, что без применения специальных мер вероятность ошибки в сложных радиоканалах составляет  $10^{-2} \dots 10^{-3}$ , тогда как помехоустойчивое кодирование позволяет снизить её до  $10^{-6}$  и менее, однако за это

приходится платить увеличением времени доставки и энергетическими затратами на передачу избыточных бит. Установлено, что вопросы практического применения адаптивных методов в системах дистанционного управления исследованы недостаточно, что формирует научную основу для дальнейших исследований. Определена цель исследования и поставлены задачи для ее реализации.

**Во второй главе** сформулированы и обоснованы алгоритмы адаптивного управления параметрами канала связи, предложена методика количественной оценки достоверности передачи информации, а также разработана структура синхронизации полудуплексных каналов радиуправления и телеметрии. Выполнен сравнительный анализ статических и адаптивных методов кодирования информации. Показано, что адаптивные методы кодирования (АМК) обеспечивают динамическую подстройку избыточности под текущее состояние канала, что повышает энергоэффективность, масштабируемость и отказоустойчивость систем, однако сопряжено с повышенными вычислительными затратами, задержками на начальном этапе адаптации и риском рассинхронизации моделей кодера и декодера при потере пакетов.

Разработаны алгоритмы адаптивной перестройки параметров канала управления на примере полудуплексной системы «Оператор – БПЛА». Предложены два варианта организации обратного канала. Первый вариант с временными интервалами  $b_1, b_2 \dots b_n$  между посылками управляющих сигналов, показанный на Рис.2.

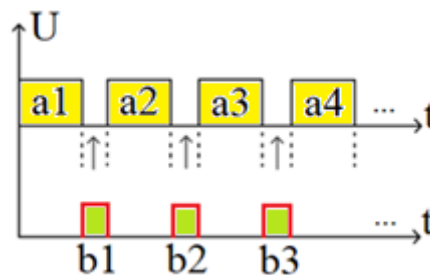


Рис. 2. Первый вариант построения канала полудуплексной системы связи.

И второй вариант с искусственными паузами между посылками управляющих сигналов (Рис. 3), обеспечивающий повышение пропускной способности прямого канала. На рисунках 2 и 3 указаны блоки команд управления ( $a_n$ ) и блоки телеметрии ( $b_n$ ).

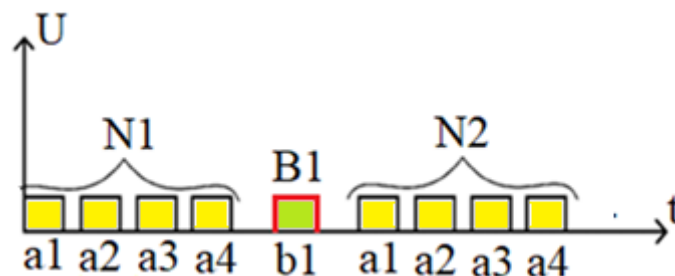


Рис. 3. Второй вариант построения канала полудуплексной системы связи.

Разработана методика настройки адаптивного канала. С помощью высокопроизводительного приёмопередатчика (трансивера) типа SX1276 с технологией дальней связи LoRa проведены эксперименты и полученные результаты сведены в таблицу зависимости дальности связи от чувствительности приёмника (RSSI) и кодовых скоростей, при разных кодовых скоростях и числа скачков при модуляции ППРЧ Табл.1.

Таблица 1. Предполагаемая дальность связи при выбранном режиме работы.

| Номер режима | Ширина полосы, кГц | Число изменений несущей частоты | Кодовая скорость внутреннего кода | Кодовая скорость внешнего кода | Длина преамбулы, байт | Число блоков информации в секунду | Чувствительность приёмника, дБм | Дальность, м |
|--------------|--------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------------|--------------|
| 1            | 500                | 128                             | 0.5                               | 0.55                           | 8                     | 100                               | -116,5                          | 132          |
| 2            | 250                | 128                             | 0.5                               | 0.55                           | 10                    | 50                                | -121.5                          | 237          |
| 3            | 250                | 256                             | 0.5                               | 0.45                           | 10                    | 25                                | -124.0                          | 313          |
| 4            | 125                | 128                             | 0.5                               | 0.26                           | 11                    | 15.15                             | -124.5                          | 367          |
| 5            | 250                | 512                             | 0.66                              | 0.29                           | 8                     | 12.5                              | -126.5                          | 421          |
| 6            | 250                | 1024                            | 0.8                               | 0.55                           | 7                     | 10.0                              | -129.0                          | 642          |

График зависимости дальности связи от чувствительности приемника при фиксированной мощности передатчика представлен на Рис. 4. При установленной мощности передатчика в 1 дБм, превышение расстояния  $d$ , характеризует потерю связи (условие, когда более 90% блоков считаются утерянными), для разных режимов работы канала связи, указанных на Рис. 4 цифрами 1 – 6 в соответствии с таблицей 1.

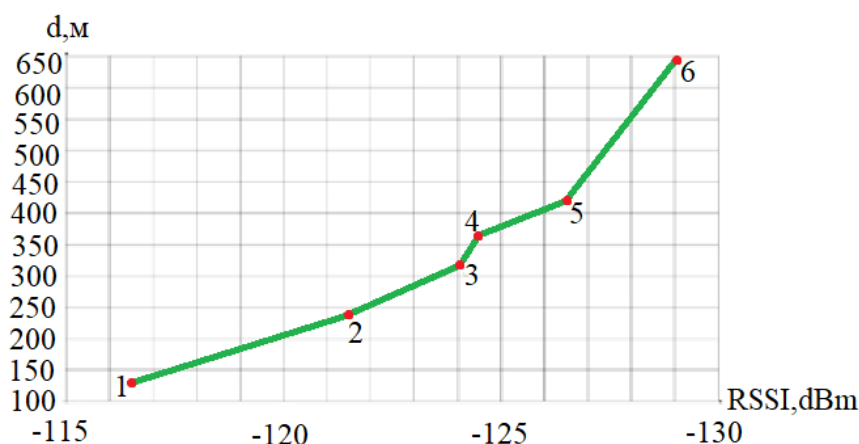


Рис. 4. Зависимость дальности связи от чувствительности приемника, при работе с мощностью передатчика 1 дБм.

В этой же главе разработаны блок-схемы алгоритмов функционирования приёмопередатчиков со стороны оператора и борта БПЛА, реализующие циклический обмен управляющими пакетами и телеметрической информацией о качестве связи.

Предложены механизмы предотвращения рассинхронизации параметров канала при резком изменении помеховой обстановки. Предложена методика определения достоверности передачи информации в адаптивных системах связи.

Структура информационного блока, включающего преамбулу, синхросимвол, заголовок, полезную нагрузку и CRC-сумму представлена на Рис. 5.



Рис.5. Компоненты информационного блока адаптивной системы связи.

Введён интегральный критерий – коэффициент достоверности принятой информации (КДПИ), учитывающий не только факт потери блоков, но и степень их искажения. Определены допустимые диапазоны значений коэффициентов потерянных блоков за счет не сходимости контрольной суммы:

$$[K_{CRC \text{ MIN}}, K_{CRC \text{ MAX}}],$$

где  $K_{CRC \text{ MIN}}=1/N_i$ , а  $N_i$  - общая длина информационной части блока в символах,

Для коэффициента потерянных блоков при кодировании с помощью кода Рида-Соломона получено выражение:

$$K_{\text{ПК max}} = K_{CRC \text{ MAX}} = \frac{\left( \frac{N_i + P + S_s}{P + S_s - 1} \right)}{N_i},$$

где  $N_i$ -длина информационной части, включая контрольную сумму (CRC),  $P$ -длина преамбулы, а  $S_s$ - длина синхросимвола.

Выведены расчётные выражения для КДПИ при использовании только CRC-контроля:

$$K = \frac{S_{\text{п}} + K_{CRC} * S_{CRC}}{M},$$

где  $S_{\text{п}}$  - сумма потерянных блоков из-за повреждения преамбулы или синхросимволов,  $K_{CRC}$  - потерянные блоки с коэффициентом, где не сходится контрольная сумма,  $S_{CRC}$  - сумма блоков, где не сошлось значение CRC,  $M$  - общее число отправленных блоков за единицу времени.

При совместном применении CRC и кодов Рида–Соломона:

$$K = \frac{((S_{\text{п}} + K_{\text{ПК}} * S_{RS}) + \sum_{i=1}^{S_i} (\frac{D_i}{N}))}{M},$$

где  $K_{\text{пк}}$  - блоки с коэффициентом, в которых помехоустойчивый код не смог исправить ошибки,  $D_i$  - число исправленных символов,  $N$  - общая длина информационной части,  $S_i$  - сумма блоков, которые удалось исправить,  $S_{RS}$  - сумма блоков, где не удалось исправить ошибки помехоустойчивым кодом.

Показано, что динамика КДПИ служит управляющим сигналом для адаптивного изменения скорости передачи, длины преамбулы и коэффициента расширения спектра в зависимости от пороговых значений качества канала. Разработана процедура синхронизации полудуплексного канала радиоуправления и телеметрии. Разработаны временные диаграммы синхронизации передачи информационных блоков и отправки телеметрического ответа показанные на Рис. 6.

На рисунке 6 представлены диаграммы работы приёмопередатчиков (ПП) на стороне Оператора и БПЛА. Период между отправкой блоков ( $T$ ), период паузы между отправкой нового блока ( $t_p$ ), время отправки блока ( $t_b$ ), период ожидания приема блока от приёмопередатчика Оператора ( $T_o$ ). (') в названии блока означает, что ПП в режиме приема ожидает свой блок информации или телеметрии. Каждый цвет блоков А и В означает, что блоки передаются при модуляции ППРЧ на разных частотах.

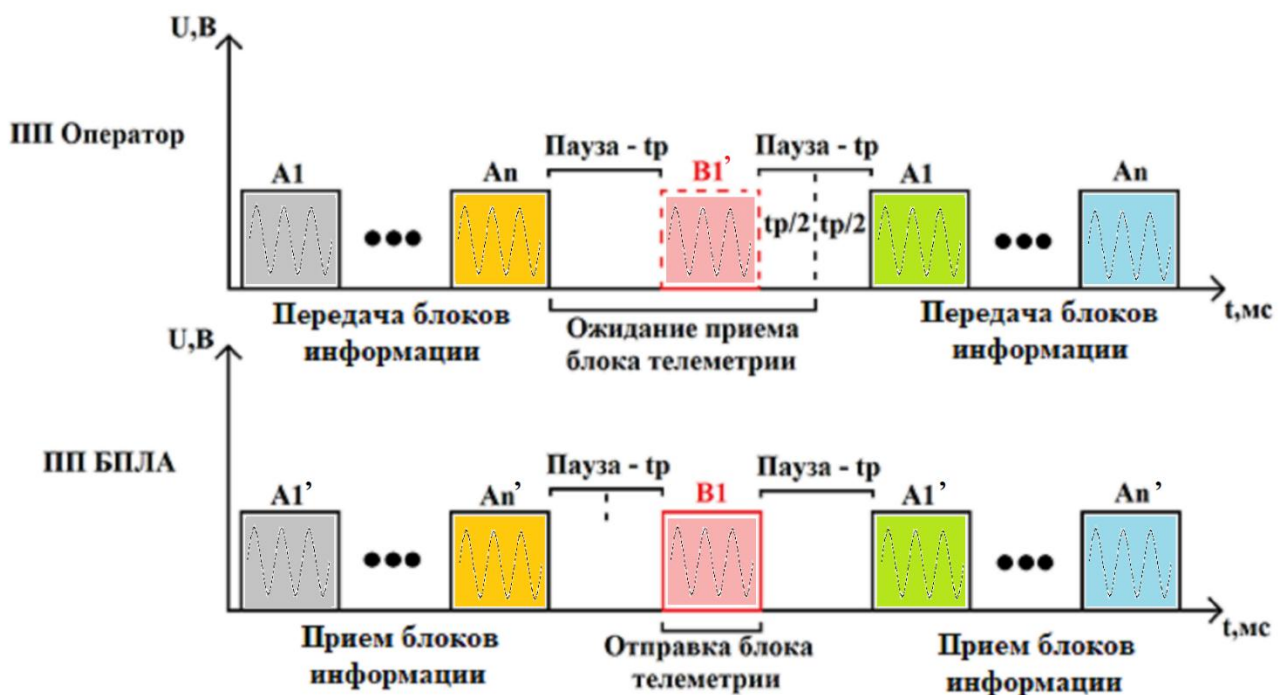


Рис. 6. Временная диаграмма синхронизации приемо-передачи блока телеметрии.

Определены формулы расчёта временных интервалов цикла передачи, ожидания и приёма, обеспечивающие устойчивую работу адаптивного канала при изменении дальности связи и уровня помех. Период между отправкой блоков состоит из времени отправки блока и паузы.

$$T = t_b + t_p,$$

Период ожидания приема блока состоит из времени отправки блока, паузы и половины времени паузы.

$$T_o = T + \frac{t_p}{2} = t_b + 1.5t_p,$$

**В третьей главе** выполнен синтез адаптивной системы радиопередачи и телеметрии на примере беспилотных летательных аппаратов (БРЛА). Проведен анализ и выбор элементной базы, разработано и изготовлено оборудование экспериментальной линии связи, проведена серия натурных экспериментов, а также исследованы вычислительные затраты и эффективность предложенных алгоритмов адаптации. Синтезирована архитектура адаптивной системы радиопередачи и телеметрии для двух вариантов организации канала связи: полудуплексного и дуплексного. Для полудуплексного варианта разработана схема, приведенная на Рис 7, с временным разделением приёма и передачи, где после приёма  $N$  блоков управления следует передача одного блока телеметрии.

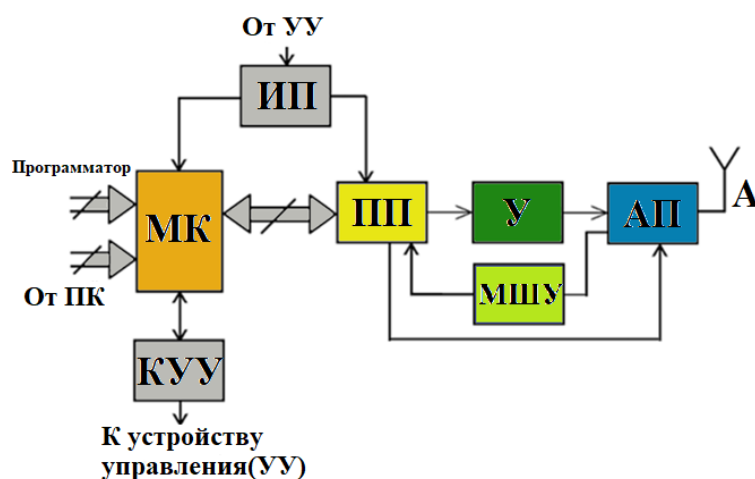


Рис.7. Структурная схема приемопередатчика на стороне Оператора.

Разработана функциональная схема комплекса системы полудуплексного радиоканала связи. Описаны алгоритмы синхронизации, предотвращения рассинхронизации при потере пакетов и механизм уникальной метки для идентификации «своего» сигнала.

Выполнен сравнительный анализ элементной базы. На основе параметров чувствительности, выходной мощности, поддерживаемых модуляций и гибкости настройки регистров обоснован выбор радиочастотного чипа типа SX1262F30, обладающего высокой чувствительностью (до  $-148$  дБм), мощностью до  $+33$  дБм и широким набором настраиваемых параметров (скорость кодирования, полоса пропускания, коэффициент расширения спектра  $SF$ ).

Приведены формулы расчёта полосы пропускания, символьной скорости и зависимости числа возможных значений символов от фактора расширения  $SF$ . На рисунке 8, проиллюстрирован механизм расширения спектра с помощью  $SF$ -фактора.

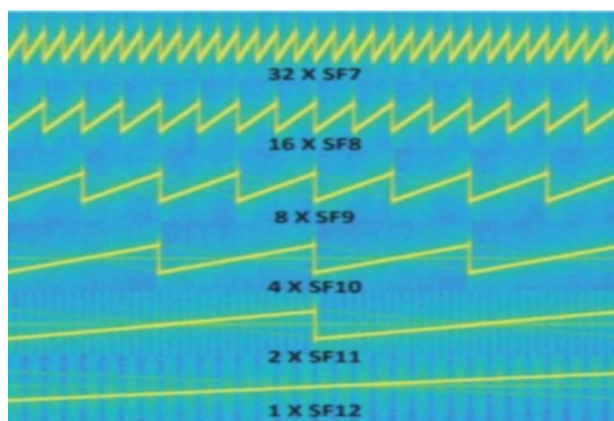


Рис.8. Расширение спектра с помощью sf-фактора.

Произведён выбор микроконтроллера на основе сравнения архитектур, частоты, объёма памяти и количества интерфейсов. С учётом выбранной элементной базы уточнена функциональная схема комплекса (Рис. 9).

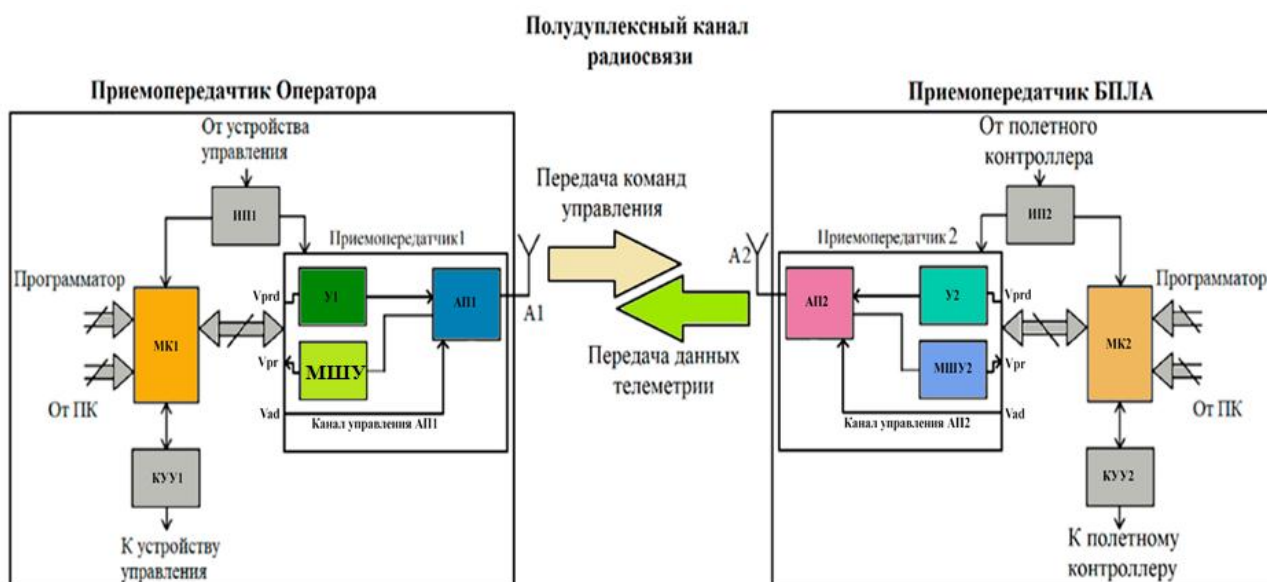


Рис. 9. Функциональная схема комплекса системы полудуплексного радиоканала связи, после выбора элементной базы.

Разработана и изложена методика проведения натурных экспериментальных исследований. Эксперименты проводились на расстояниях 700 м, 6.7 км и 14.7 км при прямой видимости, подтверждённой анализом профилей рельефа местности (Рис.10).

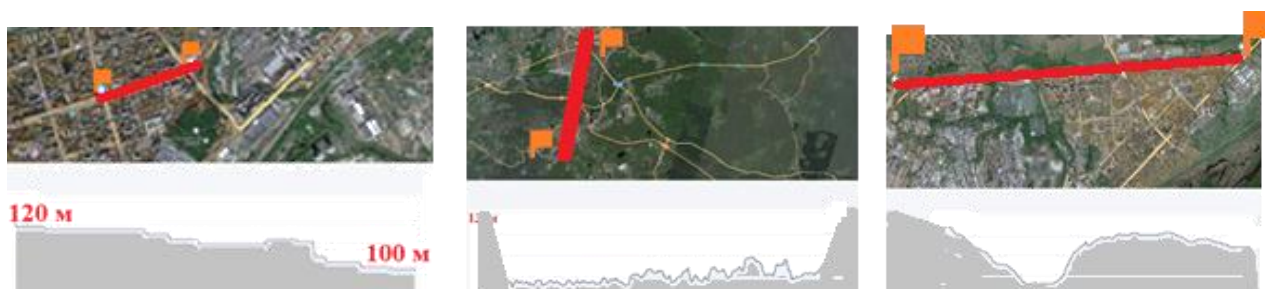


Рис. 10. Профили рельефа местности при прямой видимости на линии связи

Результаты экспериментов сведены в Табл. 2 и Табл.3.

Табл.2. Показания с ПП модуля Оператора

| Показания канала управления | TPWR, мВт          | RSSI, dBm | RQly, %  | RSNR, dB  |
|-----------------------------|--------------------|-----------|----------|-----------|
|                             | Дальность 700 м.   |           |          |           |
|                             | 2000               | -72...-67 | 96...100 | +11...+12 |
|                             | 1000               | -94...-71 | 79...100 | -2...+12  |
|                             | 100                | -86       | 97...99  | +6...+7   |
|                             | 10                 | -93...-92 | 87...88  | 0         |
|                             | 1                  | -96...-92 | 24...55  | -7...-4   |
|                             | Дальность 6,7 км.  |           |          |           |
|                             | 2000               | -88...-85 | 89...95  | +11       |
|                             | 1000               | -92...-88 | 60...81  | +10       |
|                             | Дальность 14,7 км. |           |          |           |
|                             | 2000               | -89...-80 | 70...92  | +9...+11  |

Табл. 3. Показания с ПП модуля Оператора по обратному каналу телеметрии.

| Показания по обратному каналу телеметрии | TRSS, dBm          | TQly, %  | TSNR, dB  |
|------------------------------------------|--------------------|----------|-----------|
|                                          | Дальность 700 м.   |          |           |
|                                          | -82...-72          | 97...100 | +10...+13 |
|                                          | Дальность 6,7 км.  |          |           |
|                                          | -87...-82          | 79       | +12       |
|                                          | Дальность 14,7 км. |          |           |
|                                          | -86...-78          | 85       | +11       |

Установлено, что на расстоянии до 5 км, при мощности передатчика в 1000 мВт, качество канала связи показывало значение до 82%. На расстоянии до 15 км, с мощностью передатчика в 2000 мВт, качества канала связи до 92%. Сделан вывод о возможности увеличения дальности связи в 1.5–2 раза за счет адаптивной подстройки параметров канала.

Выполнен анализ вычислительных затрат при адаптивном кодировании и рассмотрены особенности декодирования турбокодов и фонтанных кодов, оценена сложность операций кодирования и декодирования в полях Галуа. Выведены расчётные выражения для времени декодирования при варьировании полезной нагрузки:

$$T_{dec} = ((n - (k + x_{pn})) * (3n - (k + x_{pn}) + 1)) * t1,$$

где  $x_{pn}$  - количество добавочных бит полезной нагрузки.

И при варьировании избыточности:

$$T_{dec} = ((n + x_{in}) - k) * (3 * (n + x_{in}) - k + 1)) * t1,$$

где  $x_{in}$  - количество добавочных бит избыточности.

Для блока длиной 12 байт и частоты процессора 100 МГц время декодирования кода Рида–Соломона составляет  $\sim 0.2$  мс, что укладывается в интервал приёма. Показано, что уменьшение избыточности на 1 байт сокращает время декодирования на 27.7%, но снижает помехоустойчивость. Увеличение избыточности на 1 байт увеличивает время на 38.3%, но повышает надёжность. Обоснована необходимость поиска оптимума между защищённостью и нагрузкой на процессор.

Исследован разработанный метод адаптации системы связи при изменении длительности передаваемых символов на базе технологии LoRa. Метод заключается в том, что в режиме приема, принимаются  $N$  информационных блоков. При этом, фиксируется количество принятых блоков ( $K$ ), количество не принятых блоков ( $E$ ), количество принятых блоков с ошибками ( $C$ ) и количество блоков, где ошибки удалось исправить ( $T$ ).

На основе полученных значений ( $N, K, E, C, T$ ) определяется текущее качество канала управления и принимается решение об изменении скорости передачи информации. Всего таких решений может быть три: оставить скорость передачи информации без изменений; увеличить скорость передачи (снизить возможности приема); снизить скорость передачи (повысить возможности приема). Далее устанавливается определенная скорость передачи информации по каналу управления.

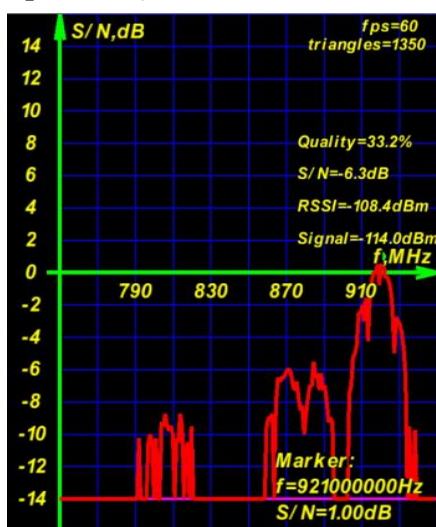
Необходимо отметить, что увеличение скорости передачи информации (при хорошем качестве связи) может привести к полному отсутствию связи по каналу управления, поскольку возможности приемника могут снизиться сразу на несколько дБ по соотношению С/Ш. В этом случае адаптивная система, уменьшит скорость передачи информации и восстановит связь, однако это произойдет через  $N$  блоков и может составить значительное время. Кроме того, потеря информации по обратному каналу связи может привести к тому, что приемопередатчик управляемого модуля изменил параметры канала связи, а приемопередатчик устройства управления оставил их прежними.

Для предотвращения таких ситуаций, целесообразно после изменения скорости передачи информации по каналу управления, изменять и значение  $N$  блоков в меньшую сторону, с постепенным его увеличением, до своего максимального значения. Также можно предположить, что отсутствие первых  $n$  блоков из  $N$  сразу после изменения скорости передачи информации по каналу управления, говорит о том, что значение скорости не было принято устройством управления. В этом случае можно вернуться

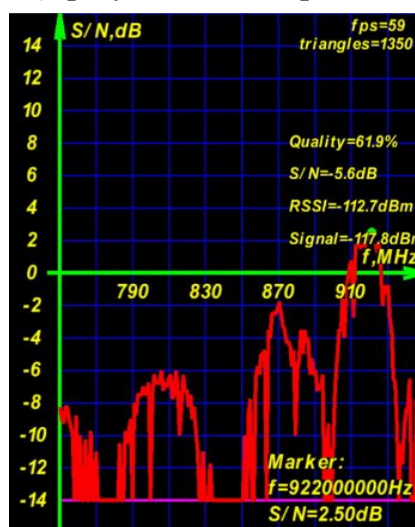
к предыдущей скорости передачи информации и соответствующим ей параметрам канала связи.

Предложена методика оценки качества принимаемого сигнала и алгоритм адаптивной регулировки скорости передачи через изменение полосы пропускания  $BW$ , коэффициента расширения  $SF$  и временных задержек  $t_z$ . Введён интегральный критерий достоверности принятой информации (КДПИ) с дифференцированными коэффициентами потерь для различных типов ошибок. Экспериментальные исследования проведены на разработанном и изготовленном аппаратно-программном комплексе.

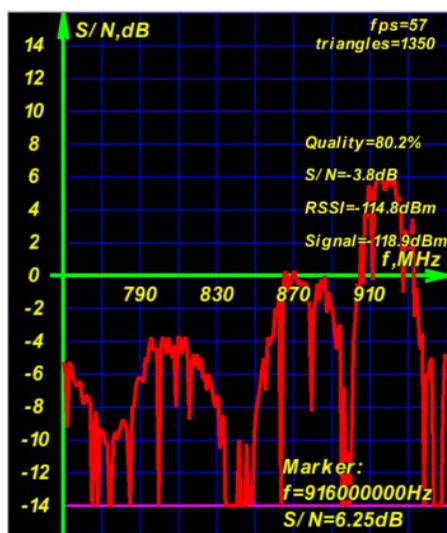
Получены зависимости качества связи и соотношения сигнал/шум от скорости передачи (14, 25, 50 и 80 блоков/с) (Рис. 11 а–г), результаты которых обобщены в Табл. 4.



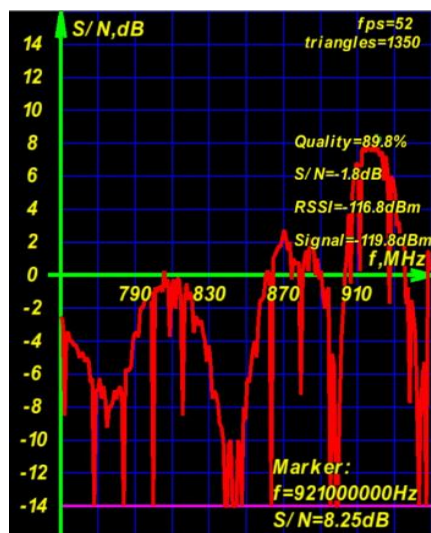
а)



б)



в)



г)

Рис. 11 а-г. Результаты эксперимента при адаптивном изменении скорости передачи информации.

Таблица 4. Результаты экспериментальных исследований.

| Рисунок 40 | Количество переданных блоков в секунду | Среднее соотношение S/N, дБ | Среднее качество связи, % | Среднее количество принятых блоков в секунду, $V_b$ |
|------------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------|
| а          | 14                                     | -1,8                        | 89,8                      | 12,42                                               |
| б          | 25                                     | -3,8                        | 80,2                      | 19,42                                               |
| в          | 50                                     | -5,6                        | 61,9                      | 29,98                                               |
| г          | 80                                     | -6,3                        | 33,2                      | 25,73                                               |

Установлено, что снижение скорости с 80 до 50 блоков/с повышает качество связи с 33% до 62% и увеличивает абсолютное число верно принятых блоков в секунду. Построена зависимость выигрыша при адаптивной подстройке скорости, показанная на Рис. 12.

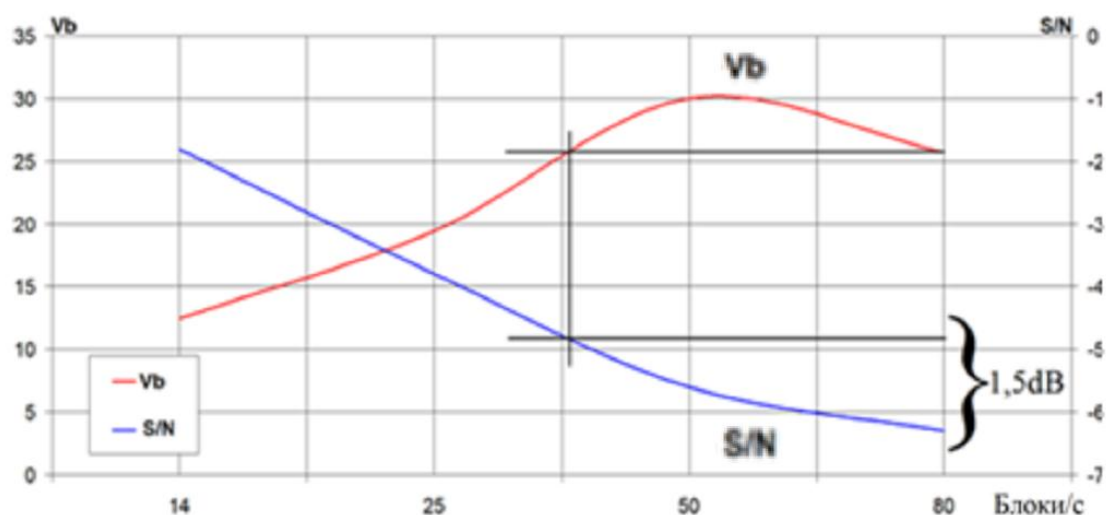


Рис. 12. Выигрыш при адаптивной подстройке скорости передачи информации.

Построенная зависимость показывает, что оптимум достигается при 38 блоках/с, что обеспечивает прирост отношения сигнал/шум на 1,5 дБ и повышение качества связи до 65% при сохранении пропускной способности.

В **заключении** диссертации изложены основные научные и практические результаты работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

В ходе выполнения диссертационной работы решены все поставленные задачи и получены следующие основные результаты.

1. На основе анализа свойств локальных сетей телеметрии и управления впервые выявлено и логически объяснено противоречие при применении статических методов помехоустойчивого кодирования для информационных блоков разной длительности.

Доказана необходимость перехода к адаптивным методам кодирования цифровых сообщений для обеспечения надежности доставки информации в сложной и постоянно изменяющейся помеховой обстановке.

2. Впервые разработаны алгоритмы адаптивной перестройки параметров канала связи на основе организации дуплексного/полудуплексного режимов и использования обратного канала. Установлена зависимость дальности связи от чувствительности приемника, на основе которой предложен метод оценки качества канала связи и разработан алгоритм адаптивной регулировки скорости передачи информации.

3. Разработана архитектура информационного блока и процесс синхронизации приемо-передачи команд управления и телеметрических данных между приемопередатчиками Оператора и БПЛА. Экспериментально подтверждено уменьшение временных задержек при изменении условий в канале и длины передаваемых блоков.

4. Предложен и экспериментально испытан метод оценки качества и определения достоверности принимаемой информации в адаптивных системах связи. Разработана методика контроля достоверности принимаемой информации, позволяющая в реальном времени изменять параметры кодирования в зависимости от уровня помех, что устраняет выявленное противоречие при работе с разными по длительности блоками.

5. Выполнен синтез системы радиосвязи, произведен анализ элементной базы и характеристик антенн диапазона 750–950 МГц. Разработаны, изготовлены и реализованы приемопередающие модули со стороны Оператора и БПЛА, работающие в режиме полудуплекса.

6. Проведена серия натурных экспериментов на различных дистанциях линии связи и уровнях мощности передатчика с использованием разработанного программного аппаратного комплекса. Анализ результатов показал увеличение отношения сигнал/шум (С/Ш) от 0,7 до 4,5 дБ и повышение качества канала связи в 2–2,5 раза при адаптивном кодировании сигналов управления и телеметрии. Выделен оптимальный режим адаптивной настройки, обеспечивающий гарантированный выигрыш в отношении С/Ш на 1,5 дБ при двукратном увеличении качества канала связи.

7. Реализация предложенных методов адаптивного помехоустойчивого кодирования и разработанного аппаратно-программного комплекса позволит существенно повысить надежность и достоверность передачи данных в локальных сетях дистанционного управления беспилотных радиоуправляемых аппаратов. Разработанные алгоритмы, методики синхронизации могут быть использованы при проектировании современных специализированных беспроводных сетей связи, функционирующих в динамически изменяющихся условиях радиоэфира.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Учебные пособия

1. Самойлов, А. Г. Радиопередающие устройства: учеб. пособие / А. Г. Самойлов, **В. С. Самойлов**, С. А. Самойлов; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2022. – 156 с. – ISBN 978-5-9984-1549-4.

### Публикации в изданиях из перечня ВАК

2. Самойлов, А.Г. Особенности распространения радиоволн на радиоперелиниях «космический аппарат — земная станция» / А.Г. Самойлов, **В.С. Самойлов**, С.А.Х. Насир // Проектирование и технология электронных средств. — 2021. — № 4. — С. 21–27.
3. Самойлов, А.Г. Адаптивное согласование радиопередающих устройств с динамической нагрузкой / А.Г. Самойлов, С.А. Самойлов, **В.С. Самойлов** // Проектирование и технология электронных средств. — 2023. — № 3. — С. 17–21.
4. **Самойлов, В.С.** Адаптивный канал связи для беспилотных радиоуправляемых аппаратов / В.С. Самойлов // Проектирование и технология электронных средств. — 2025. — № 1. — С. 30–34.
5. **Самойлов, В.С.** Методика определения достоверности передачи информации в адаптивных системах связи и телеметрии / В.С. Самойлов, А.А. Сидоренко // Проектирование и технология электронных средств. — 2025. — № 4. — С. 8–12.
6. **Самойлов В.С.** Метод адаптивной перестройки параметров канала управления БПЛА / В.С. Самойлов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2026. – №1. – С. 30-37.

### Публикации в Web of Science и SCOPUS

7. Samoylov A.G., **Samoylov V.S.**, Samoylov S.A. The use of adaptive matching circuits to adjust the impedance of high-frequency loads / A.G. Samoylov, V.S. Samoylov, S.A. Samoylov // Journal of Physics: Conference Series. – Vol. 1399. 2019. – С. 44096. – International Scientific Conference "Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering - APITECH-2019", Krasnoyarsk.
8. Samoylov, A.G. Signal fading in satellite-to-earth channels / A.G. Samoylov, **V.S. Samoylov**, T.A. Dovgal // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering — ELCONRUS 2021. — Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. — P. 2548–2551.
9. Samoylov, A.G. Loss of radio waves energy on radio lines «satellite — earth station» / A.G. Samoylov, **V.S. Samoylov**, S.A.X. Nasir // Journal of Physics: Conference Series. — Vol. 2094. — Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2021. — P. 42080.

### Свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ

10. Якубовский, Р.М. Программа управления амплитудой и фазой радиопередающего устройства [Электронный ресурс]: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № RU 2025683857 / Р.М. Якубовский, Д.И. Гасанов, С.А. Самойлов, **В.С. Самойлов**; правообладатель ООО «Студия 17». — Дата регистр.: 25.07.2025; опубл.: 09.09.2025. — Яз. прогр.: C++.
11. Якубовский, Р.М. Программа мультиуправления углом поворота диаграммы направленности [Электронный ресурс]: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № RU 2025684737 / Р.М. Якубовский, Д.И. Гасанов, С.А. Самойлов, **В.С. Самойлов**; правообладатель ООО «Студия 17». — Дата регистр.: 29.07.2025; опубл.: 16.09.2025. — Яз. прогр.: C++/CLI.

### Публикации в других изданиях

12. Матвеев, И.С. Аппаратно-программный комплекс разработчика цифровых устройств / И.С. Матвеев, **В.С. Самойлов**, С.А. Самойлов, Я.Д. Таланов // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2018. – Рязань: Book Jet, 2018. – Т. 1. – С. 48-52.
13. **Самойлов, В.С.** Программируемый генератор низких частот / В.С. Самойлов, С.А. Самойлов // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2019: сборник трудов II Международного научно-технического форума. – В 10 т. – Т. 1. – Рязань: Book Jet, 2019. – С. 39-42.
14. Самойлов, А.Г. Математическая модель радиоканала высотомера беспилотных летательных аппаратов / А.Г. Самойлов, **В.С. Самойлов**, С.А. Самойлов // Информационные системы и технологии. – Сборник материалов XXV Международной научно-технической конференции. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2019. – С. 23–28.
15. Самойлов, А.Г., Блочная синхронизация цифровых информационных потоков с помехоустойчивым кодированием / А.Г. Самойлов, **В.С. Самойлов**, И.А. Аль Тахар, С.А. Насир // Современные технологии в науке и образовании — СТНО-2020: сборник трудов III Международного научно-технического форума. —Рязань: Book Jet, 2020. — Т. 3. — С. 5–8.
16. **Самойлов, В.С.** Модель радиоимпульсного высотомера / В.С. Самойлов // Физика, техника и технология сложных систем. — Ярославль: Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, 2020. — С. 180–181.
17. **Самойлов, В.С.** Оценка плотности потока энергии от мобильных телефонов / В.С. Самойлов, С.А.Х. Насир, И.А. Аль-Тахар // Физика и радиоэлектроника в медицине и

экологии — ФРЭМЭ'2020. — Владимир: Владимирский гос. университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 2020. — Т. 2. — С. 309–311.

18. Самойлов, С.А. Комплекс разработчика помехоустойчивых кодов / С.А. Самойлов, **В.С. Самойлов**, Е.А. Цветкова // Перспективные технологии в средствах передачи информации: материалы 14-й Международной научно-технической конференции — ПТСПИ'2021. — Владимир: Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 2021. — С. 222–225.

19. **Самойлов, В.С.** Особенности распространения радиоволн на радиоперелиниях «космический аппарат — земная станция» / В.С. Самойлов // Современные технологии в науке и образовании — СТНО-2022: сб. трудов V Международного научно-технического форума. — Рязань: Book Jet, 2022. — Т. 1. — С. 37–42.

20. Самойлов, А.Г. Адаптивное согласование радиопередающих устройств с динамической нагрузкой / А.Г. Самойлов, С.А. Самойлов, **В.С. Самойлов** // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий: сб. докл. Всероссийской конференции, посвящённой «Дню радио». — Москва: РНТО РЭС им. А.С. Попова, 2023. — С. 305–309.

21. Самойлов, А.Г. Измерения замираний сигналов в многолучевых радиоканалах и имитация интерференционных замираний / А.Г. Самойлов, **В.С. Самойлов** // Труды XXVII научной конференции по радиофизике. — Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2023. — С. 223–226.

22. **Самойлов, В.С.** Метод адаптивного управления характеристиками канала связи с беспилотными летательными аппаратами / В.С. Самойлов // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем («Радиоинфоком-2024»): VIII Международная научно-практическая конференция. — Москва: МИРЭА — Российский технологический университет, 2024. — С. 485–488.

23. **Самойлов, В.С.** Значение адаптации в области медицинской радиосвязи / В.С. Самойлов // Современные технологии в науке и образовании — СТНО-2025: сборник трудов VIII Международного научно-технического форума. — Рязань: Book Jet, 2025. — С. 176–179.