

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «ВЛАДИМИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АЛЕКСАНДРА ГРИГОРЬЕВИЧА И
НИКОЛАЯ ГРИГОРЬЕВИЧА СТОЛЕТОВЫХ» - (ВлГУ)**

На правах рукописи



Самойлов Владислав Сергеевич

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

2.2.15 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических
наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Александр Георгиевич Самойлов

Владимир – 2026 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ И СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ ДОСТАВКИ СООБЩЕНИЙ В ЛОКАЛЬНЫХ СЕТЯХ ТЕЛЕМЕТРИИ И УПРАВЛЕНИЯ.....	12
1.1. Особенности сетей телеметрии и управления. Основные требования.....	12
1.2. Доставка сообщений в локальных сетях телеметрии и управления..	21
1.3. Анализ методов помехоустойчивого кодирования цифровой информации в сетях передачи сообщений.....	27
1.4. Цель и задачи исследования	353
Выводы по главе I	37
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АДАПТИВНОГО ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ СООБЩЕНИЙ В СИСТЕМАХ РАДИОУПРАВЛЕНИЯ И ТЕЛЕМЕТРИИ	39
2.1. Достоинства и недостатки адаптивных методов кодирования информации.....	39
2.2. Разработка алгоритмов адаптивной перестройки сигналов систем радиоуправления и телеметрии	45
2.3 Методика определения достоверности передачи информации в адаптивных системах связи и телеметрии.	57
2.4 Синхронизация в канале радиоуправления и телеметрии	61
Выводы по главе II	71
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ АДАПТИВНОГО КОДИРОВАНИЯ И ДЕКОДИРОВАНИЯ	73

3.1 Синтез адаптивной системы радиоуправления и телеметрии на примере беспилотных летательных аппаратов.....	73
3.2 Анализ элементной базы приемо-передающего оборудования экспериментальной линии связи	81
3.3. Разработка оборудования экспериментальной линии радиосвязи ...	93
3.4. Методика проведения экспериментальных исследований.	99
3.5. Вычислительные затраты при адаптивном кодировании цифровых сообщений в локальных сетях телеметрии и управления.....	108
3.6 Исследование разработанного метода адаптации системы связи при изменении длительности передаваемых символов	113
Выводы по главе III.....	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	126
Список использованных сокращений	128
Список литературы	130
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	142
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	144

ВВЕДЕНИЕ

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 очень 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 и ее актуальность.

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 сформулированной цели исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Определить имеющиеся противоречия в локальных сетях телеметрии и управления и предложить пути их устранения.
2. Разработать метод оценки качества и методику определения достоверности принимаемой информации в адаптивных системах связи.
3. Предложить методику контроля достоверности принимаемой информации в реальном времени.
4. Разработать и исследовать алгоритмы адаптивной перестройки параметров систем дистанционного управления и телеметрии.
5. Создать приемо-передающие модули с адаптивным помехоустойчивым кодированием и выполнить модельные и натурные экспериментальные исследования синтезированных устройств.

6. Разработать рекомендации по практическому применению адаптивных систем дистанционного управления и телеметрии.

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 с помехоустойчивым кодированием по сетям дистанционного управления и телеметрии 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 приемо-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**, по достоверности передачи информации в локальных сетях управления и телеметрии до **80%**, либо сокращают время доставки сообщений.

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

4. 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:

1. При разработке и производстве систем дистанционного управления в компании ООО «Ресурсный капитал», г. Владимир;
2. При разработке программных продуктов компанией 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 алгоритм адаптации позволяет, 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%**.
4. Аппаратно-программный комплекс адаптивного управления ресурсом цифровых радиоканалов дистанционного управления и телеметрии, обеспечивающий выигрыш в достоверности передачи сообщений либо экономию электроэнергии и вычислительных ресурсов.

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.

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 141 страницы, 42 рисунков, 15 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.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ И СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ ДОСТАВКИ СООБЩЕНИЙ В ЛОКАЛЬНЫХ СЕТЯХ ТЕЛЕМЕТРИИ И УПРАВЛЕНИЯ.

1.1. Особенности сетей телеметрии и управления. Основные требования.

Современные сети телеметрии являются критически важными для широкого спектра отраслей, включая аэрокосмическую промышленность, медицину, энергетику и транспорт. Их ключевые требования — надежность, устойчивость к внешним воздействиям, минимальная задержка передачи данных, высокая пропускная способность и энергоэффективность.

Сети телеметрии в настоящее время используются во многих технологиях, от аэрокосмической промышленности до устройств безопасности и охраны, затрагивая такие области как, медицину, энергетику, транспортную логистику, промышленность, сельское хозяйство, безопасность окружающей среды, информационные технологии. Телеметрия с использованием передачи информации по радиоканалу называется — Радиотелеметрия. Радиотелеметрия получила широкое распространение благодаря возможности работы с подвижными или труднодоступными объектами. В качестве среды передачи данных могут использоваться как специальные телеметрические каналы связи, так и каналы и сети связи общего применения (GSM/GPRS, ZigBee, WiFi, WiMax, LTE, LPWAN, проводные ISDN, xDSL и др.) [1].

Телеметрия часто связана с управлением объектами на расстоянии и является одним из элементов телемеханики. Основным уклоном телемеханики в управлении и контроле на расстоянии с передачей по каналу связи кодированных электрических или радиосигналов, несущих управляющую информацию или данные о состоянии контролируемого объекта. Объектами телемеханического управления и контроля могут служить технологические процессы, машины, устройства, биологические системы [2].

Телемеханика является отраслью техники, разрабатывающей, создающей и использующей средства кодирования, передачи и приёма информации по каналам проводной и радиосвязи. В системах телемеханики информация обычно передается в кодированном виде по выделенному каналу связи. Средства телемеханики используются для измерений и телеуправления объектами энергосистем, газо и нефтепроводов, атомных электростанций, некоторых химических предприятий, автоматических метеостанций и др. К средствам телемеханизации относятся устройства управления положением или состоянием дискретных объектов и объектов с непрерывным множеством состояний. Методы телемеханики называют телеуправлением, телесигнализацией, телеизмерением. Такие устройства применялись в Советском Союзе, например, в модели телетанка ТТ-26 в 1941 г., показанном на Рис. 1, а также в модели Советского дистанционно-



Рис. 1. Телеуправляемый танк ТТ-26.[1]

управляемого самоходного аппарата «Луноход-1» в 1970-1971 гг.,
показанного на Рис. 2.

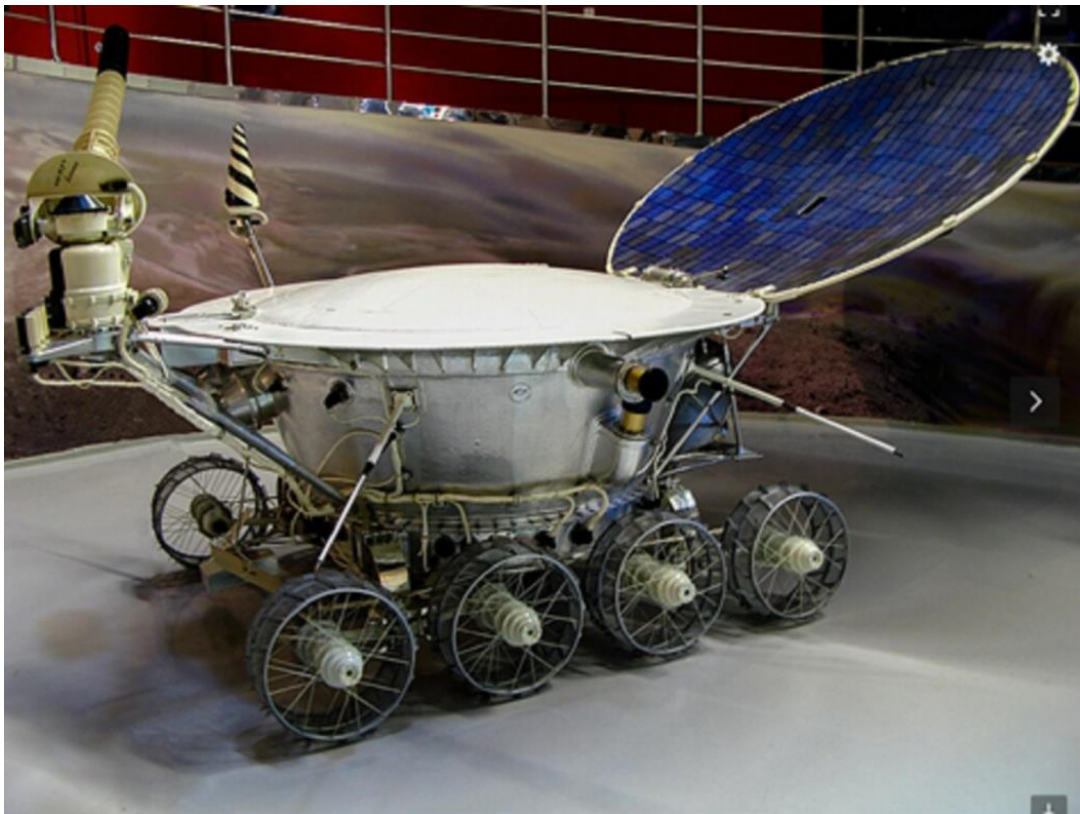


Рис. 2. «Луноход-1» (Аппарат 8ЕЛ № 203).[2]

Радиотелеметрия обеспечивает работу с подвижными и труднодоступными объектами, однако требует решения проблем защиты данных, масштабируемости и совместимости с различными протоколами связи. Использование телеметрии в космической сфере, медицине и энергетике демонстрирует её роль в обеспечении безопасности, удалённого мониторинга и оптимизации процессов. Основные вызовы при передаче данных включают помехи, замирания сигналов, эффект Доплера и межсимвольную интерференцию. Их влияние усиливается в условиях многолучевого распространения и высоких скоростей объектов (например, беспилотные летательные аппараты (БПЛА) самолетного типа).

Обширный охват применения телеметрии в различных отраслях: аэрокосмическая промышленность, медицина, энергетика, транспорт и т.д. Важно подчеркнуть роль радиотелеметрии в работе с подвижными и труднодоступными объектами. Акцентируется внимание на необходимость надежности, устойчивости к внешним условиям и минимальной задержки передачи данных.

Сети телеметрии и их управление являются важнейшими элементами в системах отслеживания и контроля процессов. Системы, которые отслеживают состояние процессов передачи информации, должны копировать, передавать, а самое главное анализировать данные от источников, которые находятся в труднодоступных для человека местах. Особенность таких систем в том, что они работают в режиме реального времени, что позволяет получать точную информацию, а также быстро корректировать их работу. Основные требования к сетям телеметрии надежность и устойчивость к внешним условиям для корректной работы в условиях агрессивным для человека. В последнее время также важна минимально возможная задержка при

передаче данных и большая пропускная способность, чтобы операторы могли получать большие объемы информации без потери качества.

Обязательно информацию нужно защищать, чтобы она оставалась конфиденциальной, в полной безопасности от кибератак, взломов и перехвата противником [3]. Также необходимо разрабатывать сети, в которые можно внедрять новые устройства, а саму сеть расширять, масштабировать с минимальными задержками по времени. Совместимость с протоколами и стандартами связи, вот что в последнее время необходимо для сетей телеметрии, для того чтобы можно было совмещать работу отдельных устройств разных производителей, своего рода расширение масштаба работы внутри сети.

Конечно, чем крупнее сеть, тем больше она потребляет энергию, здесь необходим баланс, если фактор экономии энергии играет важную роль, в устройствах телефонной связи, космических аппаратов и БПЛА этот аспект наиболее важен для увеличения срока службы, длительности и дальности работы. Затрагивая работу устройств, передающих информацию, нужно, чтобы сеть могла восстановить поврежденные или пропущенные данные, для ее «честной» работы, в моменты, когда ее отдельные компоненты выведены из строя. Такое можно сделать, если добавлять избыточность в канале связи, маршрутизировать линию связи по соседним каналам, а также применяя способы разнесенного приема.

Функциональная совместимость и стандарты данных, популярных и общепринятых протоколов, позволяет производить обмен данными между разными устройствами, как по производителю, так и по географическому расположению. Широкое применение телеметрии позволяет использовать метеодатчиков Арктике, определять направления метеоштормов, отслеживать состояние сейсмодатчиков, следить за приближением крупных объектов из космоса, все это

позволяют заранее оповестить и предпринять меры по защите населения [3].

В космической сфере системы телеметрии играют важную роль за отслеживанием состояния спутников, как на орбите, так и на других планетах и их спутниках, за частотой вспышек на Солнце и их мощностью, за перемещением летательных аппаратов, съемкой поверхности земли и земным зондированием. Сбор информации о точке нахождения, скорости перемещения, состоянием энергоносителей и источников питания, температуре узлов корпусной оболочки, позволяют продлить работу аппаратов, а также управлять физическими параметрами на удалении. Обеспечение безопасности и повышение надежности в авиационно-космической промышленности позволяет использовать воздушные и космические средства в большом масштабе, эффективно функционируя по длительности времени и крупных группах [4].

Орбитальные спутниковые объекты, оснащенные телеметрическим оборудованием, контролирующее основные параметры этих объектов, дает возможность отслеживать состояние источников питания и качество связи в каналах спутник-спутник и спутник-земля. Операторы таких объектов вовремя меняют программу полета относительно других объектов на орбите или если аппарат уже выходит из строя безопасно направляют его в открытый океан.

Системы отслеживания позиции и трекинговые технологии позволяют определить актуальное положение в режиме реального времени, также его скорость и траекторию в пространстве в координатах 3-х осей, вплоть до объемной модели. Такие модели позволяют управлять курсом объектов на орбите относительно других, до нескольких сотен

таких же объектов. Телеметрия спутников позволяет создавать и каналы связи с различной модуляцией.

В последнее время популярной становится цифровая манипуляция. Многоканальные системы создаются с использованием частотного, временного и кодового разделения каналов [3]. В случае пилотируемых миссий или возвращения транспортных средств на Землю телеметрия помогает отслеживать весь процесс возврата, предоставляя данные о состоянии модуля и условиях в атмосфере при входе в систему. На Земле есть центры управления, которые принимают телеметрические данные с космических кораблей и самолетов. Специалисты анализируют эти данные, чтобы принять решение и обеспечить эффективную работу систем.

Использование технологии GPS в автомобильной промышленности позволяет отслеживать местоположение транспортных средств в режиме реального времени. Системы телеметрии анализируют информацию о дорожных условиях, пробках и погодных условиях, что помогает оптимизировать маршруты и выбирать наиболее эффективные способы доставки грузов. Такие системы предоставляют данные о перемещениях транспортных средств, что особенно ценно в случае угона. В случае кражи транспортного средства диспетчерская служба может незамедлительно определить его местонахождение и предоставить эту информацию правоохранительным органам. Автомобили могут быть оборудованы сигнализацией от вторжения или кражи [4].

В медицинской сфере телеметрия используется для удаленного наблюдения за пациентами, включая измерение жизненно важных показателей, таких как пульс, артериальное давление и уровень насыщения крови кислородом. Системы телеметрии позволяют в

режиме реального времени следить за состоянием пациентов, что особенно важно для людей с хроническими заболеваниями или тех, кто проходит реабилитацию после операций. В медицине широко используются устройства мониторинга состояния, информация от которых может автоматически передаваться врачу для анализа и принятия решения о возможной корректировке лечения. В критических ситуациях (например, внезапных изменениях частоты сердечных сокращений или уровня кислорода в крови) системы могут автоматически оповестить медицинский персонал.

В сфере энергетики роль телеметрии очень важна: она обеспечивает контроль производства и распределения электроэнергии, а также мониторинг состояния энергетического оборудования. Системы телеметрии собирают подробные данные о работе электросетей с учетом таких параметров, как напряжение, ток и частота. Особое внимание уделяется параметрам, влияющим на качество электроэнергии, включая гармонические искажения, мерцание и отклонения от заданных номинальных значений [4].

Эта информация помогает оптимизировать работу электростанций и эффективно управлять нагрузкой в сети. С ростом использования возобновляемых источников энергии, таких как солнечные панели и ветряные турбины, телеметрия становится ключевым инструментом для мониторинга их производительности и поведения. Это позволяет им максимально эффективно интегрироваться в основную энергосистему.

Эффективными методами борьбы с искажениями являются технологии OFDM, MIMO, разнесенный прием, адаптивные системы с обратной связью и помехоустойчивое кодирование. Расчеты ослабления сигнала и времени восстановления синхронизации подтверждают

необходимость учета вероятностных характеристик каналов связи для обеспечения качества доставки сообщений.

Основные требования в сетях телеметрии и их управления состоят в том, чтобы сохранялась стабильность и качество канала связи. Важно добиться минимально возможной задержки при передаче данных и большой пропускной способности, чтобы принимать большие объемы информации без потери качества. Информационную составляющую необходимо защищать, как помехоустойчивым кодированием, так и средствами конфиденциальной защиты. Также нельзя забывать про баланс потребления энергии, чтобы добиться стабильной работы, хорошего качества связи и долгого срока службы.

Необходимо отметить, что в настоящее время, в связи с бурным развитием беспилотных систем и созданием в армиях разных стран отдельного рода войск по беспилотным системам, работы по направлению развития методов и средств телеметрии и управления становятся особенно важны и актуальны. Но и в народном хозяйстве роль таких систем высока. Следует отметить, например, успешное применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в сельском хозяйстве при мониторинге сельхозугодий и транспортировке грузов [5].

Системы дистанционного управления БПЛА должны отличаться от обычных систем радиосвязи более высокой помехоустойчивостью, так как используются, как правило, в условиях зашумленных каналов со сложной помеховой обстановкой, а БПЛА военного назначения и в условиях присутствия активных помех, поставляемых средствами радиоэлектронной борьбы противника. Поэтому направление исследования, посвященное развитию методов адаптивного кодирования и декодирования цифровых сообщений в локальных сетях телеметрии и управления, следует признать своевременным и актуальным.

1.2. Доставка сообщений в локальных сетях телеметрии и управления.

Распространение сигналов по беспроводным радиоканалам сложный процесс, на который влияет множество негативных факторов, например, помехи, затухания сигналов, многолучевые замирания, атмосферные условия. Эти негативные процессы сказываются на эффективности доставки и степени ошибки при передаче информации. Помехи остаются преобладающей проблемой, возникающей как из естественных, так и из искусственных источников, которые могут нарушить связь и привести к потере данных или снижению скорости передачи информации. Электромагнитная совместимость радиосредств также влияет на доставку сообщений.

Многолучевое распространение и как следствие замирания передаточной функции, межсимвольная интерференция и задержка передачи сообщений, происходят, когда сигналы отражаются от поверхностей, что приводит к замираниям сигнала на приемнике из-за интерференции. Достижения в области техники, которые должны повышать защиту доставки информации, не всегда помогают, что приводит к испорченному качеству и надежности сигналов, а это серьезная проблема, особенно для густонаселенных городских условий с большим количеством отражателей радиосигналов.

Рассмотрим быстрые и медленные замирания. Различие между медленным и быстрым замиранием важно для математического

моделирования каналов с замиранием и для оценки производительности систем связи, работающих по этим каналам.

Это понятие связано со временем когерентности T_k канала, которое измеряет период времени, в течение которого происходит корреляция процесса затухания. Время когерентности также связано с доплеровским разбросом f_d по каналу через:

$$T_k = \frac{1}{f_d}, \quad (1.1)$$

Затухание считается медленным, если длительность символа T_s меньше времени когерентности канала T_k .

$$T_k > T_s, \quad (1.2)$$

В противном случае оно считается быстрым. При медленном затухании определенный уровень затухания влияет на множество последовательных символов, что приводит к ошибкам в последовательности, в то время как при быстром затухании, изменяется от символа к символу [6].

Для борьбы с замираниями и межсимвольной интерференцией активно используют следующие известные методы [7]:

- Равномерное распределение мощности в спектре, чтобы избежать резких скачков, вызывающих замирания.
- Применение технологии OFDM, которая позволяет разбивать сигнал на множество подканалов, уменьшая влияние интерференции.
- Внедрение систем с обратной связью, которые могут приспосабливаться к изменяющимся условиям канала передачи.
- Использование более широких полос частот, что обеспечивает большую устойчивость к замираниям и межсимвольной интерференции.
- Методы MIMO и разнесенного приема.

- Применение помехоустойчивых кодов, для уменьшения потерь информации из-за искажений, вызванных замиранием и межсимвольной интерференцией.

Атмосферные условия, например, пылевые бури или наличие гидрометеоров, могут достаточно сильно ухудшить сигнал, вызывать сбои передачи сообщений из-за внешних воздействий, приводящие к срывам синхронизации, потерям информационных пакетов и задержке передачи сообщений.

Сбоив передаче сообщений чаще всего происходят из-за внешних помех, что может вызывать потерю информационных пакетов и задержки в передаче информации. Одной из критических задач в таких условиях является установление и восстановление синхронизации.

Время, необходимое для восстановления синхронизации, может быть определено с помощью следующей формулы [8]:

$$T_{\text{синх}} = T_{\text{ср}} + \frac{T_c}{P}, \quad (1.3)$$

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

$T_{\text{ср}}$ может варьироваться в зависимости от метода передачи и времени, необходимого для анализа состояния канала. T_c играет ключевую роль, определяя какое время потребуется для передачи всех необходимых синхросигналов. Чем больше количество синхросигналов, тем больше времени потребуется на их передачу. Увеличение P может улучшить надежность, но также увеличивает время передачи сообщений.

Ослабление сигнала при его распространении в свободном пространстве зависит от расстояния между передающей и приемной антенной, а также от частоты сигнала.

$$L_{\text{св}} = 20 \lg \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right), \text{ дБ.} \quad (1.4)$$

Здесь r – расстояние между передатчиком и приемником, λ – длина волны.

Ослабление сигнала в атмосфере L_a учитывает также молекулярное поглощение газами атмосферы $L_{\text{ма}}$, потери из-за гидрометеоров L_g (дождь, туман, мокрый снег, изморозь), потери из-за пылевых бурь и смога L_c , потери из-за замираний сигнала L_z , то есть

$$L_a = L_{\text{св}} + L_{\text{ма}} + L_g + L_c + L_z, \text{ дБ.} \quad (1.5)$$

Так как источники сигналов или их приемники могут перемещаться достаточно быстро, то появляются негативные последствия эффекта Доплера, касающиеся изменения частоты и длины волны в зависимости от движения источника и наблюдателя. Эффект Доплера сказывается на качестве связи по-разному и зависит от скорости относительного перемещения источника и наблюдателя, например, приведем несколько типов БПЛА с их обычными скоростями:

-фотографические БПЛА - скорость около 10-20 м/с. Обычно используются для аэрофотосъемки и видеосъемки.

-игровые БПЛА - могут развивать скорость до 30 м/с, предназначены для развлекательных полетов.

-промышленные БПЛА - обычно обладают скоростью 20-50 м/с, используются в сельском хозяйстве, инспекции объектов и т.д.

Военные БПЛА - которые предназначены для разнообразных задач, включая наблюдение и атаки, могут развивать скорость более 70 м/с, а для самолетного типа и выше.

Доплеровское изменение частоты в атмосферных условиях определяется выражением

$$f = f_0 \left(\frac{1 + \frac{V}{c}}{1 - \frac{U}{c}} \right) = f_0 \left(\frac{C + V}{C - U} \right), \quad (1.6)$$

где f_0 – частота сигнала; V и U – скорости перемещения источника сигнала и приемника относительно друг друга, положительные при приближении и отрицательные при удалении друг от друга; C – скорость света.

Эффект Доплера не представляет опасности для низких скоростей (менее 50 м/с), изменяя частоту сигналов в седьмом знаке в соответствии с выражением (1.6), что позволяет избежать ошибок при передаче сообщений для управляющей системы БПЛА не самолетного типа. Но при работе с БПЛА самолетного типа эффект Доплера придется учитывать, так как отклонение частоты может превышать отклонение частоты из-за нестабильности частоты передатчика.

Изменение частоты сигналов, вследствие влияния эффекта Доплера, может быть, как полезным, так и создающим проблемы. Например, в радиолокации и системах противоракетной обороны (ПРО) и противовоздушной обороны (ПВО) для управления летно-подъемными системами эффект Доплера учитывают для более точного определения координат нахождения в пространстве, расстояния и скорости движения объекта.

Таким образом, на время и качество доставки сообщений в локальных сетях телеметрии и управления влияет много как детерминированных, так и случайных по своей природе причин. И если время доставки сообщений затруднительно определять только при сбоях при передаче информации, то оценка качества доставки сообщений требует сложных расчетов для каждой конкретной линии связи, учитывающих вероятностные изменения характеристик каналов распространения.

В разделе о доставке сообщений, обсуждаются проблемы помех, замираний сигналов, эффекта Доплера и методов их преодоления, таких как использование OFDM, MIMO, помехоустойчивых кодов. Здесь стоит отметить важность адаптации к изменяющимся условиям каналов связи.

Обобщая сказанное выше не трудно сделать вывод о том, что для того, чтобы обеспечить высокую надежность доставки сообщений и преодолеть затухание и срывы передачи информации, без специальных мер не обойтись. Среди таких мер можно назвать известные и часто применяемые в системах дистанционного управления объектами методы, такие как: кодирование, MIMO, разнесенный прием, методы ухода от помех, методы адаптивного управления и др. Практическое применение таких мер повышает надежность и достоверность передачи сообщений, но при этом частично ухудшаются какие-либо параметры передачи сообщений.

Методы адаптации систем управления к дестабилизирующим факторам, негативно влияющим на надежность доставки сообщений, играют особую роль, так как могут дать наиболее ощутимые положительные результаты. Однако возможность использования методов адаптации применительно к системам дистанционного управления в настоящее время исследована недостаточно, публикаций в технической литературе по системам и методам адаптации мало, что и определило направление настоящей работы.

1.3. Анализ методов помехоустойчивого кодирования цифровой информации в сетях передачи сообщений.

В сетях с цифровой передачей сообщений, могут произойти ошибки (плохие условия в канале, неисправность оборудования, внешние помехи). Для борьбы с этими ошибками необходимо добавлять избыточность в передаваемое сообщение. Использование помехоустойчивого кодирования позволяет спасти информационное сообщение от потерь и повысить надежность передачи. В настоящее время есть множество помехоустойчивых кодов, которые исправляют ошибки, используя систему сложных алгоритмов, также есть коды, которые только обнаруживают ошибки, но не исправляют их. Максимальное количество ошибок, которое возможно исправить зависит от используемого помехоустойчивого кода и применяемого им кодового расстояния (расстояния Хэмминга при передаче бинарной информации).

Расстояние Хэмминга между двумя словами одинаковой длины - это количество позиций, в которых соответствующие символы различаются. Формула для вычисления расстояния Хэмминга [9]:

$$d(x, y), \quad (1.7)$$

где x и y — два вектора (или двоичных слова) длины n .

$$d(x, y) = \sum_{i=1}^n I(x_i \neq y_i), \quad (1.8)$$

$$I(x_i \neq y_i) = \begin{cases} 1, & \text{если символы различаются} \\ 0, & \text{если символы совпадают} \end{cases}$$

где индекс i - показывает позицию в слове, n - означает количество символов,

I -индикаторная функция, которая возвращает значение 1 или 0 в зависимости от того равны ли между собой биты на позиции i .

Исправляющие ошибки коды, могут применяться и для обнаружения ошибок в принимаемой цифровой информации, причем в таком случае количество обнаруженных ошибок будет значительно больше, чем исправленных.

Коды, которые могут исправить ошибки, называют помехоустойчивыми кодами, и они широко используются в сотовых сетях, радио и спутниковой связи, интернете и для обеспечения надежности передаваемых сообщений. Системы цифровой связи всегда используют помехоустойчивое кодирование, так как выигрыш от его применения значительно влияет на достоверность передачи информации и многократно превышает расходы на программные и аппаратные затраты при его применении. Помехоустойчивые коды могут обнаружить и исправить ошибки, возникающие в результате помех или плохого качества сигнала, поэтому исправляющие ошибки коды применяются практически во всех цифровых системах передачи данных и в системах хранения данных, таких как жесткие диски, флеш-память, оптические носители, чтобы обеспечить целостность и надежность данных при их чтении и записи. Это особенно важно для систем, где возможно повреждение данных или ошибки во время записи.

Помехоустойчивые коды используются в сетях передачи данных, например, таких как Ethernet, Wi-Fi, GSM, LTE, чтобы обеспечить надежность и целостность передачи информации. Они помогают устранить ошибки, возникающие в процессе передачи информации между устройствами и сетями. Также исправляющие ошибки коды используются там, где требуется надежная передача и хранение данных, при создании эффективного и безопасного программного обеспечения

(ПО) с использованием подходящих методов кодирования для обеспечения надежности и «честности» данных. Помехоустойчивые коды делятся на:

1. Блочные (двухуровневые и трехуровневые), блочные линейные (такие коды как циклические, Хэмминга, CRC, БЧХ, Рида-Соломона), они разбивают информацию на фрагменты заданной длины;

2. Сверточные, которые корректируют информацию непрерывным потоком данных;

3. Турбокоды (LDPC), также называемые каскадными, решетчатыми, комбинированные, которые состоят из каскада систематических кодов, соединенных друг с другом параллельно.

Например, код Хэмминга является одним из самых простых линейных кодов и способен исправить только одну ошибку в фрагменте из k информационных бит. Процесс его декодирования является простым, так как синдром кода равняется номеру позиции ошибки. Код может обнаружить две ошибки при передаче данных автоматически, что присваивает им основу самоконтролирующихся/самокорректирующихся кодов. Коды Хемминга могут быть описаны с точки зрения линейных кодов с параметрами (n,k) , где n — длина кода (количество бит в кодовом слове, включая избыточные биты), k — количество информационных бит в кодовом слове, и вектор кода представлен как:

$$c = u * G, \quad (1.9)$$

где u — информационный вектор, а G — порождающая матрица.

Минимальное кодовое расстояние для кодов Хемминга определяется как 3, что позволяет исправлять только одну ошибку.

Код Рида-Соломона является одним из наиболее мощных кодов, исправляющих многократные пакеты ошибок. Применяется в каналах,

где пакеты ошибок могут образовываться столь часто, что их уже нельзя исправлять с помощью кодов, исправляющих одиночные ошибки.

Кодирование с помощью кода Рида-Соломона может быть реализовано двумя способами: систематическим и несистематическим. При несистематическом кодировании информационный сигнал умножается на некий полином в поле Галуа. Конечно, полученное закодированное значение отличается от исходного, следовательно, для его извлечения необходимо выполнить операцию декодирования. Недостатком такого кодирования является то, что требуются большие затраты ресурсов на извлечение данных.

При систематическом кодировании нет затрат ресурсов при извлечении исходного блока, если информационное слово не содержит ошибок, но кодер/декодер должен выполнить $k*(n-k)$ операций сложения и умножения для генерации проверочных символов.

Коды Рида-Соломона (РС) представляют собой блочные коды, которые особо эффективны при корректировке пакетных ошибок. Они работают на конечных полях Галуа $GF(q)$ и описываются параметрами (n,k) , где $n = q-1$ и величина $t = (n-k)/2$ определяет количество корректируемых символов. Порождающий полином

$$\begin{aligned} 100011101 &= x^8 + 0*x^7 + 0*x^6 + 0*x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + 0*x^1 + 1 = \\ &= 2^8 + 2^4 + 2^3 + 2^2 + 1 = 256 + 16 + 8 + 4 + 1 = 285. \end{aligned}$$

Основное уравнение кодирования:

$$C(x) = m(x) * G(x), \quad (1.10)$$

где $C(x)$ — кодовое слово, $m(x)$ — информационный полином, $G(x)$ — генерирующий полином, который выбирается как $(x-\alpha^1) \cdot (x-\alpha^2) \dots (x-\alpha^{2t})$.

Так как мы кодируем байты (число разрядов символа кода РС $m=8$), следует описать и то, из чего состоит блок данных, для $N=12$, $k=8$ байт:

- 1) 0-3 байты - значения четырех стиков пульта управления;
- 2) 4 байт - с нулевого по шестой разряды, значение трехпозиционных переключателей, седьмой разряд синхробит для телеметрии;
- 3) 5 байт - значения восьми кнопок;
- 4) 6,7 байты - цифровой идентификатор текущей частоты (при генерации таблицы частот ППРЧ, каждая частота получает свой идентификатор, необходимый при синхронизации приемника и передатчика);
- 5) 4 байта избыточности.

На рисунке 3 показана схема включения кодирующих устройств в системе связи.



Рис. 3. Схема применения кода Рида-Соломона.

Сверточные коды относятся к непрерывным рекуррентным кодам. Кодовое слово является сверткой отклика линейной системы (кодера) на входную информационную последовательность. Поэтому сверточные коды являются линейными, для которых сумма любых кодовых слов также является кодовой последовательностью.

Сверточные коды, в отличие от блоковых, не делят информацию на фрагменты и работают с ней как со сплошным потоком данных. Такие коды, как правило, порождаются дискретной линейной

инвариантной во времени системой. Поэтому, в отличие от большинства блочных кодов, сверточное кодирование достаточно простая операция, сверточные коды широко применяются, например, в спутниковой связи благодаря возможности высокой степени коррекции ошибок с умеренной сложностью.

В отличие от блочных кодов, где кодируются отдельные блоки, сверточный код работает с непрерывным потоком данных. Основная идея состоит в том, что добавлять нужно избыточность так, чтобы приемник мог восстановить данные даже при ошибках в канале.

Основные параметры сверточного кода - это его кодовая скорость (V) и ограничивающая длина (L) и биты избыточности (R):

$$V = \frac{k_i}{n_i}, \quad (1.11)$$

где k_i - число бит на входе за 1 такт, n_i - число бит на выходе за 1 такт.

Чем больше кодовая скорость, тем меньше избыточность и устойчивость к ошибкам.

Ограничивающая длина - это число ячеек памяти + текущий бит.

$$L = m + 1, \quad (1.12)$$

где m - число регистров памяти, триггеров в регистре сдвига.

Чем больше L , тем лучше помехоустойчивость, но тем сложнее процесс декодирования.

Формула для расчёта количества бит избыточности, от общего количества полезных бит.

$$R = 1 - V = 1 - \frac{k}{n} = \frac{n - k}{n} * 100\%, \quad (1.13)$$

где k - число информационных бит, n - число передаваемых бит.

Турбокоды являются классом высокоэффективных помехоустойчивых кодов с высокой коррекцией ошибок и используются

в системах цифровой магистральной связи, а также нашли своё применение в спутниковой связи и в других областях, в которых необходимо достижение максимальной скорости передачи данных по каналу связи с шумами в ограниченной полосе частот.

Для декодирования таких кодов используются алгоритмы, основанные на методах сведения к графическим представлениям, например, алгоритм суммирования произведений (sum-product algorithm).

Принцип работы кодов Турбо включает использование двух или более рекурсивных систематических сверточных кодеров (RSC).

Итеративное декодирование улучшает производительность по мере увеличения числа итераций. Апостериорная вероятность такого декодирования может быть представлена как:

$$L(u) = \log \left(\frac{P(u = 1|y)}{P(u = 0|y)} \right), \quad (1.14)$$

где $L(u)$ — логарифмическое отношение апостериорных вероятностей (LAPPR), а y — принятый вектор.

Бурное развитие телекоммуникационных систем приводит к плотному заполнению эфира и, как следствие, к сложностям с электромагнитной совместимостью систем передачи информации и к сложной помеховой обстановке. Зашумленность радиоканалов и сложная помеховая обстановка приводят к ошибкам при передаче цифровой информации. Передаточная функция радиоканалов является случайной величиной, так как на нее влияют случайные климатические и сезонные процессы, а часто выраженная многолучевость при распространении радиоволн приводит к интерференционным замираниям. В таких условиях связи ошибки при передаче сигналов становятся неизбежными. Использование помехоустойчивого кодирования для исправления ошибок несомненно дает положительный

результат, особенно для систем передачи информации, работающих по радиоканалам.

Системы телеметрии, передающие информацию через радиоканалы, из-за случайных флуктуаций передаточной функции радиоканала, а также под влиянием сложной помеховой обстановки в радиоканалах несут потери в качестве передачи информации, выражающиеся в появлении ошибок в принимаемой системами цифровой информации.

Без применения специальных мер, таких как помехоустойчивое кодирование и разнесенный прием, на большинстве атмосферных радиолиний, работающих в сложной помеховой обстановке, наблюдается вероятность ошибки при передаче цифровой информации в интервале от 10^{-2} до 10^{-3} [10]. Поэтому приходится применять помехоустойчивое кодирование, чтобы поднять качество передачи информации на более высокий допустимый уровень, снижая вероятность ошибки до 10^{-6} и лучше. Хотя за это приходится платить как потерями во времени доставки сообщений, так и дополнительными энергетическими затратами, необходимыми для передачи бит избыточности [11].

Парадигма помехоустойчивого кодирования объединяет работы ряда авторов, в которых подробно рассмотрены различные типы кодов (Хэмминга, Рида-Соломона, Сверточные, Турбокоды и другие) и их применение для обеспечения надежности передачи данных [12-20]. Применение помехоустойчивых кодов позволяет исправлять ошибки, однако их эффективность зависит от многих факторов, в том числе от длины сообщений.

К настоящему времени систематизированы требования к сетям телеметрии, обоснованы методы повышения надежности доставки

сообщений в условиях сложной помеховой обстановки, а также выявлена необходимость адаптивного подхода к помехоустойчивому кодированию [21]. Однако для систем дистанционного управления и телеметрии, работающих с нерегулярными по длительности сообщениями в условиях сложной помеховой обстановки, применяемые методы и средства адаптивного помехоустойчивого кодирования не всегда обеспечивают потенциально возможную эффективность, что формирует основу для дальнейших исследований методов адаптивного кодирования.

1.4. Цель и задачи исследования

Большинство систем телеметрии работают со случайными по длительности сообщениями и применение в таких системах помехоустойчивого кодирования приводит к дополнительным затратам ресурса связи. Так как системы работают чаще всего в сложной помеховой обстановке, то исправлять необходимо максимально большое количество ошибочных бит.

Обратим внимание на противоречие между необходимостью высокой избыточности для исправления наибольшего количества ошибок и неэффективным использованием ресурса связи при этом, поскольку при выборе величины избыточности приходится ориентироваться на максимально большое количество информационных бит k в передаваемых сообщениях. Это создает проблему при применении помехоустойчивого кодирования в каналах связи с

нерегулярными по длительности сообщениями, характерными для систем контроля, телеметрии и дистанционного управления.

Суть этой проблемы в том, что при коротких передаваемых сообщениях величина вводимой при кодировании избыточности будет излишне большой, что приводит к неэффективному расходу ресурса связи, так как в коротких сообщениях требуется исправить 1-2 ошибки, а избыточность заложена на исправление, например, 10 ошибочно принятых бит. Противоречие между длительностью информационного сообщения и величиной вводимой при помехоустойчивом кодировании избыточности влияет как на эффективность доставки сообщений, так и на энергетические и временные ресурсы систем контроля, телеметрии и дистанционного управления.

На разрешение этого противоречия и направлена настоящая научная работа. Путем разрешения указанного противоречия может стать применение методов адаптации величины, вносимой в информационный поток избыточности к длительности информационного сообщения. При этом потребуется определить уровни адаптации, то есть найти оптимальные зависимости кодовой скорости от изменяющейся длительности информационной составляющей в передаваемых сообщениях и исследовать влияние адаптивного кодирования на помехоустойчивость систем телеметрии и управления.

Исходя из изложенного выше цель исследования можно сформулировать следующим образом: **разработка и исследование методов, алгоритмов и реализующих их устройств адаптивного кодирования цифровых сообщений в локальных сетях телеметрии и управления.**

Для реализации сформулированной цели исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Определить имеющиеся противоречия в локальных сетях телеметрии и управления и предложить пути их устранения.
2. Разработать метод оценки качества и методику определения достоверности принимаемой информации в адаптивных системах связи.
3. Предложить методику контроля достоверности принимаемой информации в реальном времени.
4. Разработать и исследовать алгоритмы адаптивной перестройки параметров систем дистанционного управления и телеметрии.
5. Создать приемо-передающие модули с адаптивным помехоустойчивым кодированием и выполнить модельные и натурные экспериментальные исследования синтезированных устройств.
6. Разработать рекомендации по практическому применению адаптивных систем дистанционного управления и телеметрии.

Выводы по главе I

Выполнен краткий обзор свойств сетей телеметрии и управления при передаче по ним цифровых сообщений, рассмотрено применение методов помехоустойчивого кодирования цифровой информации в локальных сетях передачи сообщений и показана неоднозначность выигрыша от использования этих методов при передаче цифровых сообщений различной длительности.

По результатам главы можно сформулировать следующие выводы:

1. Сделан обзор свойств локальных сетей передачи цифровой информации, использующих радиоканалы с замираниями, межсимвольной интерференцией, различными помехами, доплеровскими сдвигами частоты.

2. Выполнен анализ доставки сообщений в локальных сетях телеметрии и управления и обоснована необходимость повышения надежности доставки сообщений в условиях сложной помеховой обстановки.

3. Выявлено противоречие при применении методов помехоустойчивого кодирования в локальных сетях телеметрии и управления при передаче по ним сообщений различной длительности.

4. Предложено для устранения выявленного противоречия применять методы адаптивного помехоустойчивого кодирования цифровой информации в локальных сетях телеметрии и дистанционного управления.

5. Определена цель исследования, заключающаяся в разработке и исследовании методов, алгоритмов и реализующих их устройств адаптивного кодирования и декодирования цифровых сообщений в локальных сетях телеметрии и управления.

6. Сформулированы основные задачи исследования, решение которых необходимо для реализации поставленной в работе цели и разрешения выявленного противоречия при передаче нерегулярных по длительности сообщений в локальных сетях телеметрии и дистанционного управления.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АДАПТИВНОГО ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ СООБЩЕНИЙ В СИСТЕМАХ РАДИОУПРАВЛЕНИЯ И ТЕЛЕМЕТРИИ

2.1. Достоинства и недостатки адаптивных методов кодирования информации

Адаптивные методы кодирования информации, используемые при передаче и хранении данных для оптимизации представления данных в зависимости от их характеристик или условий канала связи, крайне необходимы для организации связи в условиях повышенной изменчивости параметров помеховой составляющей принимаемых сигналов из-за наличия как естественных, так и организованных помех различных типов. Негативно влияют на качество приема сигналов и ошибки синхронизации, или непринятие данных в пакете при пакетной передаче информации, вследствие чего происходит ошибка контрольной суммы пакета или пропуск всего пакета данных.

Адаптивные методы помехоустойчивого кодирования (АМПК) могут динамически изменять свои параметры для повышения эффективности или надежности доставки информации, или того и другого. Преимущества АМПК заключается в повышенной эффективности системы за счет противодействия изменениям свойств и характеристик каналов передачи данных. АМПК дают возможность подстраиваться под характеристики передаваемых данных, потенциально уменьшая избыточность и повышая степень сжатия информации.

Величина избыточности может адаптироваться к изменяющимся условиям канала, оптимизируя использование полосы пропускания и обеспечивая сведение ошибки к условному минимуму. Повышая надежность системы связи путем приспособления к изменениям в канале связи (например, уровню шума и помех), АМПК позволяют поддерживать более высокий уровень целостности данных. Механизмы коррекции ошибок могут быть динамически настроены в соответствии с текущим уровнем ошибок, что повышает общую надежность системы связи. Адаптивная «гибкость» работы с широким диапазоном типов входных данных и условий канала не будет требовать значительного ручного вмешательства. Это означает что система может автоматически переключать различные схемы кодирования по мере необходимости, что делает ее универсальной для различных входных условий.

Дополнительный положительный эффект от применения адаптивного кодирования состоит в том, что при долговременной работе системы связи АМПК позволяют снизить энергопотребление за счет оптимизации параметров передачи на основе текущего состояния канала. Это особенно полезно для беспроводных устройств с питанием от батарей, таких, например, как мобильные телефоны или датчики IoT (InternetofThings) для концептов «умного дома».

Методы адаптивного кодирования хорошо масштабируются при увеличении скорости передачи данных или сложности сети, что делает их подходящими для современных высокоскоростных сетей передачи данных.

АМПК могут применяться не только при передаче данных по радиоканалам, но также и по кабельным каналам связи, проводным и оптоволоконным. При этом появляется возможность передавать, например, видео информацию с лучшим качеством картинки, которая

несет в себе большое количество данных. В этом случае появляется необходимость в сжатии данных, когда схема кодирования адаптируется к характеристикам сжимаемых данных.

В отличие от широко используемых статических кодов, которые используют фиксированную модель [22-33], адаптивные методы меняют свою модель по мере обработки данных [34-48]. Среди известных примеров - адаптивное кодирование Хаффмана [49] и алгоритм Лемпеля-Зива-Уэлча (LZW) [50, 51].

Например, в видеофайле разные сцены могут иметь разное распределение цветов и адаптивный кодек может подстроиться под это. Еще одним преимуществом может быть то, что не требуется предварительных знаний о данных.

Статические методы кодирования нуждаются в заранее определенной модели информационного потока данных, которой может не быть, поэтому адаптивные методы более успешны, так как не требуют априори таких моделей.

Однако, адаптивные методы могут быть более требовательными к вычислительным ресурсам, поскольку им приходится обновлять свои модели в реальном времени [47]. Это может замедлить процессы кодирования или декодирования. Кроме того, начальное сжатие может быть хуже, потому что модель еще не адаптировалась. Например, в начале файла адаптивный кодер еще не подобрал адаптивную модель, поэтому первые несколько символов могут быть сжаты не так эффективно, как следующие.

Существует также проблема программно-аппаратной сложности реализации АМПК. Корректное и эффективное обновление модели канала может оказаться сложной задачей, что приведет к потенциальным ошибкам или недочетам.

Передача модели кода на приемную сторону линии связи при адаптивном кодировании требует времени, но некоторым адаптивным кодам не нужно передавать модель, потому что они строят ее динамически, по мере кодирования или декодирования. Например, при методе LZW строится словарь на обоих концах линии связи и нет необходимости его передавать.

Адаптивное кодирование Хаффмана корректирует дерево Хаффмана по мере обработки символов [49]. Таким образом, кодер и декодер синхронно обновляют свои деревья. Преимущество этого метода в том, что он может работать с изменяющимися частотами. Недостатком являются вычислительные затраты на постоянное обновление дерева. Метод начинает работу с базового словаря и добавляет новые записи по мере появления новых последовательностей. Преимуществом является хорошее сжатие повторяющихся данных, но недостатком может быть расход памяти, так как словарь может увеличиться.

Вычисления при адаптивном кодировании Хаффмана более объемны, так как каждый символ требует обновления дерева [49]. Статический Хаффман может потребовать $t(n)$ времени для однократного построения дерева, в то время как АМПК требует T общего времени для обновления.

$$T = t * (n * \log n), \quad (2.1)$$

где n - размер входных данных, t – временная функция алгоритма.

Таким образом, вычислительные затраты выше.

В целом, для достаточно длинных файлов адаптивный метод кодирования выигрывает, но для коротких файлов статический может быть лучше. К недостаткам АМПК также относится чувствительность к ошибкам. При ошибке передачи адаптивные модели на кодере и

декодере могут потерять синхронизацию, что приведет к дальнейшим ошибкам.

Среди большинства плюсов адаптивных методов кодирования, выделяются и крупные недостатки. Алгоритмы, необходимые для адаптивного кодирования, зачастую сложнее, чем алгоритмы для фиксированных схем кодирования, что приводит к большим вычислительным затратам [48].

Процесс адаптации к изменяющимся условиям может вносить дополнительную задержку, что может быть проблематично в приложениях реального времени, таких как передача голоса или потокового видео. Постоянный мониторинг и корректировка параметров кодирования могут привести к задержке обработки и передачи данных, то есть к задержке сообщений.

Адаптивные методы кодирования могут потребовать больше памяти и вычислительной мощности для хранения и вычисления необходимых параметров и корректировок. Это может быть ограничивающим фактором в средах с ограниченными ресурсами, например, во встроенных системах или устройствах с низким энергопотреблением. Некоторые схемы адаптивного кодирования могут создавать дополнительные накладные расходы в виде метаданных или управляющих сигналов, что может снизить эффективную пропускную способность.

Первоначальная настройка АМПК негативнее всего, так как требуется выборка из большого количества данных для настройки системы, особенно если речь идет о непредсказуемых или сильно меняющихся условиях передачи информации.

Многие методы адаптивного кодирования полагаются на точную и своевременную обратную связь об информации, сообщаемой о

состоянии канала (CSI-ChannelStateInformation). Если эта информация запаздывает или является неточной, это ухудшает производительность и вносит большое количество ошибок.

Существуют уже реальные адаптивные модели кодирования, представленные в таблице 1. Например, адаптивное кодирование используется в таких мультимедийных кодеках, как H.264/AVC, где применяется CABAC (Context-Adaptive Binary Arithmetic Coding), который является адаптивным и обеспечивает лучшее сжатие, но он сложнее, чем CAVLC (Context-Adaptive Variable-Length Coding), который значительно проще. В качестве примера можно привести CABAC против CAVLC [52].

Таблица 1. Свойства адаптивных моделей.

Модель	Начальные условия	Производительность	Положительные/отрицательные свойства	Литература
LZV	Не требуются первоначальные данные	Сжатие 80% текста	Положительная модель	[35,36]
CABAC в H.264	Нестационарные данные	Сжатие лучше альтернативных моделей на 10-15%	Положительная модель	[38]
Адаптивный алгоритм Хаффмана	Большие вычисления	Кодирует в 2.5 раза дольше альтернативных моделей	Отрицательная модель	[39]
LZV для коротких файлов	Большая задержка	На 15% хуже статического LZV	Отрицательная модель	[17,36]

Обобщая вышесказанное, отметим, что в целом, адаптивные методы кодирования информации дают значительные преимущества с точки зрения эффективности, надежности и гибкости, однако они связаны со сложностью реализации, задержками доставки сообщений и дополнительной потребностью в программных и аппаратных ресурсах.

Критерии, которые берутся в расчет, заключаются в том, насколько затратно происходит кодирование/декодирование в адаптивных моделях, сильно ли разнятся по времени кодирование и декодирование информации. Потому что при передачи коротких сообщений выгодно использовать статистические модели кодирования/декодирования информации. Все зависит от того какие параметры в данный момент используются в приемо-передатчике:

- 1) ширина полосы;
- 2) кодовая скорость внутреннего и внешнего кода;
- 3) число блоков информации в секунду;
- 4) чувствительность приемника;
- 5) мощность передатчика.

2.2. Разработка алгоритмов адаптивной перестройки сигналов систем радиуправления и телеметрии

Рассмотрим адаптивную перестройку параметров каналов управления, которая наиболее просто реализуется за счет организации дуплексной или полудуплексной связи, на примере БПЛА. Часть существующих систем управления БПЛА содержит не только канал управления беспилотным аппаратом, но и обратный канал телеметрии. Те системы, где обратные каналы телеметрии отсутствуют, тем не менее,

реализованы преимущественно на приемопередатчиках, которые на борту БПЛА способны не только принимать, но и передавать информацию, а в устройстве управления не только передавать, но и принимать информацию, без значительной схемотехнической перестройки. Таким образом, возможность организации дуплексной или полудуплексной системы управления и телеметрии в БПЛА существует [53].

Например, организация обратного канала возможна за счет передачи информации в паузах между принимаемыми сигналами управления или за счет организации «временных окон» в потоке передаваемых данных от устройства управления БПЛА. Адаптивная перестройка параметров канала управления зависит от контролируемого качества связи, которое может быть выражено в виде какого-либо значения в диапазоне от 0 до 1. Поэтому время работы обратного канала связи относительно времени работы прямого канала управления составит незначительную величину. Например, система управления БПЛА передает блок информации о восьми параметрах в десятиразрядном коде (ELRS) и 50 блоках в секунду. Это составит 4000 бит/с. Информация же о качестве принимаемых сигналов может кодироваться в восьмиразрядном коде и передаваться по обратному каналу раз в секунду, что составит 8 бит/с, т.е. не более 0,2% от времени работы канала управления.

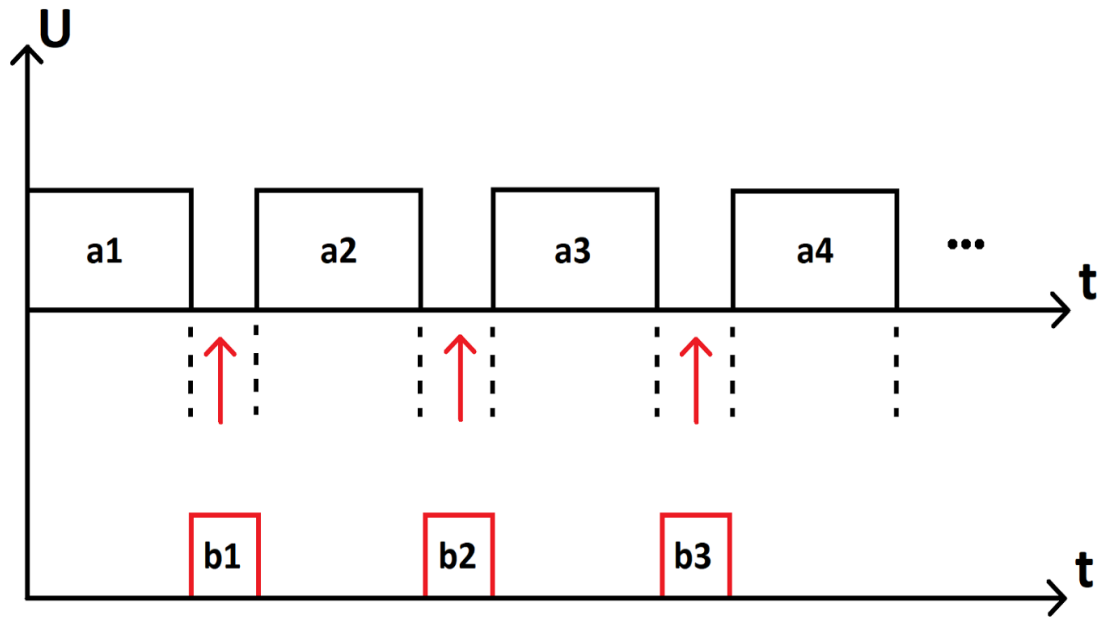


Рис. 4. Первый вариант построения канала полудуплексной системы связи.

На рисунке 4 предложен один из вариантов построения канала системы связи, где номер блока обозначает порядок построения блоков. Блоки «an» содержат в себе поток информационных данных (команды управления), тогда как блоки «bn» содержат в себе информацию обратной связи (характеристики параметров системы).

Такой вариант построения канала означает, что в момент, когда происходит временная задержка между отправляемыми блоками управления, отправляется блок, информирующий о «состоянии системы» и её параметрах. Недостаток такой системы построения адаптивной системы передачи информации заключается в том, что необходимо задать фиксированные временные задержки между блоками управления. При этом падает скорость передачи данных, что естественно негативно сказывается на системе связи [54]. На рисунке 4, указаны блоки посылок обратной связи, которые передаются в обратном направлении, используя временные интервалы между блоками команд управления. Однако это требует дополнительных защитных временных интервалов для

ликвидации возможности смешивания посылок прямого и обратного каналов.

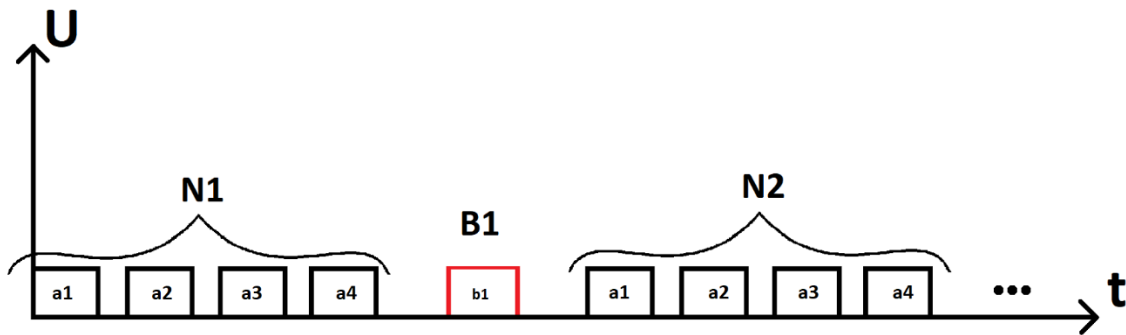


Рис. 5. Второй вариант построения канала полудуплексной системы связи.

На рисунке 5 представлен предлагаемый второй вариант построения канала адаптивного управления системой связи. Здесь номер посылки « N_n » содержит в себе все информационные блоки « a_n » команды управления, тогда как блоки « B_n » содержат в себе посылки « b_n » информации обратной связи о качестве принимаемого сигнала и о параметрах самой системы).

Такой вариант построения канала связи более целесообразный, так как нет постоянных временных задержек между блоками в посылках управляющих сигналов « N_n », что повышает скорость передачи данных, а в момент искусственно введенной паузы, между блоками посылок « N_n », передается блок обратной связи, где содержится информация о состоянии системы связи.

Однако, следует отметить, что обратный канал связи, должен быть максимально помехоустойчивым, чтобы устройство управления всегда имело достоверную информацию о качестве связи в текущий момент времени [55]. Для повышения помехоустойчивости, возможно, потребуется реализация обратного канала связи с параметрами,

обеспечивающими максимальное соотношение с/ш. При этом, необходимо будет организовать более протяженные «временные окна».

Повышение помехоустойчивости обратного канала связи возможно различными путями, например, за счет снижения скорости передачи сигналов путем уменьшения полосы частот используемого обратного сигнала, повышения коэффициента расширения спектра, увеличения длины преамбулы, максимальной степени внутреннего кодирования, введения дополнительного помехоустойчивого кодирования и т.д. [56].

В качестве аппаратного обеспечения канала управления БПЛА можно рекомендовать серийный радиочастотный приемопередатчик марки SX1276, внешний вид которого и его антенны приведен на рисунке 6. Приемопередатчик обладает внутренним большим набором настроек, с помощью которых можно осуществить адаптивную подстройку к изменяющейся помеховой обстановки в канале связи. Также SX1276 легкодоступен на рынке, имеет малые габариты и экономически выгоден по сравнению с аналогами на рынке.



Рис. 6. Модуль LoRa Eoth SX1276 – радиочастотный приемопередатчик для связи на большие расстояния.

Предлагается методика адаптивной перестройки параметров канала управления, которую можно описать следующим образом:

1. На этапе разработки определяется M различных вариантов параметров канала управления, при которых обеспечивается различная чувствительность приемника со стороны БПЛА. При этом, основным параметром является количество передаваемых устройством управления информационных блоков, т.е. скорость передачи информации [57].

2. На примере приемопередатчика SX 1276, с применением метода расширения спектра типа ППРЧ (псевдослучайной перестройки рабочей частоты), проведем натурные испытания для различных параметров кодирования и различных условий передачи цифровой информации.

3. Выполнив пункт 2, получим таблицу из совокупности параметров канала управления для различной скорости передачи информации и максимальной чувствительности приемника, соответствующей этим параметрам. Результаты натурального моделирования приведены в таблице 2.

4. Затем определяем параметры обратного канала связи, в том числе, с дополнительным кодированием, соответствующие чувствительности приемника [46].

5. Для полетного контроллера БПЛА выбираются одинаковые параметры прямого и обратного канала связи, соответствующие самой высокой скорости передачи информации из таблицы 2.

В таблице 2 приведены примеры из технической документации модуля «LoRa Connect Transceiver SX1276» [58], а на представленном рисунке 6, показано, как с увеличением расстояния от передатчика, изменится значение показателя принимаемого сигнала (RSSI). Надо учитывать, что представленные режимы работы адаптивного канала

управления, были без учета исправляющей способности помехоустойчивых кодов и длины преамбулы [59].

Таблица 2. Предполагаемая дальность связи относительно выбранного режима работы.

Номер режима	Ширина полосы, КГц	Число изменений несущей частоты	Кодовая скорость внутрикода	Кодовая скорость внешнего кода	Длина преамбулы, байт	Число блоков информации в секунду	Нижний порог чувствительности приемника, 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

При установленной мощности передатчика в 1дБм, расстояние d , характеризующее потерю связи (условие, когда более 90% блоков считаются утерянными), для разных режимов работы канала связи, фиксировалось и представлено на Рис. 7. На рисунке цифрами 1 - 6 показаны режимы в соответствии с таблицей 2.

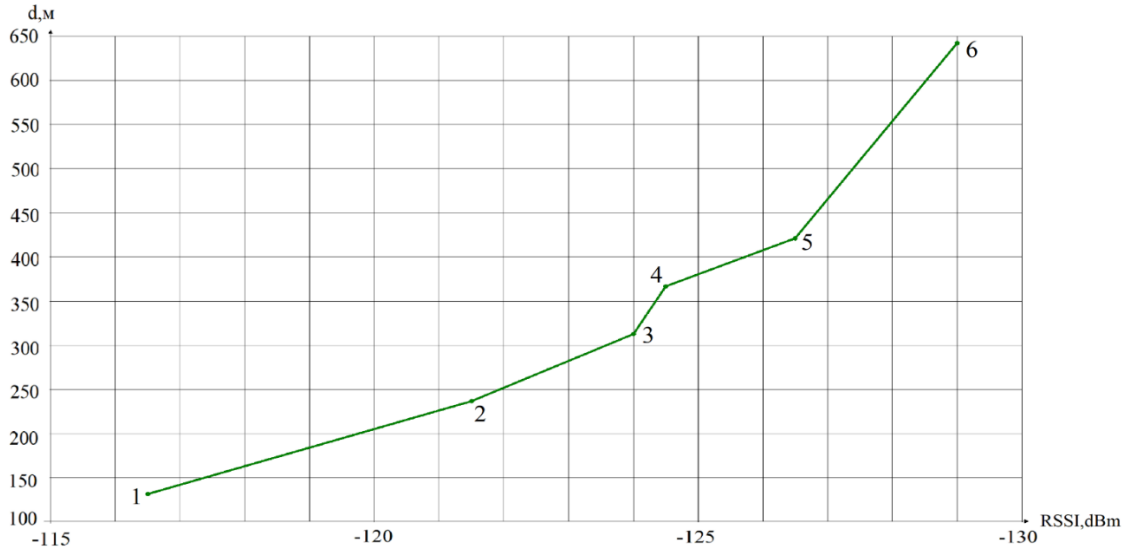


Рис.7. Зависимость дальности связи от чувствительности приемника, при работе с мощностью передатчика 1дБм.

Для определения точного выигрыша по соотношению с/ш, с учетом кодовых скоростей корректирующих кодов и длины преамбулы, необходимо проведение более масштабных модельных и натурных экспериментальных исследований. Для этого, на примере радиоканала дистанционного управления БПЛА, разработаем универсальный кодек Рида-Соломона и аппаратно-программный комплекс, представляющего собой имитатор адаптивного канала дистанционного управления беспилотным радиоуправляемым аппаратом [60].

Решение этих задач начнем с разработки алгоритмов функционирования канала дистанционного управления, как со стороны приемопередатчика у Оператора, так и со стороны приемопередатчика у БПЛА.

Разработанный алгоритм работы устройства дистанционного управления БПЛА приведен на Рис. 8.

Краткое описание алгоритма состоит в следующем:

1. Выполняется инициализация передатчика, установка параметров работы с самыми низкими настройками.

2. Передатчик устройства управления передает N информационных блоков и переходит в режим приема, устанавливая параметры связи для обратного канала.

3. Если в течении времени t_0 , соответствующего времени работы обратного канала, информация не поступила, то устройство управления возвращается в режим передачи, с ранее определенными параметрами, т.е. к п.2.

4. Если данные поступили, то их следует трактовать как скорость передачи информации по каналу управления, и из таблицы 2 выбираются параметры передачи сообщений, соответствующие принятому значению скорости передачи. Устройство управления переходит в режим передачи и к п.2.

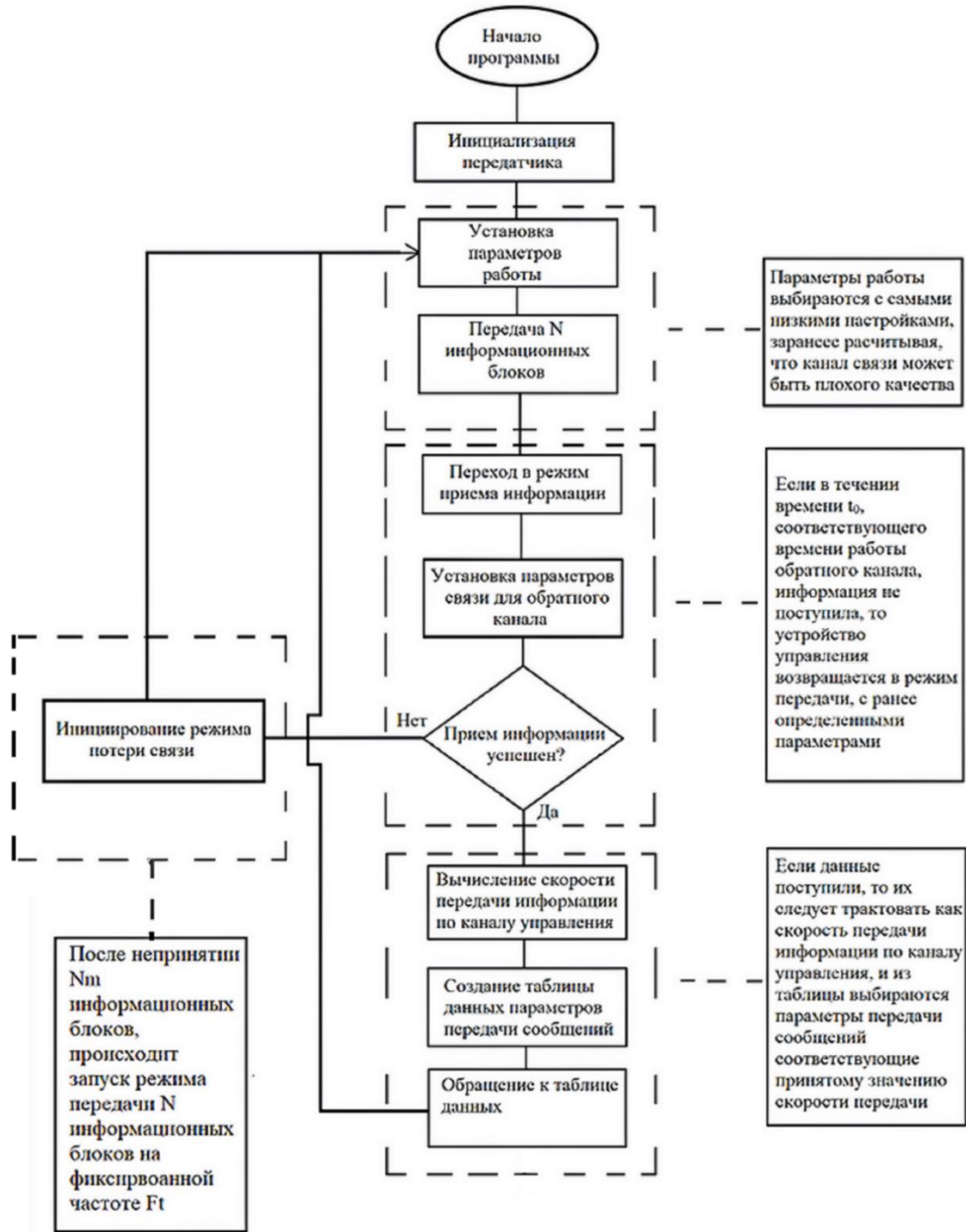


Рис. 8. Блок схема алгоритма функционирования адаптивного канала управления приемо-передающего модуля со стороны Оператора.

Опишем предложенный алгоритм работы обратного канала со стороны БПЛА, приведенный на Рис. 9.

1. Инициализация приемника, установка параметров работы с самыми низкими настройками.

2. 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) [61].

3. 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 (чувствительность) приемника), снизить скорость передачи (повысить возможности (чувствительность) приемника). Далее определяется скорость передачи информации по каналу управления [62].

4. Устанавливается режим обратного канала и передается значение необходимой скорости передачи информации.

5. В соответствии с определенным значением скорости передачи информации выбираются параметры приема сообщений. Приемопередатчик переходит в режим приема и возвращается к п.2.

Необходимо отметить, что увеличение скорости передачи информации (при хорошем качестве связи) может привести к полному отсутствию связи по каналу управления, поскольку чувствительность приемника может снизиться сразу на несколько дБ по соотношению С/Ш [63]. 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 БПЛА 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 в меньшую сторону, с постепенным его увеличением, до своего максимального значения [64]. 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.

2.3 Методика определения достоверности передачи информации в адаптивных системах связи и телеметрии.

Достоверность передачи информации в адаптивных системах связи и телеметрии критически важна для обеспечения надежной работы в условиях изменяющихся характеристик канала [65]. Особенностью адаптивной системы связи является то, что имеется возможность гибко

менять характеристики как блоков информационных данных при передаче, так и сами настройки канала связи. Схема информационного блока представлена на Рис.10.

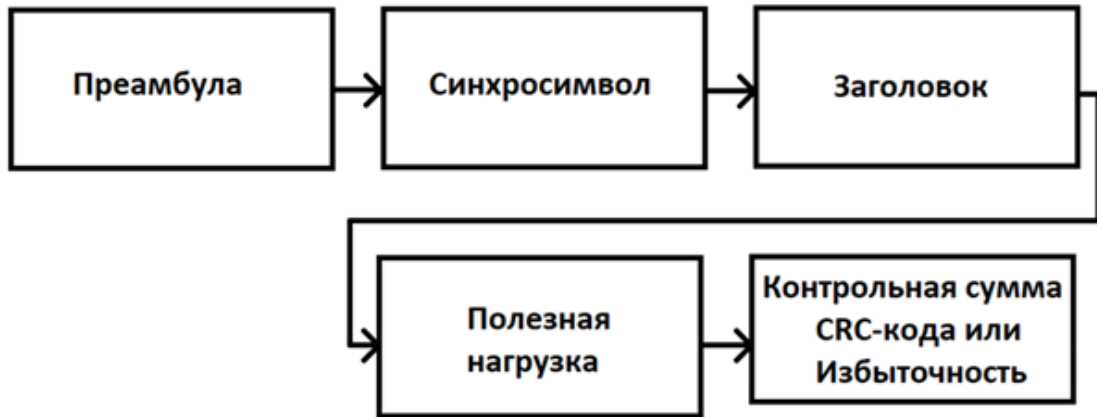


Рис.10. Компоненты информационного блока адаптивной системы связи.

Одним из важных компонентов информационного блока является преамбула, которая необходима для того, чтобы обнаружить информационный блок на приемной стороне [66]. Преамбула состоит из фиксированной последовательности бит, в качестве примера, преамбула, используемая в устройствах с технологией LoRa, состоит из двоичной последовательности бит длиной от 0 до 65535 символов.

В некоторых системах передачи информации длина преамбулы может варьироваться, что позволяет повышать или понижать вероятность обнаружения блока данных приемником при воздействии помех [67].

Синхросимвол указывает в блоке, где заканчивается преамбула и начинается основная информационная часть. Так как длину преамбулы можно изменять, в случае изменения качества канала связи, на приемной стороне необходимо видеть эту границу.

В заголовок помещается служебная информация, которая содержит в себе длину блока, адрес получателя (для сетей с мульти-

узлами), тип данных, номер блока (если необходим порядок восстановления при потере пакета) и дополнительные настройки канала связи [68].

В полезной нагрузке находится информация, которую требуется передать. Количество информационных пакетов целесообразно адаптивно изменять, в зависимости от качества принимаемой информации. При высокой достоверности принятой информации имеет смысл увеличивать количество информационных блоков, тем самым увеличивая скорость передачи информации и наоборот, снижать количество информационных блоков в ущерб скорости передачи информации при низкой достоверности принятых данных [69].

В конце блока присутствует контрольная сумма (CRC). Совпадение или несовпадение контрольной суммы показывает об успешном приеме или о том, что блок информации содержит ошибки [70].

Кроме применения CRC, можно использовать помехоустойчивое кодирование. Некоторые помехоустойчивые коды способны не только обнаруживать и исправлять ошибки, но и сообщать, когда количество ошибок больше, чем исправляющая способность кода [71]. Примером такого кода является код Рида-Соломона [72].

На приемной стороне искажённое кодовое слово:

$$r(x) = c(x) + e(x), \quad (2.2)$$

где $r(x)$ - принятый вектор, $c(x)$ - переданное слово, $e(x)$ - вектор ошибок.

Для исправления ошибок, синдромы S_1, S_2, \dots, S_{2t} вычисляются как значения $r(x)$ в корнях порождающего многочлена. Если все синдромы нулевые, ошибок нет.

С помощью алгоритмов (например Берлекэмп-Мэсси или Евклида) строится многочлен локаторов ошибок $L(x)$, корни которого

указывают позиции ошибок [73]. Используя синдромы и позиции, вычисляются значения ошибок после чего они устраняются из принятого слова.

Код Рида-Соломона теоретически ограничен исправлением до t ошибок, где t – половина избыточности. Если количество ошибок $e > t$, исправление всех ошибок невозможно.

Если в процессе декодирования обнаруживается, что количество ошибок $e > t$, код объявляет ошибку неисправимой. Если степень $L(x) > t$, это означает, что $e > t$, и декодер прекращает попытки исправления [74].

Доля ошибочных бит к общему числу принятых (BER - Bit Error Rate) определяется как

$$Pr = 1 - \sqrt[N]{1 - p_e}, \quad (2.3)$$

где Pr - вероятность ошибки на бит, N - размер блока, p_e - вероятность ошибки в блоке.

Это несет скорее теоретическое понимание о качестве канала связи, так как невозможно понять какие конкретно биты были потеряны или не восстановлены помехоустойчивым кодом [75, 76]. Можно провести эксперимент, когда на приемной стороне известна содержащаяся в блоке информация, и подсчитывать совпадающие и несовпадающие биты. Но в реальной ситуации такая реализация невозможна, так как неизвестно какие в блоке биты были испорчены, а какие нет, после того как блок был отброшен, поэтому считать, что все биты были приняты неправильно [77].

Потеря информационных блоков может произойти по различным причинам, может повредиться преамбула или синхросимвол, тогда блок не будет принят [78, 79]. Может не сойтись контрольная сумма, если даже 1 бит в информации или в самой контрольной сумме был поврежден.

При этом может быть большое число ошибок, которое не может исправить помехоустойчивый код [80, 81].

Кроме того, даже если помехоустойчивый код исправил какие-то ошибки, нельзя считать такой блок полностью успешно принятым, т.к. помехи все же нарушили информацию, и она нуждалась в восстановлении [82]. Поэтому, для оценки качества принимаемой информации можно предложить следующий подход:

- потерянные блоки, которые не были приняты в следствии повреждения преамбулы или синхросимвола, подсчитывать с коэффициентом потерь $K_{п}=1$

- потерянные блоки за счет не сходимости контрольной суммы и информации, с коэффициентом потерь $K_{п}=K_{срс}$. Коэффициент потерь $K_{срс}$, не должен быть слишком большим поскольку достаточно повреждения одного бита, чтобы блок был потерян. Необходимо учитывать, что преамбула и синхросимвол были приняты успешно. Поэтому можно предложить выбор значения этого коэффициента из диапазона:

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

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

$$K_{пк max} = K_{CRC MAX} = \frac{\left(\frac{N_i+P+S_S}{P+S_S-1}\right)}{N_i}, \quad (2.4)$$

где N_i -длина информационной части, включая CRC, P -длина преамбулы, а S_S - длина синхросимвола.

- блоки, в которых помехоустойчивый код не смог исправить ошибки считать с коэффициентом потерь $K_{п}=K_{пк}$, $K_{пк}$ (коэффициент потерянных блоков при декодировании с помощью РС) выбирается из диапазона $[K_{пк min}, K_{пк max}]$.

$$K_{\text{ПК min}} = \frac{E}{N_i}, \quad (2.5)$$

где E -максимальное число ошибок, которое код может исправить.

В том случае, когда $K_{\text{ПК min}} > K_{\text{ПК max}}$, следует выбирать $K_{\text{ПК min}}$.

- блоки, в которых помехоустойчивый код исправил ошибки, считать с коэффициентом потерь $K_{\text{п}} = D/N$, где D число исправленных символов, N общая длина информационной части, включая избыточность. Необходимо отметить, что выбор точных значений коэффициентов K_{CRC} и $K_{\text{ПК}}$, требует проведения ряда экспериментальных исследований.

Таким образом качество принятой информации можно оценить коэффициентом K - критерий достоверности принятой информации (КДПИ), который в случае использования CRC равен:

$$K = \frac{S_{\text{п}} + K_{\text{CRC}} * S_{\text{CRC}}}{M}, \quad (2.6)$$

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.

В случае применения помехоустойчивого кодирования коэффициент КДПИ равен:

$$K = \frac{((S_{\text{п}} + K_{\text{ПК}} * S_{\text{RS}}) + \sum_{i=1}^{S_i} (\frac{D_i}{N}))}{M}, \quad (2.7)$$

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.

Когда качество канала высокое (коэффициент КДПИ меньше порогового значения), при малом числе ошибок, можно увеличить скорость передачи информации, за счет большего количества блоков в единицу времени [83-85]. В примере, описанном в таблице 2 (в случае модуляции LoRa или другой модуляции с расширением спектра, например ПСПИ), уменьшается длина преамбулы и снижается коэффициент расширения спектра.

Кроме каналов управления и телеметрии такой подход можно применить и в каналах, где передается большой поток данных, фото или видео файлы с высоким разрешением (необходимо в ситуациях, когда недопустима ошибка в управлении БПЛА на больших скоростях или когда передается фото/видеофайлы) [86-89].

Когда качество канала низкое (КДПИ больше порогового значения), мы снижаем скорость передачи информации за счет меньшего числа блоков в единицу времени, но при этом каждый блок увеличивается по времени.

Это возможно за счет либо увеличения коэффициента расширения спектра (например, уменьшения скорости передачи данных при фиксированной тактовой частоте микропроцессора), либо за счёт увеличения избыточности кодирования [90].

Абонент (например, БПЛА), оценив качество принимаемой информации, передает определенный сигнал, который может иметь три варианта, увеличение скорости передачи информации (мало ошибок), уменьшение скорости передачи информации (много ошибок) и сохранение текущего режима [91]. После передачи такого сигнала,

абонент переходит на новый режим (или остается на прежнем) передачи сообщений из заранее предустановленных режимов для разных скоростей передачи информации, а передатчик, получив такое сообщение, поступает аналогичным образом.

Предустановленные режимы характеризуются чувствительностью приемника и скоростью передачи информации, которая чем ниже, тем выше чувствительность приемника [92]. Таким образом, выбор того или иного режима, позволит, например, повысить чувствительность приемника, снижая скорость передачи информации. Количество заранее определенных и предустановленных режимов в передатчике и приемнике зависит от диапазона изменений их параметров. В случае приемопередатчиков, применяющих технологию LoRa, количество таких режимов, может быть более 10. Большое количество заранее определенных режимов позволит осуществлять более гибкую адаптацию в условиях сложной помеховой обстановки.

Методика определения достоверности принимаемой информации заключается в следующем:

1. Подсчет суммы потерянных блоков из-за повреждения преамбулы или синхросимволов (S_{II}),
2. Подсчет суммы блоков, где не сошлось значение CRC (S_{CRC}). Или, если используется помехоустойчивое кодирование (ПК), значение суммы блоков, где не удалось исправить ошибки помехоустойчивым кодом (S_{RS}),
3. Вычисляется коэффициент потерянных блоков (K_{II}),
3. Сумма блоков S_{CRC} умножаются на коэффициент $K_{II}=K_{CRC}$. Или, если используется ПК, сумма блоков S_{RS} умножается на коэффициент $K_{II}=K_{ПК}$,

4. Общая сумма принятых блоков ($K_{CRC} * S_{CRC}$ и $K_{ПК} * S_{RS}$) делится на общее число отправленных блоков.

После запуска системы связи, из-за меняющейся помеховой обстановки, меняется значение КДПИ. Заранее необходимо подстроить наилучшее соотношение настроек для каждого количества блоков/с, в виде таблицы оптимума качества связи.

По итогу, в реальных условиях во время передачи, для разной помеховой обстановки, адаптивно подстраивается значение количества блоков/с, с заранее определенным набором настроек.

2.4 Синхронизация в канале радиуправления и телеметрии

Важно рассмотреть вопрос синхронизации приема и передачи телеметрической информации. Приемопередатчик (на стороне Оператора) в режиме передачи информации передает N-блоков данных, после этого он переключается в режим приемника и ждет блок телеметрии, в это время приемопередатчик (на стороне БПЛА) в режиме приема информации принимает N-блоков от Оператора и переключается в режим передачи информации и посылает блок данных о телеметрии.

Процесс синхронизации выглядит так, приемопередатчик Оператора в информационном блоке, который он отправляет, перед переходом в режим приема телеметрической информации от приемопередатчика БПЛА, передает условное значение.

Например, в байте состояния одного из цифровых переключателей (8-битная величина) не задействован старший бит (самый левый бит из двоичного числа), он будет использоваться для синхронизации работы приемопередатчика. Его логическим значением мы будем сообщать

приемопередатчику на стороне БПЛА режим работы своим логическим значением.

Значение «0» означает, что приемопередатчик на стороне БПЛА должен оставаться в режиме приема, значение «1», что приемопередатчик на стороне БПЛА передает блок данных телеметрии, после чего приемопередатчик на стороне БПЛА переходит в режим приема информации [93].

На стороне БПЛА у приемопередатчика процесс синхронизации заключается в том, что, приняв информационный блок и получив информацию из старшего бита, о котором мы говорили выше, приемопередатчик решает для себя что ему делать дальше, продолжать принимать информационные блоки (режим со значением «0»), или начать отправлять блок телеметрии по данным, заложенным в нем ранее. Ряд данных, которые будут находиться в блоке телеметрии, могут содержать статистику канала связи, координаты, характеристики батареи, режим полета:

Статистика канала связи может заключать в себе не только данные, принимаемые приемопередатчиком со стороны Оператора, но и данные со стороны приемопередатчика БПЛА, например, мощность своего передатчика TPWR (Transmit Power),

Но в большинстве случаев передается основные параметры, это мощность сигнала

- RSSI (Received Signal Strength Indicator - мощность принимаемого сигнала с),

- качество связи RQly (Receive Quality - качество принимаемого сигнала от приемопередатчика Оператора),

- отношение мощности сигнала/мощности шума RSNR (Receive Signal to Noise Ratio - отношение сигнала к шуму на приёме).

Также мы можем передать координаты от GPS на устройство управления (широта, долгота, скорость, высота,), углы ориентации дрона с полетного контроллера (тангаж, крен, рысканье) [94, 95].

Можно задать текущий режим полета

- Acro (Acrobatic mode) - акробатический режим,
- Angle - режим с автоматической стабилизацией угла,
- RTH (Return-To-Home) Возврат домой.

Процедура синхронизации проводится один раз в заданное количество блоков, во избежание сбоя из-за помех, после чего отсчитываются N-блоков информации перед отправкой блока телеметрии. Разберем этот вопрос поэтапно, временная диаграмма приема-передачи блоков представлена на Рис.11.

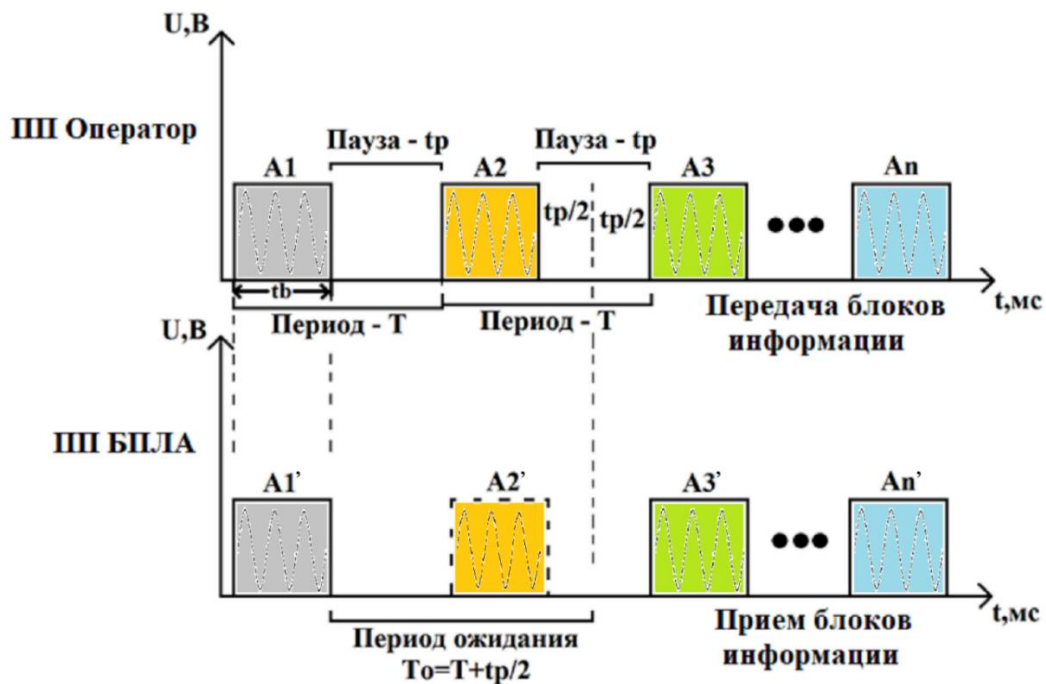


Рис. 11. Временная диаграмма синхронизации приема-передачи блоков информации.

На рисунке представлены приёмопередатчики (ПП) на стороне Оператора и БПЛА. Период между отправкой блоков (T), период паузы между отправкой нового блока (tp), время отправки блока (tb), период

ожидания приема блока от приемопередатчика Оператора (T_0), (') в названии блока означает, что ПП в режиме приема ожидает свой блок информации или телеметрии.

Как показано на рисунке 11, каждый цвет блока означает свою частоту. Зона ожидания блока A_2' , на стороне ПП БПЛА означает, что приемопередатчик в режиме приема сигнала ожидает блок информации от Оператора с частотой блока A_2 .

На примере приемопередатчика SX 1276, в котором реализуема технология псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ), приведем два варианта этой перестройки.

Первый вариант - это «медленная» ППРЧ, каждый передаваемый блок $A_1, A_2, A_3 \dots A_n$ передается на разной, случайной частоте в заданном диапазоне. Перед передачей полезной информации передатчик и приемник синхронизируются по какому случайному алгоритму они будут переключать частоты.

Второй вариант - это «быстрая» ППРЧ, каждый бит полезной информации в блоке $A_1, A_2, A_3 \dots A_n$ передается на случайной частоте.

Конечно, второй режим ППРЧ существенно нагружает передатчик, что повышает его температуру и отклонение в характеристиках его работы. В зависимости от задачи каждый из вариантов по-своему выгоден.

Даже для первого режима работы необходимы паузы между отправкой блока, чтобы передатчик не перегревался и не изменил свои рабочие характеристики.

Период между отправкой блоков состоит из времени отправки блока и паузы.

$$T = t_b + t_p, \quad (2.8)$$

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

$$T_o = T + \frac{t_p}{2} = t_b + 1.5t_p, \quad (2.9)$$

Период приема блока от приемопередатчика Оператора может измениться в следствие увеличения или уменьшения времени приема, если БПЛА улетел на большее или меньшее расстояние, или не прийти вообще в следствие помех. Поэтому мы добавляем к периоду T еще половину паузы t_p , давая возможность блоку все же поступить на приемопередатчик БПЛА.

Если блок все же поступил на ПП БПЛА, то период ожидания обнуляется и отсчитывается по новой до прибытия нового блока, если блок не пришел вообще, он считается утраченным и заносится в сумму потерянных блоков S_{Δ} . Но такое случается достаточно редко, обычно повреждается часть из блока. Тогда блок заносится в сумму поврежденных блоков с неким коэффициентом $K_{CRC} * S_{CRC}$ или $K_{ПК} * S_{RC}$.

После приема установленного количества блоков, необходимо сообщить ПП Оператора качество связи (мощность принятого сигнала, сигнал-шум, состояние ИП БПЛА). На этапе настроек обоих ПП заносится информация, через сколько отправленных блоков ПП Оператора будет ожидать блок телеметрии от ПП БПЛА. Временная диаграмма этого алгоритма представлена на Рис.12.

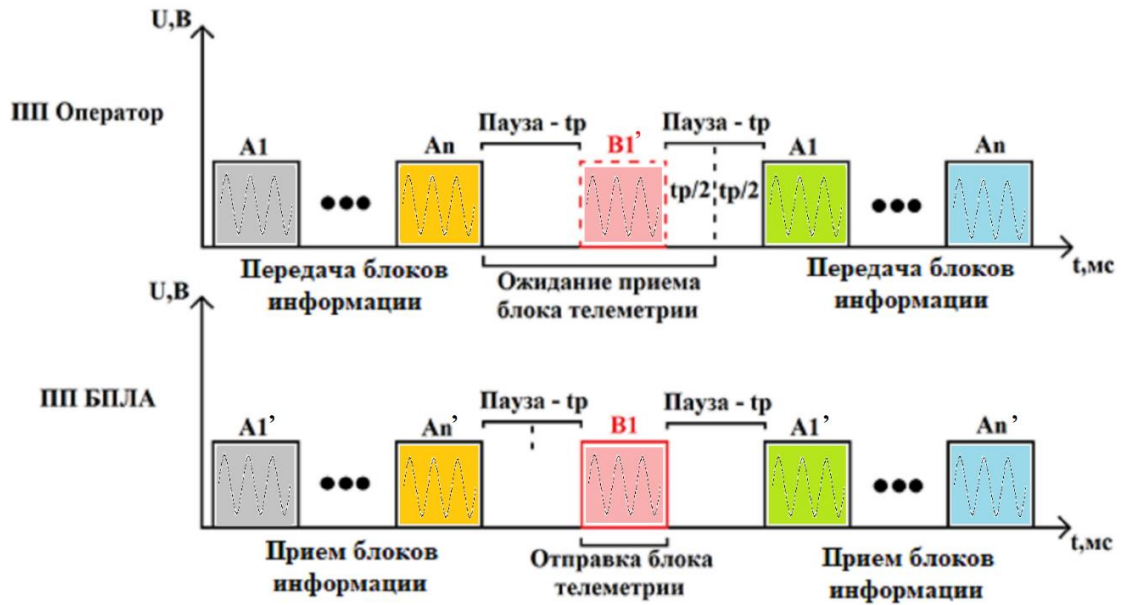


Рис. 12. Временная диаграмма синхронизации приемо-передачи блока телеметрии.

Как показано на рисунке 12, каждый цвет блока А и В означает, что блоки передаются на разной частоте, (') в названии блока означает, что в этот момент ПП в режиме приема ожидает свой блок полезной информации или телеметрии.

Выводы по главе II

Выделены достоинства и недостатки адаптивных методов кодирования информации, разработан алгоритм адаптивной перестройки сигналов систем радиуправления и телеметрии, разработаны алгоритмы работы устройства управления и БПЛА, установлена методика определения достоверности передачи информации в адаптивных системах связи и телеметрии.

По результатам, полученным в главе, можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотрены достоинства адаптивных методов кодирования, такие как, возможности изменения своих параметров, изменение избыточности, масштабирование, существенный выигрыш при длинном потоке данных. Также рассмотрены недостатки, такие как появление задержек при работе в изменяющихся условиях, высокое потребление памяти, необходимость первоначальной настройки.
2. Предложены варианты адаптивной перестройки параметров канала связи, за счет организации дуплексного/полудуплексного канала связи, рассмотрена организация обратного канала связи.
3. Предложены варианты построения дуплексного/полудуплексного канала связи.
4. Разработана методика адаптивной перестройки параметров канала управления.
5. Определена зависимость изменения параметра RSSI с увеличением расстояния от передатчика.
6. Разработаны и исследованы в модельных экспериментах алгоритмы работы устройств со стороны Оператора и со стороны БПЛА, приведены описания алгоритмов и блок схемы.

7. Представлена архитектура внутреннего устройства информационного блока.
8. Предложен метод оценки качества принимаемой информации.
9. Разработана и экспериментально испытана методика определения достоверности принимаемой информации.
10. Разработан процесс синхронизации приемо-передачи телеметрической информации.
11. Исследован процесс синхронизации между приемо-передатчиками Оператора и БПЛА.
12. Представлены временные диаграммы синхронизации приемо-передачи блоков информации и приемо-передачи блоков телеметрии.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ АДАПТИВНОГО КОДИРОВАНИЯ И ДЕКОДИРОВАНИЯ

3.1 Синтез адаптивной системы радиопередачи и телеметрии на примере беспилотных летательных аппаратов.

Обеспечение высокой достоверности сигналов управления беспилотными летательными аппаратами и достоверности передаваемой с них информации является важной задачей. Низкая достоверность передаваемой информации приводит не только к потере БПЛА, но, главное, к невыполнению поставленной перед ним задачи. Поэтому сигналы телеметрии и дистанционного управления требуют особенно высокой помехоустойчивости [96-98].

Современные беспилотные летательные аппараты все чаще применяются в сложных помеховых условиях, с естественными и искусственными сильными помеховыми составляющим. Поэтому предлагаются комбинированные настройки адаптации, затрагивающие такие параметры системы дистанционного управления, как используемый диапазон частот, мощность передатчика, настройки применяемого кода Рида-Соломона, количество информации в передающихся блоках, длительность передачи блоков. Все эти настройки должны отправляться с одного конца линии дистанционного управления на ее другой конец для явной синхронизации общения друг с другом [99,100].

Такое общение, используемое для передачи сигналов управления и телеметрии, реализуем в двух вариациях - для полудуплексного и

дуплексного радиоканалов. Отправление сообщений о качестве принятой информации (критерий КДПИ) после принятых информационных блоков, реализуем для полудуплексных каналов связи. Второй вариант, где одновременно с приемом информационных блоков идет передача блоков телеметрии, реализуем для дуплексных каналов передачи информации.

Стоит отметить важный момент обоих вариантов общения, обратный канал может передавать другой объем данных по сравнению с объемом данных канала управления [101,102].

Для варианта общения дуплексом требуется нахождения на обеих сторонах второго приемопередатчика, как показано на Рис.12, работающего в другом диапазоне частот, потому что, даже учитывая, что передатчики работают в режиме псевдо-последовательной перестройки рабочей частоты, очень часто частоты прямого и обратного каналов связи будут сходиться и создавать большое количество ошибок.

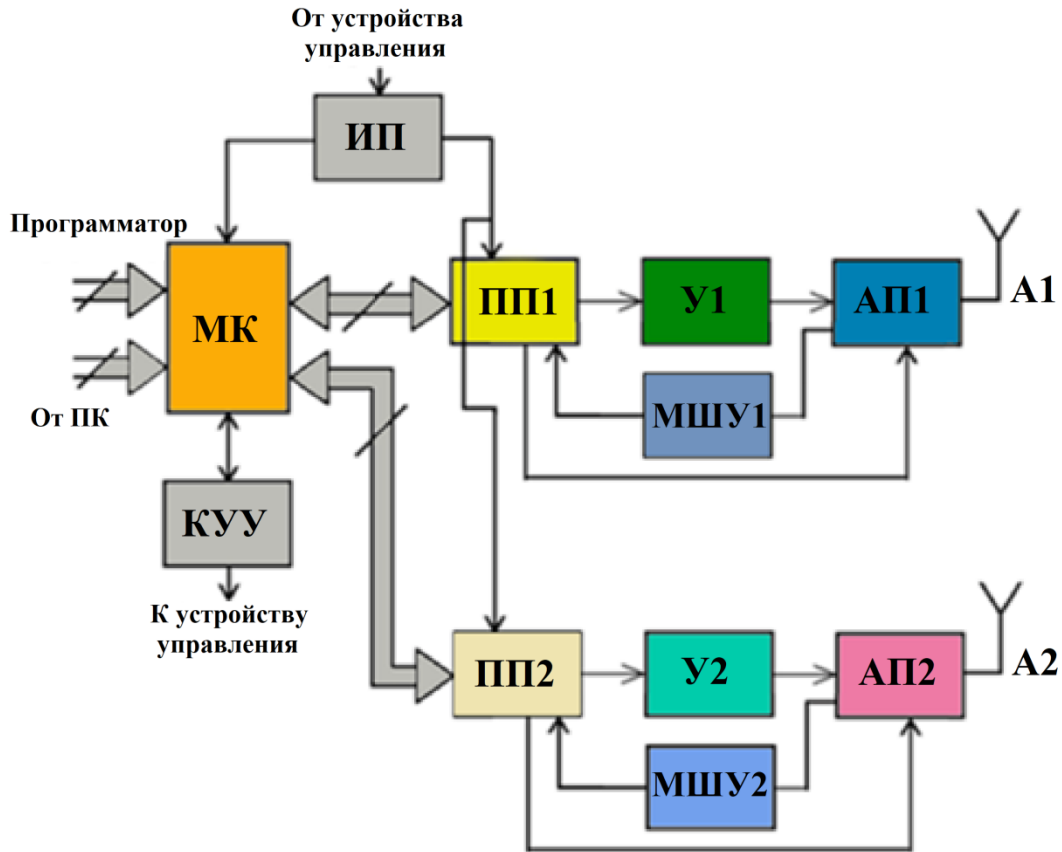


Рис.12. Структурная схема приемопередатчика на стороне Оператора (вариант дуплексного канала связи).

На Рис.12 приняты следующие обозначения: ИП-источник питания, МК-микроконтроллер, ПК-персональный компьютер, ПП-приемопередатчик, У-усилитель, МШУ-малошумящий усилитель, АП-антенный переключатель, КУУ- контроллер устройства управления, А-антенна.

Приемопередатчик на стороне БПЛА отличается тем, что ИП является полетный контроллер, а КУУ у него - это общение с полетным контроллером.

В случае варианта общения полудуплексом, как показано на Рис.13, канал связи будет один, что дает возможность использовать более широкий диапазон частот для поочередной передачи и приема информации. Передача и прием будут следовать друг за другом с

временным разделением. Поочередно после приема N-блоков управления, приемопередатчик на стороне БПЛА переключается в режим передачи и посылает 1 блок данных о телеметрии.

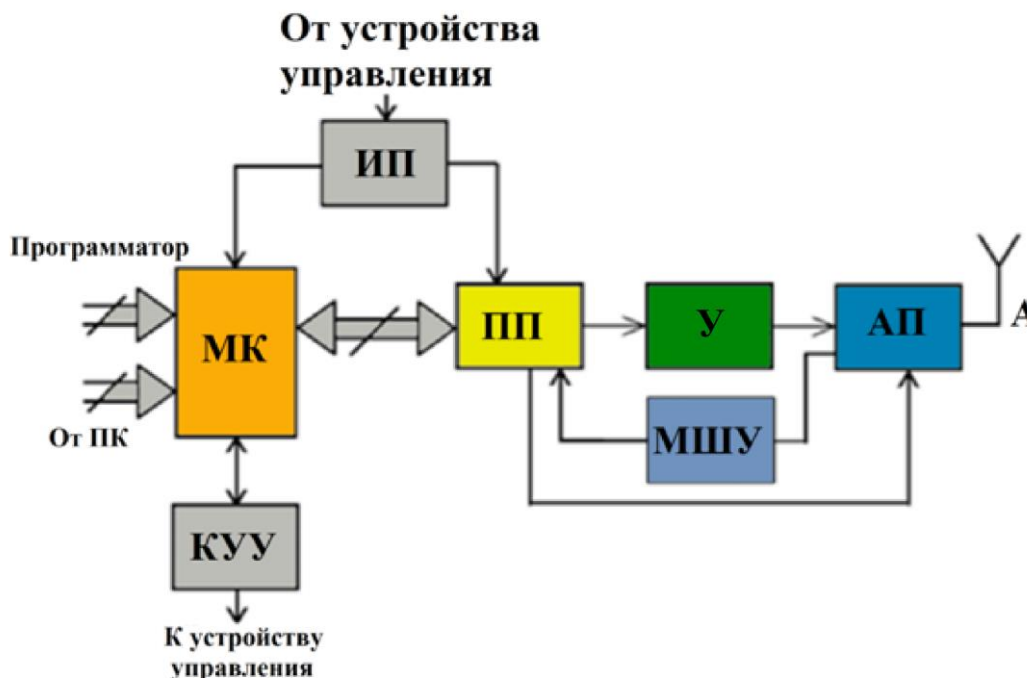


Рис.13. Структурная схема приемопередатчика на стороне Оператора (вариант полудуплексного канала связи).

На рисунках 12 и 13 представлены структурные схемы приемопередатчика на стороне Оператора. По шине программатора в микроконтроллер (МК) загружается программное обеспечение, в котором находится алгоритм работы МК, по шине от ПК выставляется режим работы, длительность передачи блоков, длительность паузы между блоками, необходимые настройки величины избыточности, шифрования, настройки ППРЧ и др.

Для проведения экспериментальных исследований построим экспериментальную линию связи, для которой выберем полудуплексный вариант канала связи (Рис.13). Для понимания всей структуры представим общий вид комплекса системы, это ПП Оператора на земле и ПП БПЛА в воздухе, как показано на рисунке 14.

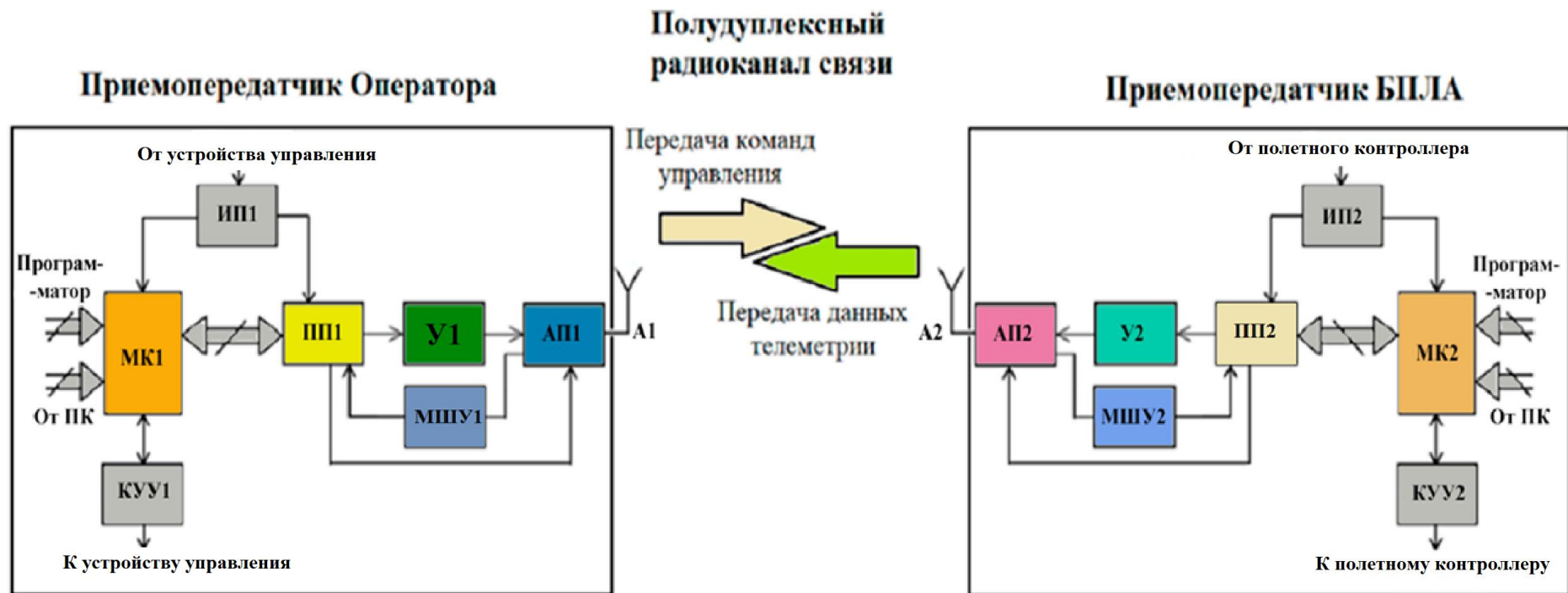


Рис.14. Функциональная схема комплекса системы полудуплексного радиоканала связи.

Периодически между блоками управления БПЛА микроконтроллер¹, по линии управления антенным переключателем¹, подает сигнал на антенный переключатель¹ о включении режима 1-3 (режим приема сигнала от БПЛА). И ждет заданный промежуток времени блок телеметрии от БПЛА (Рис.12).

После того как блок телеметрии принят, микроконтроллер¹ высчитывает значение КДПИ и в случае изменяющейся помеховой обстановки адаптивно изменяет настройки канала связи, отправляя новые настройки на приемопередатчик БПЛА.

Теперь перейдем к процессу работы приемопередатчиком на стороне БПЛА. После подачи питания от полетного контроллера, микроконтроллер 2 (с зашитым в нем алгоритмом, который содержит первоначальные настройки управления модулями) инициализирует приемопередатчик 2.

Микроконтроллер 2 посылает команду на приемопередатчик 2 о включении режима приема сигнала, приемопередатчик 2 (по линии управления антенным переключателем 2) переключает антенный переключатель 2 в режим 1-3 (режим приема сигнала от Оператора).

После этого приемопередатчик 2, в режиме приема сигнала, через малошумящий усилитель 2 ждет сигналы на заданной частоте о синхронизации с приемопередатчиком Оператора. Если в течение заданного времени синхронизация не удалась, микроконтроллер передает сигнал о потере синхронизации с приемопередатчиком Оператора. При этом включается режим поиска сигнала, ПП БПЛА переходит на одну из фиксированных частот и ждет заданное количество времени и так до тех пор, пока не будет принят сигнал ПП Оператора. Чтобы ПП БПЛА не принял чужой сигнал в конце каждого блока включена уникальная метка, по которой приемник поймет, что этот сигнал принадлежит именно ему.

После того как получилось синхронизоваться приемопередатчикам на обеих сторонах, БПЛА следует командам управления от устройства управления Оператора.

Периодически между блоками управления БПЛА микроконтроллер 2, по линии управления антенным переключателем2, подает сигнал на антенный переключатель 2 о включении режима 1-2 (режим передачи сигнала в сторону Оператора). И отправляет блок телеметрии о значении сигнал/шум, уровне заряда аккумулятора и принимаемой мощности сигнала от Оператора.

После того как блок телеметрии отправлен, микроконтроллер 2 через линию управления АП2, включает режим 1-3, о приеме информации со стороны Оператора. Если на стороне Оператора микроконтроллер1, из-за изменения КДПИ изменил настройки канала, то приемопередатчик БПЛА будет следовать указаниям, полученным от приемопередатчика Оператора.

Методика работы комплекса системы заключается в следующем:

1. Включение питания на приемопередатчике Оператора.
2. Включение питания на приемопередатчике БПЛА.
3. В течение заданного времени происходит процесс синхронизации. Если синхронизация по каким-то причинам не удалась, на устройстве управления Оператора появляется сообщение об ошибке синхронизации, а на приемопередатчике БПЛА появляется сигнал световой индикации об ошибке синхронизации.
4. Включается режим поиска сигнала, ПП БПЛА переходит на одну из фиксированных частот и ждет заданное количество пока не будет принят сигнал ПП Оператора. Чтобы ПП БПЛА не принял чужой сигнал в конце каждого блока включена уникальная метка, по которой приемник поймет, что этот сигнал принадлежит именно ему.

5. После того как синхронизация прошла успешно, Оператор включает питание двигателям БПЛА и начинает управлять аппаратом.

3.2 Анализ элементной базы приемо-передающего оборудования экспериментальной линии связи

Устройство управления получает обработанные блоки телеметрии, отправленные приемопередатчиком со стороны БПЛА. Микроконтроллер по шине SPI отправляет команды управления на приемопередатчик, в котором в соответствии с алгоритмом ППРЧ выбирается частота передачи блоков информации. Дальше сигналы с приемопередатчика усиливаются и через антенный переключатель, в режиме передачи информации приемопередатчиком, приходят на антенну.

Через N-блоков информации приемопередатчик на стороне Оператора дает команду на антенный переключатель для включения его в режим приема блока телеметрии. После обработки блока микроконтроллером, на основе таблицы коэффициентов качества канала связи и коэффициента достоверности принятой информации, происходит регулировка множества настроек чипа передатчика и настроек кодирования внутри микроконтроллера.

Важно отметить, что некоторые приемопередатчики сами могут переключать антенные переключатели.

При длительной работе необходимо учитывать, что приемопередатчик, на стороне Оператора, почти все время работает в режиме передачи информации и требует хорошего охлаждения.

Приемопередатчик на стороне БПЛА отличается умеренным режимом работы, так как большую часть времени находится в режиме

приема информации с контроллером связи - на стороне Оператора это устройство управления, а на стороне БПЛА это полетный контроллер. Разработанное программное обеспечение отражает алгоритмы работы приемопередатчика на стороне Оператора и на стороне БПЛА, которые в корне отличаются друг от друга.

Стоит затронуть требования к приемопередатчику, определить минимальное время на переключение работы приемопередатчика в режиме приема и передачи информации (определить полосу частот сигнала, коэффициент расширения спектра, степень помехоустойчивого кодирования и др.), это даст возможность при малом объеме данных телеметрии передавать их с большим качеством.

Например, блок управления содержит 12 байт информации, а блок телеметрии 6 байт информации, следовательно можно уменьшить полосу сигнала при передаче телеметрии (и в передатчике, и в приемнике), тем самым снизить скорость передачи и повысить помехоустойчивость при передаче блока телеметрической информации.

Кроме того, необходима достаточно стабильная работа как микроконтроллеров, так и приемопередатчиков, определяемая их тактовыми генераторами. Желательно наличие внешнего терморегулируемого тактового генератора в приемопередатчике. Это необходимо для того, чтобы при отсутствии блоков информации, время (такты), отсчитываемое на отправку/прием блоков информации в приемнике и передатчике не сильно отличалось друг от друга.

Также используется особая длина пауз между блоками, связано это с тем, что из-за увеличивающегося расстояния, задержка может составлять на дальности в 15 км до 300 мкс, вдобавок использование задержек применяется для настройки внутренней фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), для избежания рассинхронизации работы между передачей блоков.

В соответствии с представленной на рисунке 13 структурной схемой приемопередатчика, рассмотрим вопрос выбора элементной базы. Начнем с чипа приемо-передатчика.

Среди множества схожих чипов необходим такой, где можно было бы настроить как можно больше параметров. В таблице 3 приведено сравнение параметров чипов разных производителей.

Таблица 3. Сравнение характеристик различных приемопередатчиков.

Чип	Технология	Чувствительность Rx	Мощность Tx	Модуляция	Регулировка регистров настроек
SX1262	LoRa	-148 dBm	+22 dBm	LoRa, FSK	очень высокая
SX1276	LoRa	-137 dBm	+20 dBm	LoRa, FSK	высокая
Si4463	FSK	-126 dBm	+20 dBm	FSK/GFSK	высокая
CC1310	FSK	-124 dBm	+14 dBm	FSK/GFSK	высокая
CC1201	FSK	-120 dBm	+16 dBm	FSK/GFSK	средняя
CC1101	FSK	-116 dBm	+12 dBm	FSK/GFSK	средняя

Исходя из данных, собранных от производителей, лучше всего для сборки оборудования экспериментальной линии связи подходят чипы SX1262/SX1276. У них не только высокая чувствительность и усиление на выходе передатчика, но еще и открыты достаточно нужные регистры настроек, такие как:

1. Выбор режима (Sleep / Ожидание / TX / RX / LoRa / FSK),
2. Установка рабочей частоты (137-1020 МГц),
3. Регулировка усилителя мощности,
4. Длина преамбулы,
5. Текущий RSSI и проч.

Но это еще не все, у чипов SX1262/SX1276, открыты регистры множества настроек, которых нет у аналогов приемопередатчиков:

1. Скорость кодирования (4/5–4/8),
2. Полоса пропускания (7,8–500 кГц),
3. Оптимизация детектора,
4. Порог обнаружения символа,
5. Оптимизация при низкой скорости передачи данных,
6. Выбор коэффициента расширения (sf6-sf12)
7. Отношение сигнал/шум принятого пакета.

Это дает ощутимые преимущества при кодировании, особенно такие настройки как скорость кодирования, где можно установить величину избыточности и полосу пропускания, и можно регулировать ширину спектра частот вокруг центральной частоты. Необходимо отметить, что у модуля SX1262F30, показанном на Рис.16, установлены внутренние и внешние передающие усилители мощности, что дает на выходе чипа мощность до 22 dBm, а на выходе модуля мощность до 33 dBm.

Также у модуля есть внутренний малошумящий усилитель и внешний, что обеспечивает чувствительность входного сигнала до -148 dBm. Поэтому вопрос по выбору чипа приемопередатчика считается закрытым.



Рис.16. Внешний вид модуля приемопередатчика SX1262F30.

В таблице 4 приведены данные из описания модуля SX1262F30-868 об изменении характеристик линии связи от выбора ширины полосы пропускания.

Таблица 4. Влияние изменения величины полосы пропускания на характеристики линии связи.

Полоса пропускания	Особенности
Узкая (7.8–31 кГц)	Высокая чувствительность, большая дальность
Средняя (62–125 кГц)	Баланс дальности и скорости
Широкая (250–500 кГц)	Высокая скорость передачи

Полоса пропускания рассчитывается по формуле:

$$F_{\text{пс}} = f_{\text{max}} - f_{\text{min}}, \quad (3.1)$$

где $F_{\text{пс}}$ - частота пропускной способности, f_{max} - верхняя частота сигнала, f_{min} - нижняя частота сигнала.

Символьная скорость R определяется по следующему выражению

$$R = \frac{F_{\text{пс}}}{2^{sf}}, \quad (3.2)$$

где sf - коэффициент расширения символа.

Коэффициент расширения sf , так называемые «чирпы», показывает, с какой длительностью происходит линейный переход между соседними частотами модуляции Long Range (LoRa) (Рис.17).

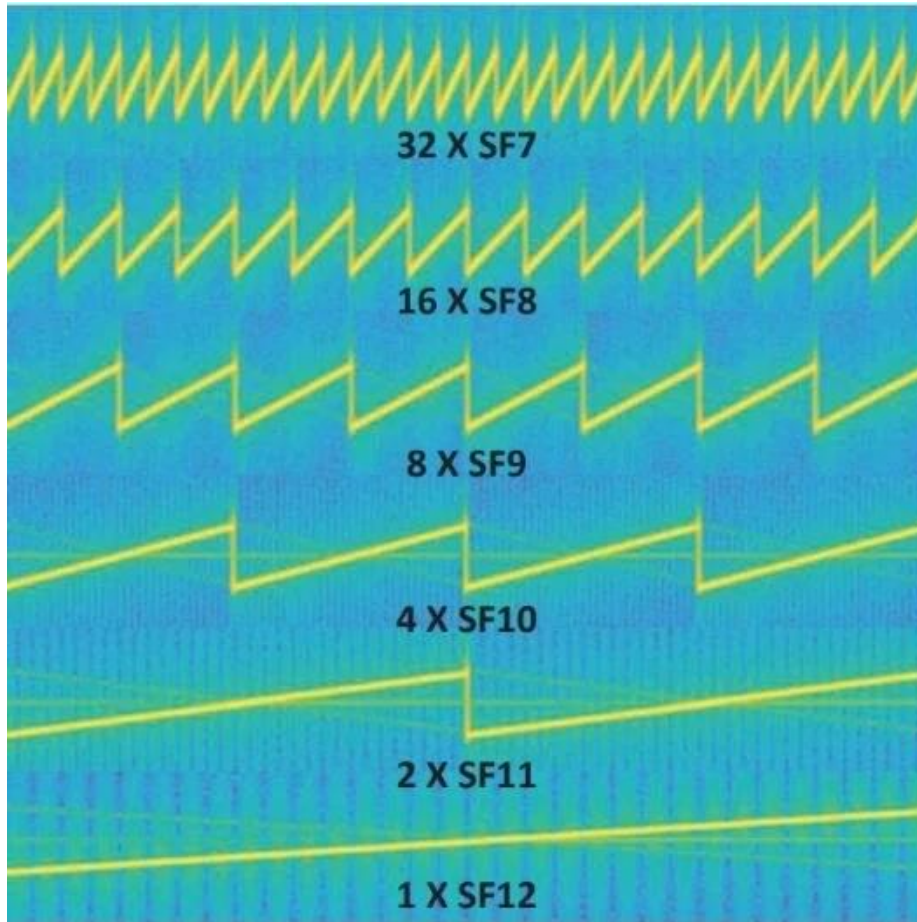


Рис.17. Расширение спектра с помощью sf -фактора.

Расширение фактора sf позволяет «растянуть» символ по спектру что положительно влияет на распознавание и помехозащищенность информации на стороне приемных модулей. Фактор sf позволяет увеличить количество бит, закодированных в одном символе, для выбора доступны значения $sf = 6...12$, что значит от 0 до 64...4096 возможных значений символов:

$$M = 2^{sf}, \quad (3.3)$$

где M -число возможных значений символов.

При увеличении sf возрастает длительность передачи одного символа из-за того, что увеличивается длина символа, при этом

снижается скорость передачи всей информации в секунду, но повышается чувствительность и дальность приема [103].

После того как был определен чип приёмопередатчика, перейдем к элементу, который будет формировать и обрабатывать информацию – это микроконтроллер.

Необходимость в микроконтроллере состоит в том, что необходим элемент, который будет управлять настройками чипа приёмопередатчика (здесь необходимо максимально возможная скорость общения с чипом ПП по шине SPI), возможность внешнего кодирования (использование кода PC и CRC), управление режимами чипа ПП, обработка информации с чипа ПП (RSSI, C/Ш).

Рассмотрим сравнение характеристик из описаний микроконтроллеров разных производителей в таблице 5.

Таблица 5. Сравнение характеристик различных микроконтроллеров.

Параметр	STM32F411	ATSAMD21	ESP32	NRF52840
Архитектура	Cortex-M4	Cortex-M0+	Xtensa	Cortex-M4
Частота	100 МГц	48 МГц	240 МГц	64 МГц
Flash	512 КБ	256 КБ	4МБ	1 МБ
RAM	128 КБ	32 КБ	520 КБ	256 КБ
количество шин данных на плате: SPI, I2C, UART	3,2,3 шт.	2,1,1 шт.	4,2,3 шт.	3,1,2 шт.

У ESP32 очень большой объем памяти, но есть существенный недостаток, из - за нахождения на плате Wi-Fi и Bluetooth, чип ПП будет ловить помехи, также имеется небольшая сложность с использованием библиотек (из-за их малого количества и ошибок) и среды программирования.

На основе собранных данных можно сделать вывод, что микроконтроллер STM32F411, внешний вид которого показан на Рис.18, подходит больше всего, так как на плате расположен высокочастотный процессор (100 МГц), достаточный объем памяти (512 кБ ПЗУ + 128 кБ ОЗУ, с возможностью установки дополнительного чипа до 8МБ), несколько шин данных SPI/UART/I²C, возможность включения DMA(прямой доступ к памяти) для ускорения обмена с модулем приемопередатчика ..

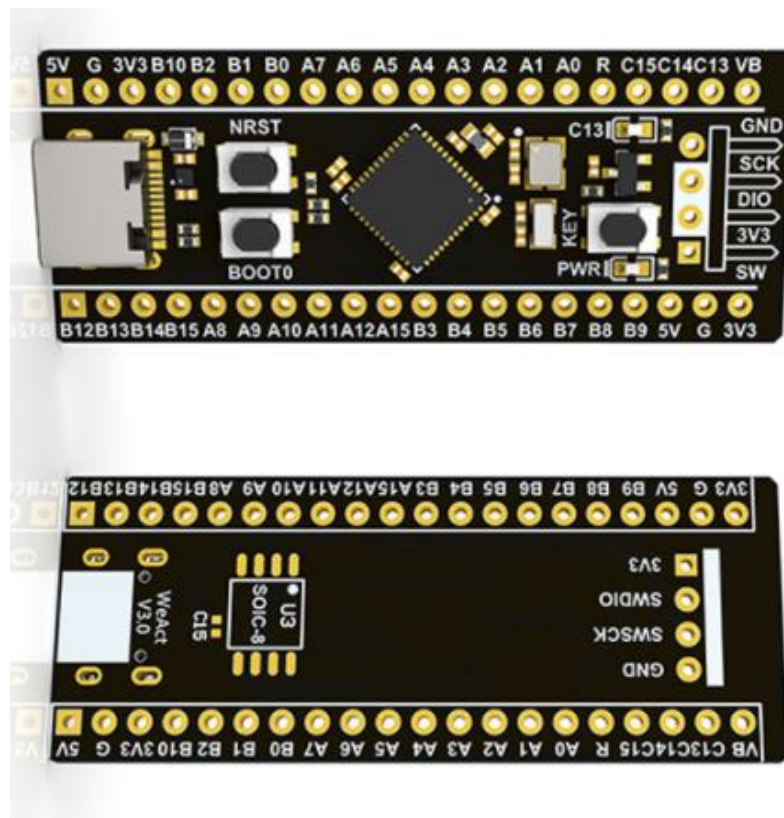


Рис.18. Внешний вид микроконтроллера STM32F411.

Стоит уделить внимание и антеннам, так как от их качества на удаленном расстоянии зависит очень многое. С помощью прибора «Векторный анализатор цепей NanoVNA-F V3» проверим волновое сопротивление и значение КСВ [104].

Для экспериментов возьмем антенны для LoRawan - устройств на частоту 868 МГц, которые показаны на Рис.19.

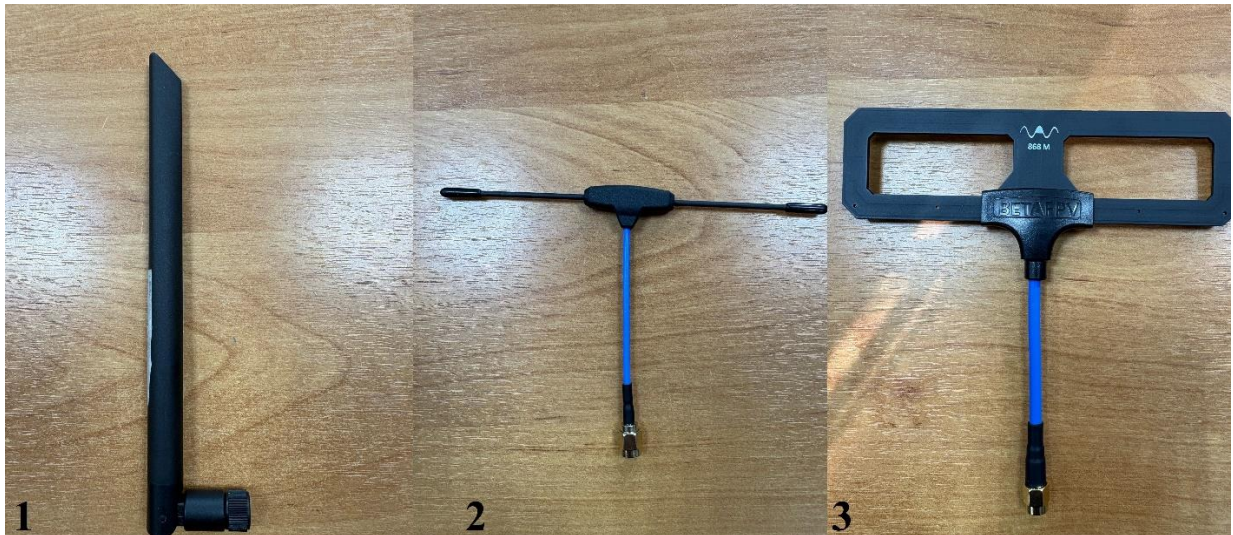


Рис.19. Внешний вид антенн на частоту 868 МГц.

где 1 - вертикальная антенна, 2 - дипольная антенна, 3 - Мохон антенна.

После проверки антенн прибором NanoVNA, выяснилось, что коэффициент стоячей волны (КСВ) лучше всего в диапазоне от 750-950 МГц у антенны Мохон. Для экспериментов будут выбраны именно эти антенны, на рисунках 20-22, желтой линией показан КСВ, зеленой линией входной импеданс антенны.

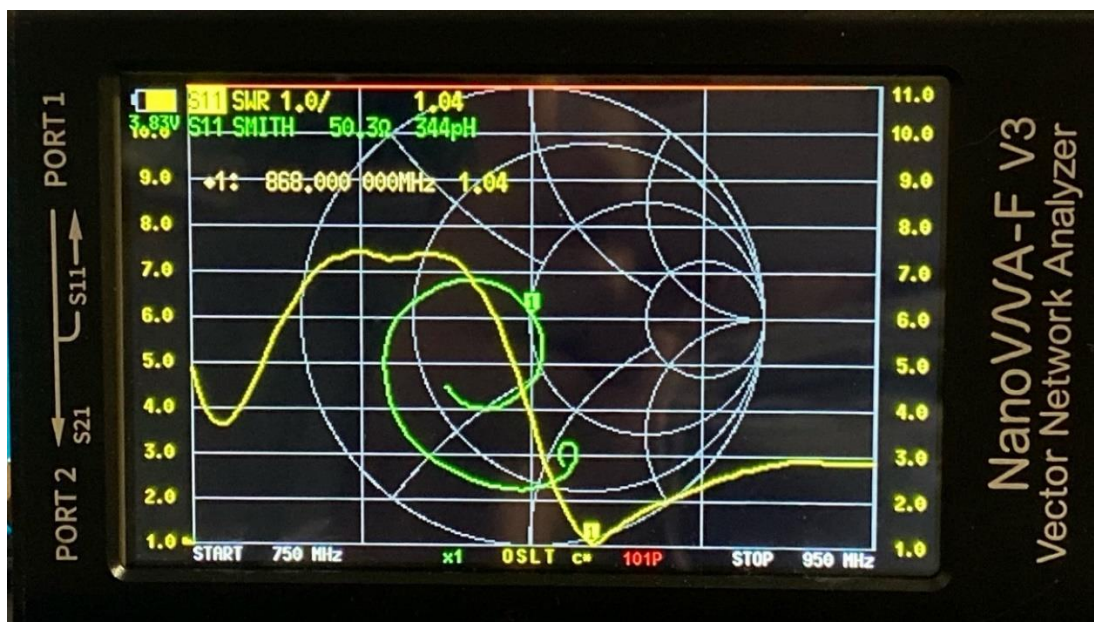


Рис.20. Показания волнового сопротивления и КСВ вертикальной антенны.

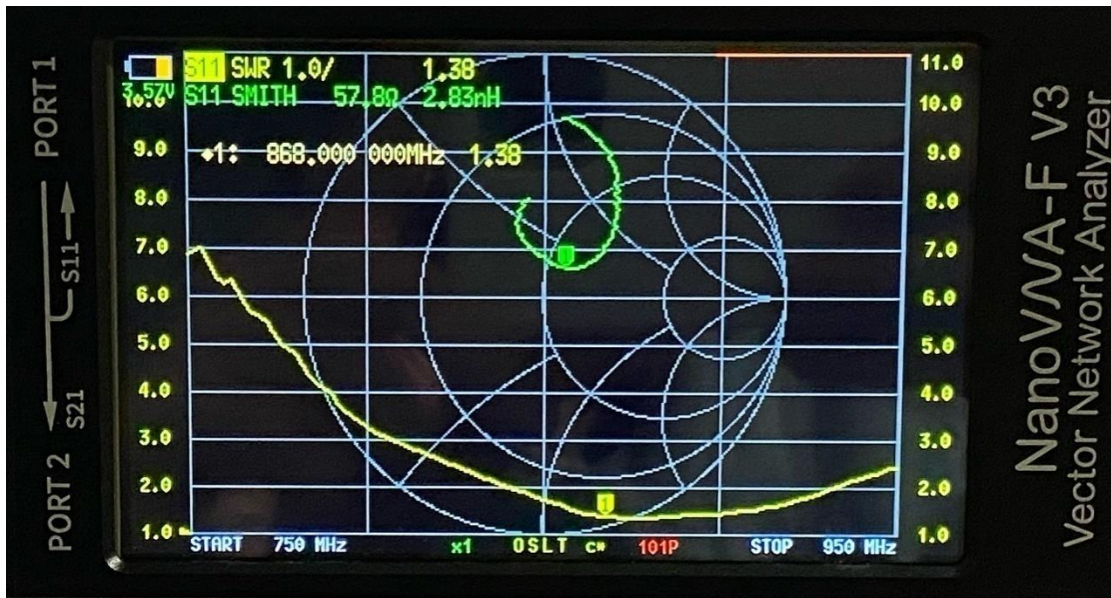


Рис.21. Показания волнового сопротивления и КСВ дипольной антенны.

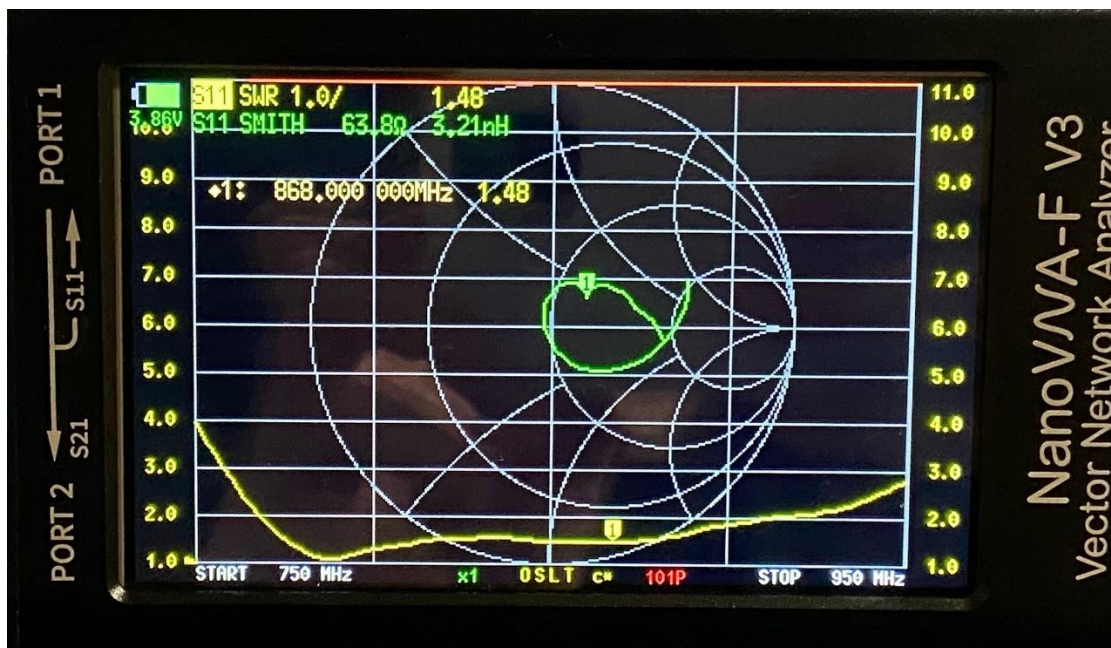


Рис.22. Показания волнового сопротивления и КСВ антенны Мохоп.

В таблице 6 показаны обработанные результаты показаний разных типов антенн со специального оборудования «Векторный анализатор цепей NanoVNA-F V3», приведенных на рис.20-22.

Таблица 6. Результаты показаний разных типов антенн.

Рисунок	Диапазон частот,	Волновое	Коэффициент
---------	------------------	----------	-------------

	МГц	сопротивление, Ом	стоячей волны
20	750-950	50	1-7
21		57	1.4-7
22		63	1-4

Так как модуля SX1262F30 хватает без дополнительных усилителей, потому что с учетом внутреннего и внешнего усилителя, чувствительность приемного чипа составляет -148 dBm, схема на рисунке 14 претерпит изменения, как показано на Рис.23.

Полудуплексный канал радиосвязи

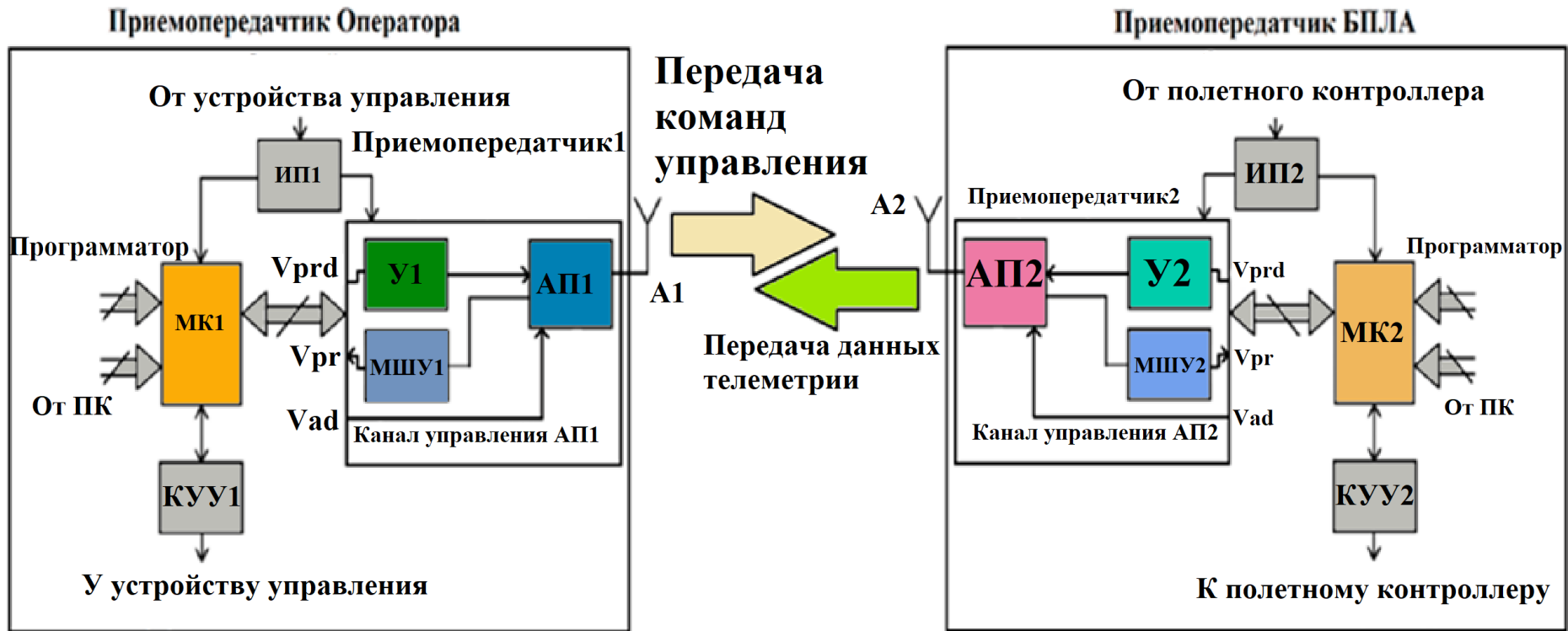


Рис. 23. Функциональная схема комплекса системы полудуплексного радиоканала связи, после выбора элементной базы.

где V_{prd} - передающий сигнал, V_{pr} - приемный сигнал, V_{ad} - сигнал управления антенным переключателем.

Различия между рисунками 14 и 23 заключаются в том, что раньше на схеме были указаны блоки - приемопередатчика, усилителя, антенного переключателя по отдельности.

С учетом достоинств модуля SX1262F30 установка блоков усилителя и антенного переключателя не требуется, они уже есть на плате модуля и управляются с помощью микроконтроллера STM32F411.

3.3. Разработка оборудования экспериментальной линии радиосвязи

Для того чтобы проверить теоретические положения, вынесенные ранее и экспериментально оценить технические характеристики выбранной элементной базы, был реализован комплекс системы радиоканала связи.

Были реализованы приемопередающие модули как Оператора, так и БПЛА. Основными задачами являются проверка корректной работы модулей ПП Оператора и БПЛА, и исследование влияния внешних факторов на качество связи.

На рисунках 24 и 25 представлены трассировки плат приемопередатчика Оператора и БПЛА.

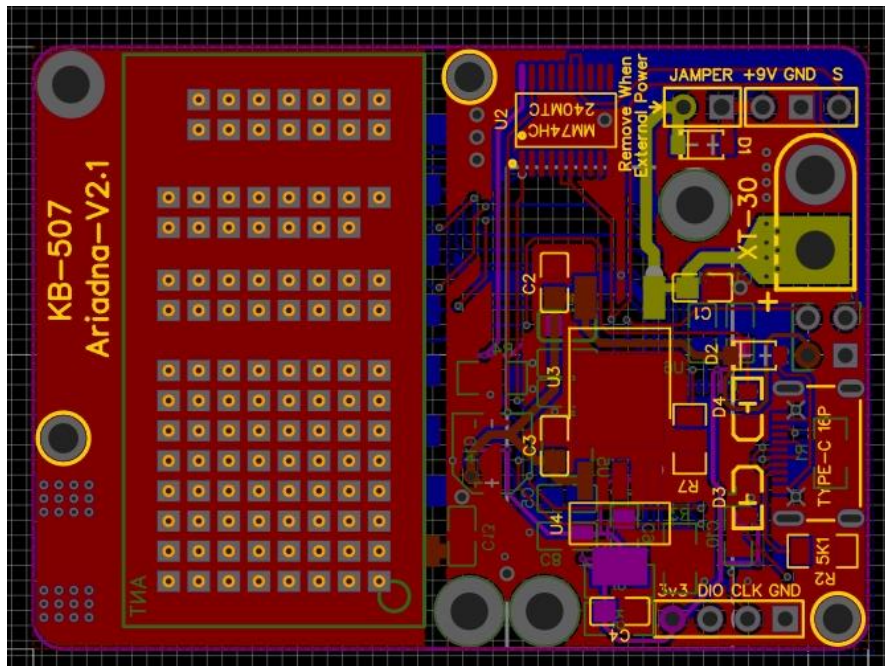


Рис. 24. Трассировка платы приемопередатчика Оператора.

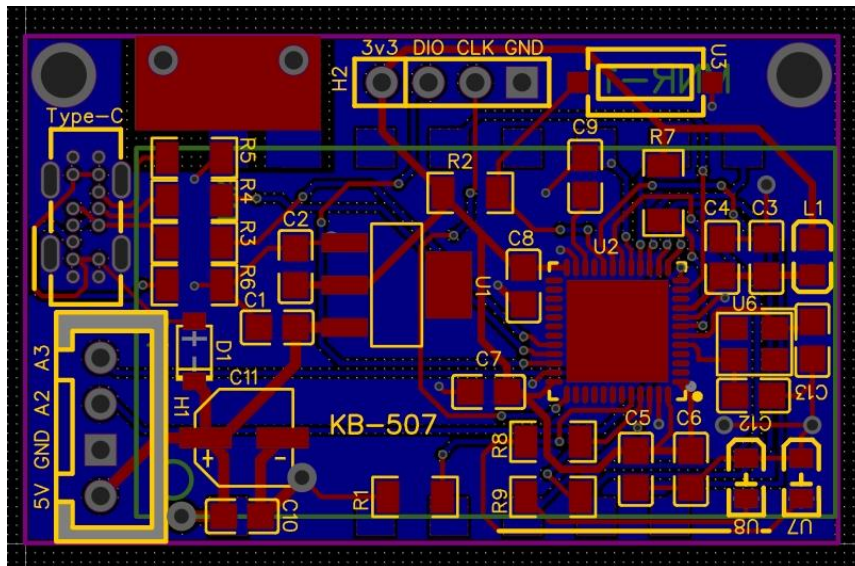


Рис. 25. Трассировка платы приемопередатчика БПЛА.

На плате приемопередатчика Оператора (Рис. 25) добавлена перфорация и дополнительный слой металлизации, для последующей установки радиатора.

Это необходимо так как ПП Оператора большую часть времени работает в режиме передачи и выделяет большое количество тепла, если не отводить это тепло приемопередатчик может выйти из строя. Приемопередатчик БПЛА работает большую часть в режиме приема и не требует пассивного охлаждения.

На рисунках 26 и 27 представлена 3Д визуализация плат ПП Оператора и БПЛА, а на рисунках 28 и 29 представлен внешний вид изготовленных плат.

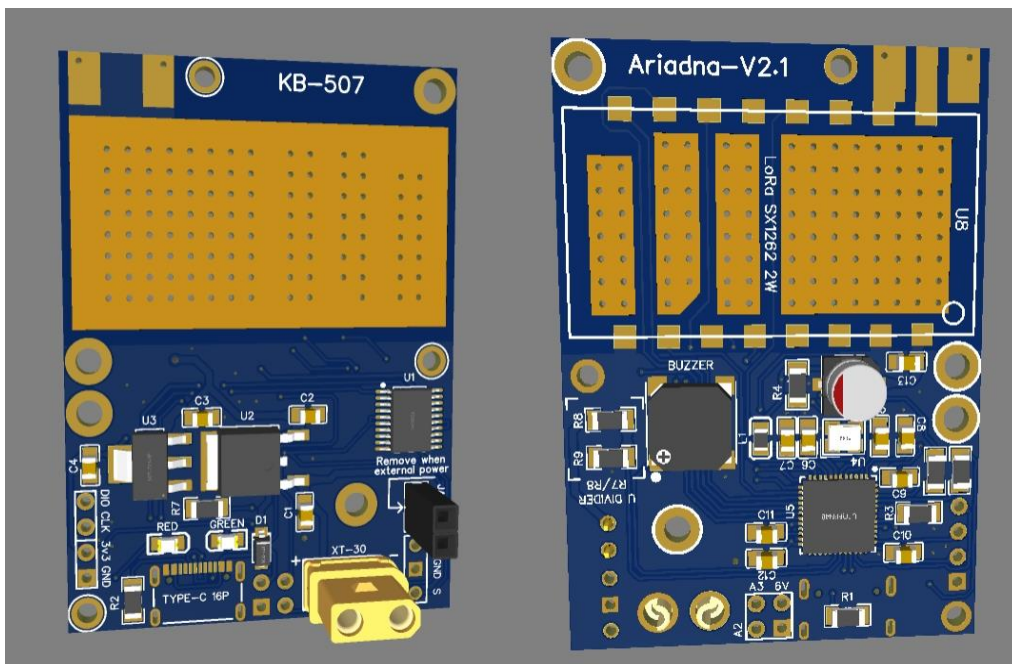


Рис. 26. 3Д визуализация платы приемопередатчика Оператора.

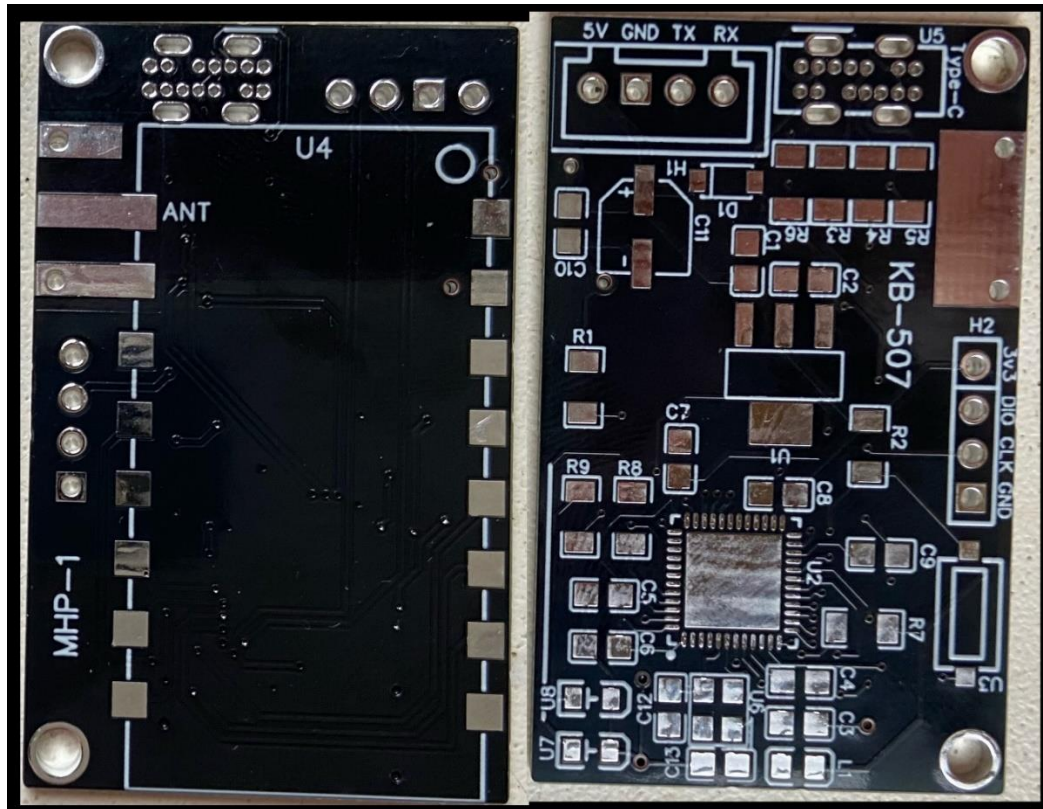


Рис. 29. Внешний вид изготовленной платы приемопередатчика БПЛА.

На рисунках 30 и 31 представлен внешний вид плат ПП после сборки модулей.

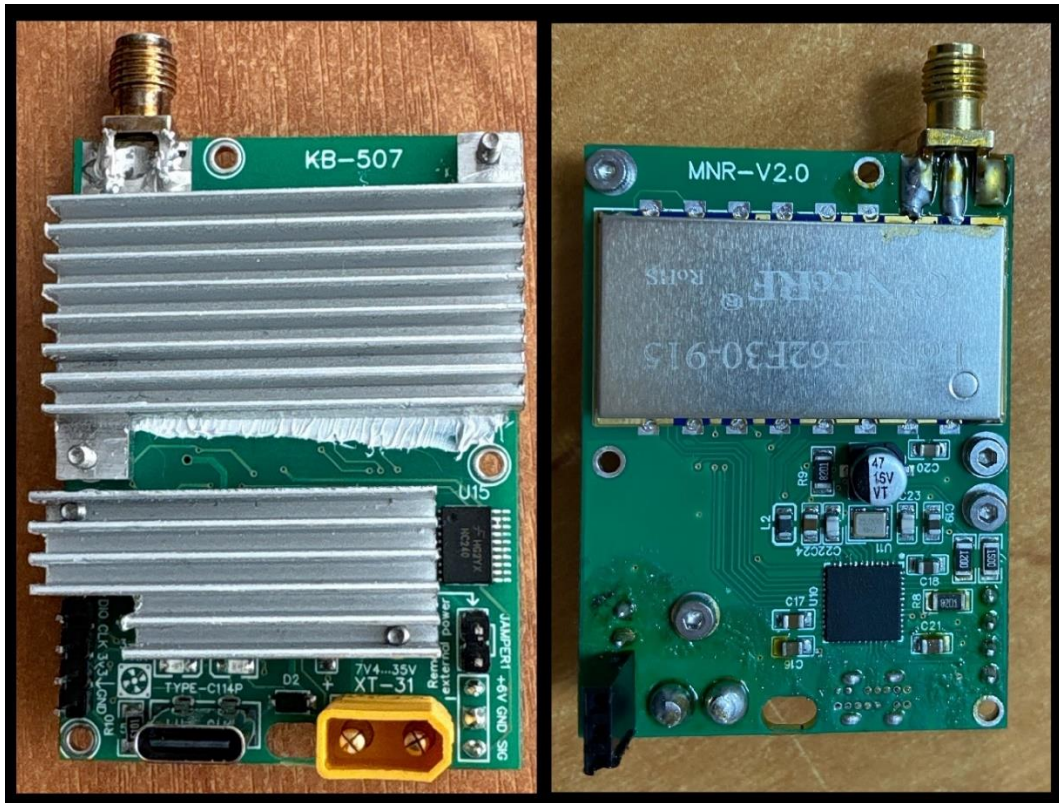


Рис. 30. Внешний вид платы ПП Оператора после сборки.

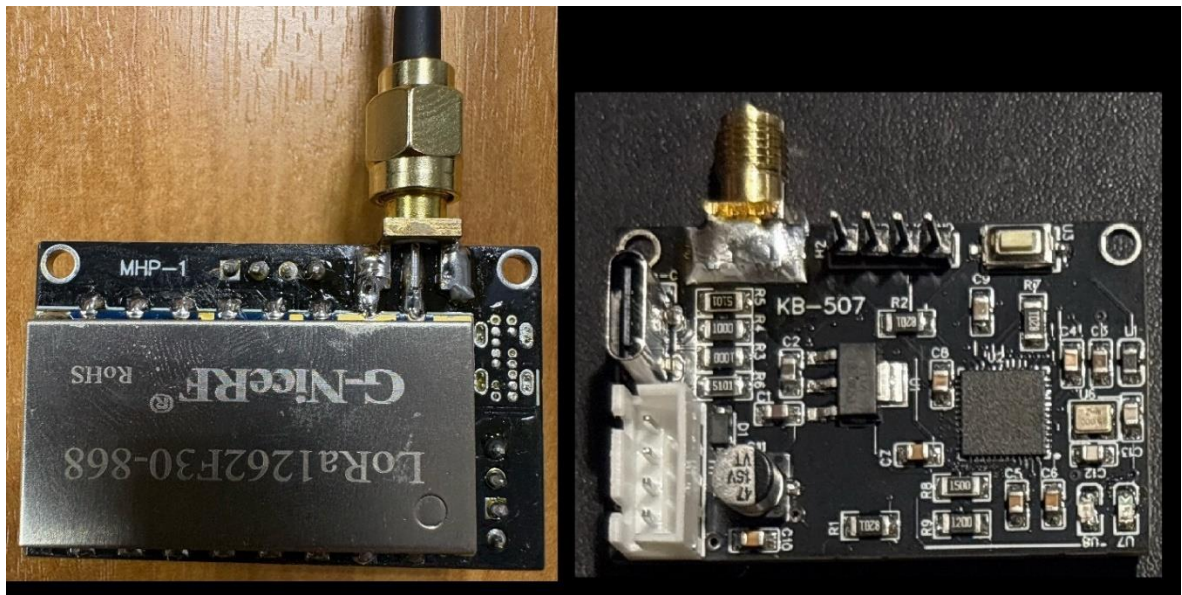


Рис. 31. Внешний вид платы ПП БПЛА после сборки.

Разработанные модули приемопередатчиков Оператора и БПЛА были использованы при построении экспериментального комплекса системы радиоканала связи. Данный комплекс позволил провести серию натурных экспериментов направленных на исследование параметров канала связи.

Экспериментальный комплекс системы радиоканала связи включает в себя приемопередающие модули Оператора и БПЛА, антенны на диапазон частот 750-950 МГц, вспомогательное измерительное оборудование.

Перечень состава модулей ПП приведен в таблице 7.

Таблица 7. Содержание экспериментов.

№ п/п	Наименование	Тип
1	Приемопередатчик	LoRa SX1262F30-868
2	Чип микроконтроллера	STM32F411CEU6
3	Антенна	Мохон-868
4	Дисплей	GSMIN OLED 0.96"

		128x64, SPI
5	Пульт управления	RadioMaster TX12 МКII

Объем содержания экспериментов приведен в таблице 8.

Таблица 8. Содержание экспериментов.

№ п/п	Содержание экспериментов
1	Проверка разработанного программного обеспечения модулей.
2	Проверка синхронизации между модулями ПП Оператора и БПЛА.
3	Проверка формирования данных телеметрии на стороне Оператора, о качестве канала связи и достоверности принятой информации на различных расстояниях между модулями ПП Оператора и БПЛА.
4	Проверка формирования значений C/Ш и RSSI при разной мощности работы на стороне ПП Оператора, на различных расстояниях между модулями.

Натурные эксперименты проводились на различных расстояниях (1000, 5000, 15000 м) между модулями приемопередатчиков Оператора и БПЛА. Это позволит построить зависимость качества канала связи от дальности. Эксперименты проводились при различных типах подстилающей поверхности и при нормальных климатических условиях:

- температура окружающего воздуха от 5 до 40 °С;
- относительная влажность воздуха от 45 до 80 %;
- атмосферное давление от 86 до 106 кПа (от 645 до 795 мм рт. ст.).

3.4. Методика проведения экспериментальных исследований.

Методика экспериментов состоит в следующем:

1. Проверка работоспособности программного обеспечения, модуля ПП Оператора и модуля ПП БПЛА.
2. Проверка процесса синхронизации между ПП модулями Оператора и БПЛА.
3. Проверка вывода данных о величине С/Ш, качестве канала, мощности излучаемого и принимаемого сигнала на стороне ПП Оператора непосредственно вблизи ПП БПЛА.
4. Проверка вывода данных о величине С/Ш, качестве канала, мощности излучаемого и принимаемого сигнала на стороне ПП Оператора, при разной мощности работы модуля Оператора, на различных расстояниях между модулями.

Для испытаний модули ПП Оператора и БПЛА сначала размещаются рядом друг с другом. После включения модулей происходит процесс синхронизации, выставляется режим самой малой мощности (1 dbm) и далее модуль ПП БПЛА остается на месте, а модуль ПП Оператора удаляется на расстояние до 1000, 5000, 15000 м, как показано на рисунке 32. Когда модуль ПП Оператора достигает заданного расстояния, фиксируются показания о С/Ш, качестве канала, мощности излучаемого и принимаемого сигнала.

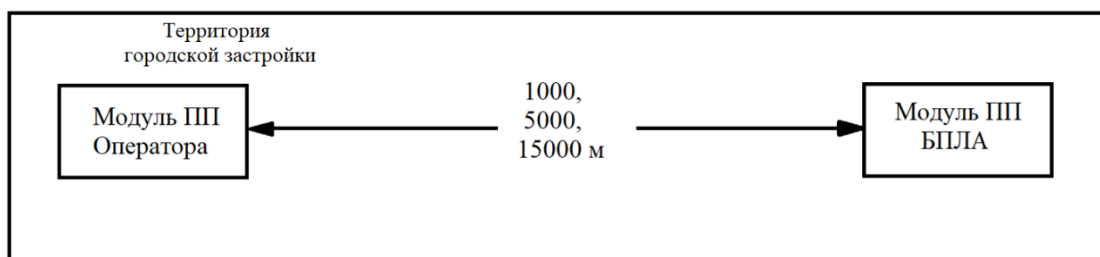


Рис. 32. Размещение модулей ПП Оператора и БПЛА.

Следом на модуле ПП Оператора вручную включаются несколько режимов с уменьшением по мощности, при фиксации показаний на пульте.

В экспериментах внимание было уделено следующим показателям:

TPWR (Transmitter Power) - Текущая мощность излучения передатчика в мВт.

RSSI (Received Signal Strength Indicator) - Мощность принимаемого сигнала в dBm. И здесь важно обратить внимание, что есть два понятия RSSI, это RSSI Background – действующее значение принимаемой мощности сигнала в конкретный момент времени. И RSSI Current – общая мощность принимаемого сигнала + С/Ш в эфире. В натуральных экспериментах далее учитываться будет только RSSI Background.

RQly (Receiver Link Quality) - Качество связи на стороне приемника (на дроне). Показывает процент успешно полученных пакетов данных.

RSNR (Receiver Signal-to-Noise Ratio) - Отношение сигнал/шум на стороне приемника. Положительное значение означает, что сигнал значительно сильнее шума.

Также внимание было уделено показаниям обратного канала телеметрии:

TQly (Transmitter Link Quality) - Качество связи телеметрии на стороне пульта. Показывает, насколько хорошо пульт слышит «ответы» от дрона.

TRSS (Transmitter Received Signal Strength) - Мощность сигнала телеметрии, который пульт получает от приемника. Здесь, как и в случае RSSI, тоже есть два показателя принимаемой мощности телеметрии. Это Background и Current показатели, в натуральных экспериментах во внимание принималось значение TRRS Current.

TSNR (Transmitter Signal-to-Noise Ratio) - Отношение сигнал/шум на стороне передатчика (пульта).

Префикс R (Receiver) - данные о том, как дрон слышит команды управления с пульта.

Префикс T (Transmitter) - данные о том, как пульт слышит данные телеметрии с дрона.

В эксперименте, запланированном на расстоянии до 1000м удалось добиться расстояния в 700м (Рис. 33). Добиться большего расстояния не позволяли препятствия на линии сигнала. В этом эксперименте была важна прямая видимость между ПП, для фиксации показателей с минимальными потерями, отражениями и искажениями сигнала. Данные по испытаниям представлены в таблице 7 и 8.

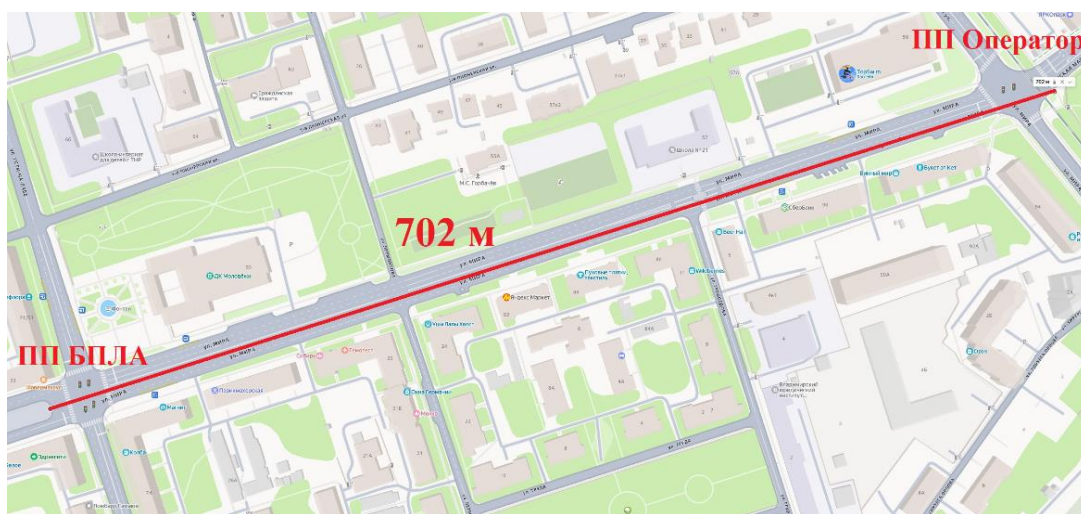


Рис. 33. Картограмма расположения ПП Оператора и БПЛА, на расстоянии 700м.

Для оценки условий качества приема-передачи построен профиль рельефа местности (Рис.34) между расположением двух приемопередатчиков [105]. Анализ профиля высот показывает плавное понижение рельефа со 120 до 103 метров над уровнем моря, что подтверждает отсутствие естественных преград и выполнение условий прямой видимости на данной линии.



Рис. 34. Профиль рельефа местности на линии связи, демонстрирующий прямую видимость между приемопередатчиками.

В эксперименте, запланированном на 5000м удалось добиться расстояния в 6.7 км (Рис. 35). На таком расстоянии, с мощностью ПП Оператора в 1 мВт, поддерживать связь уже невозможно, поэтому выбраны режимы в 1000 и 2000 мВт. Данные по испытаниям представлены в таблице 9 и 10.

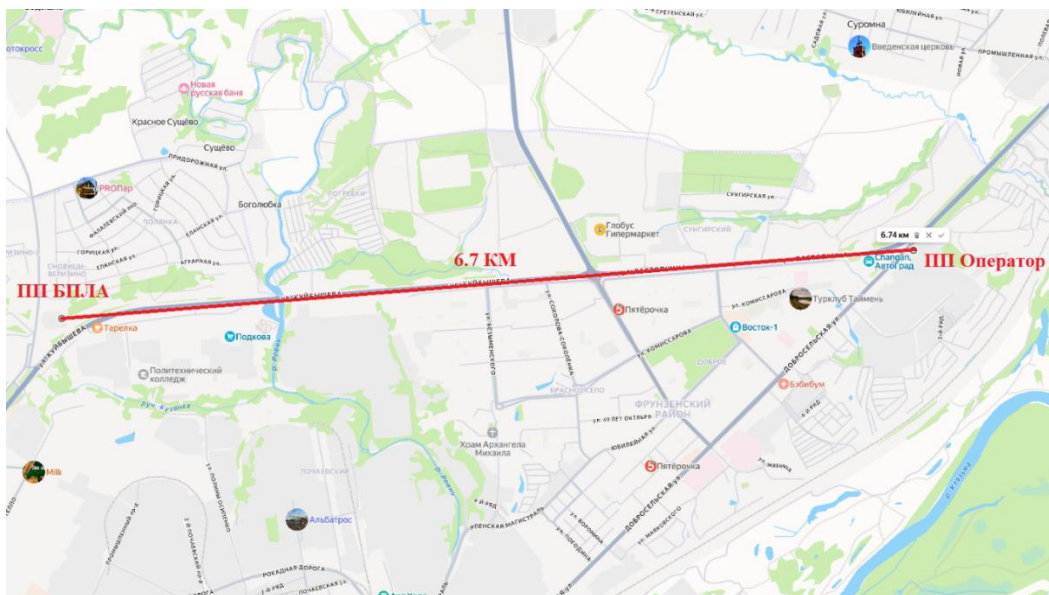


Рис. 35. Картограмма расположения ПП Оператора и БПЛА, на расстоянии 6.7км.

Для оценки условий качества приема-передачи построен профиль рельефа местности (Рис.36) между расположением двух приемопередатчиков [105]. Анализ профиля высот показывает наличие значительного углубления рельефа между расположением двух приемопередатчиков, которое благополучно сказалось на качестве линии связи.



Рис. 36. Профиль рельефа местности на линии связи, демонстрирующий прямую видимость между приемопередатчиками.

В эксперименте, запланированном на расстоянии до 15000м удалось добиться расстояния в 14.7 км (Рис. 37). На таком расстоянии у ПП Оператора выбран режим с мощностью передачи в 2000 мВт. Данные по испытаниям представлены в таблице 11 и 12.

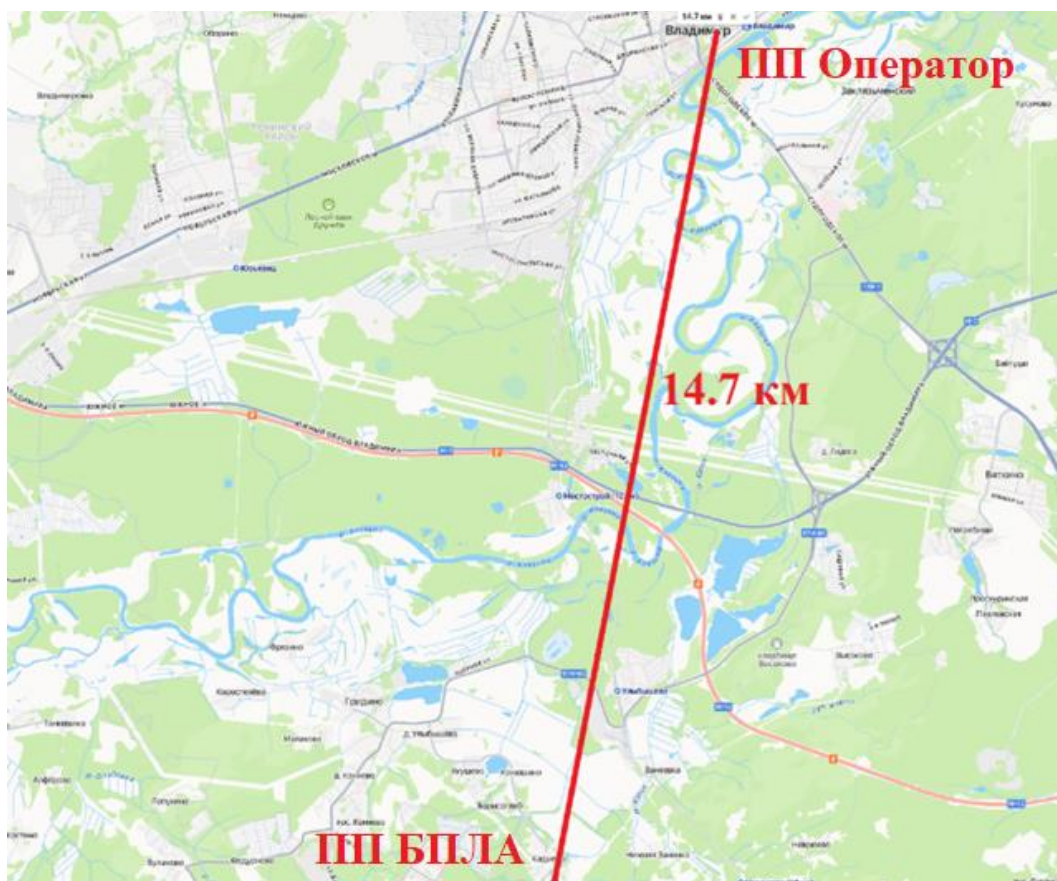


Рис. 37. Картограмма расположения III Оператора и БПЛА, на расстоянии 14.7км.

Для оценки условий качества приема-передачи построен профиль рельефа местности (Рис.38) между расположением двух приемопередатчиков [105]. Несмотря на значительную протяженность линии связи, анализ профиля высот показывает, приемопередатчики находятся на одинаковых высотах (138-139м), над пониженной центральной частью рельефа.

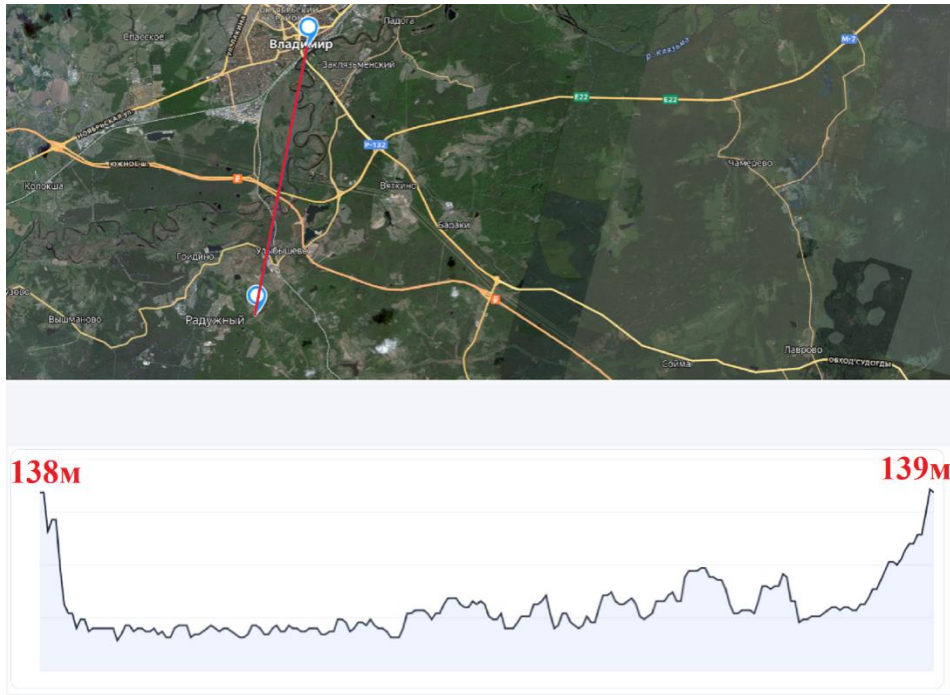


Рис. 38. Профиль рельефа местности на линии связи, демонстрирующий прямую видимость между приемопередатчиками.

В таблицах 9 и 10 представлены результаты экспериментов на расстоянии 700 метров. Испытания проводились с 2 разными ПП модулями Оператора, при разной мощности передатчика (от 1 до 2000 мВт).

Таблица 9. Показания с ПП модуля Оператора на расстоянии 700м.

Номер приемопередающего модуля Оператора	TPWR, мВт	RSSI, dBm	RQly, %	RSNR, dB
Модуль1	2000	-70...-67	98...100	12
	1000	-94...-71	79...100	-2...12
	1	-96...-92	24...35	-7...-4
Модуль2	2000	-72...-71	96...99	11
	100	-86	97...99	6...7
	10	-93...-92	87...88	0
	1	-96...-95	38...55	-6

Данные по обратному каналу телеметрии представлены в таблице 10.

Таблица 10. Показания с ПП модуля Оператора по обратному каналу телеметрии.

Показания по обратному каналу телеметрии	TRSS, dBm	TQly, %	TSNR, dB
Модуль1	-82...-76	100	12
Модуль2	-80...-72	97...100	10...13

В таблицах 11 и 12 представлены результаты экспериментов на расстоянии 6.7 километров. Испытания проводились с разной мощностью передатчика ПП модуля Оператора (от 1000 до 2000 мВт).

Таблица 11. Показания с ПП модуля Оператора на расстоянии 6.7км.

TPWR, мВт	RSSI, dBm	RQly, %	RSNR, dB
2000	-88...-85	89...95	11
1000	-92...-88	60...81	10

Данные по обратному каналу телеметрии представлены в таблице 12.

Таблица 12. Показания с ПП модуля Оператора по обратному каналу телеметрии.

TRSS, dBm	TQly, %	TSNR, dB
-87...-82	79	12

В таблицах 13 и 14 представлены результаты экспериментов на расстоянии 14.7 километров. Испытания проводились с мощностью передатчика ПП модуля Оператора в 2000 мВт.

Таблица 13. Показания с ПП модуля Оператора на расстоянии 14.7км.

TPWR, мВт	RSSI, dBm	RQly, %	RSNR, dB
2000	-89...-80	70...92	9...11

Данные по обратному каналу телеметрии представлены в таблице 14.

Таблица 14. Показания с ПП модуля Оператора по обратному каналу телеметрии.

TRSS, dBm	TQly, %	TSNR, dB
-86...-78	85	11

Результаты испытаний можно резюмировать следующим:

На расстоянии до 1000 метров канал связи поддерживается в режиме передачи сигнала в 1 мВт с качеством канала до 55%. Это означает, что даже половина принятых блоков дает возможность управлять ПП БПЛА.

На расстоянии до 5000 метров канал связи поддерживается в режиме передачи сигнала в 1000 мВт с качеством канала до 82%. Так как на расстоянии до 1 км и RSSI до -96 dBm, передатчик с мощностью в 1 мВт показывал качество канала в диапазоне от 38 до 55%, а это означает, что можно увеличить расстояние до 2-2.5 раза.

На расстоянии до 15000 метров канал связи поддерживается в режиме передачи сигнала в 2000 мВт с качеством канала до 92 %. Это означает, что можно увеличить расстояние в 1.5-2 раза с качеством канала до 33%.

3.5. Вычислительные затраты при адаптивном кодировании цифровых сообщений в локальных сетях телеметрии и управления

Важно рассмотреть вопрос влияния вычислительной сложности системы связи. В современном мире из-за сильной зашумленности или скрытности передачи данных, применяются методы кодирования и декодирования, реализуемые на основе сложных алгоритмов.

В кодировании для систем сотовой связи 3G, 4G (LTE), 5G применяются связки нескольких сложных алгоритмов, например:

-Турбо кодирование, использует параллельное каскадное соединение сверточных кодов, что само по себе не использует большие ресурсы, а вот для декодирования используется итеративный процесс. Где два декодера обмениваются, на стадии разработки, мягкими решениями декодирования.

Как раз из-за вычисления вероятности каждого бита всей последовательности и потребляется большое количество вычислительного ресурса. Расчёты вычислительной сложности были рассмотрены в работе двух французских профессоров электротехники Алена Главье и Клода Берру [106].

Частный случай кодов LT, фонтанные коды, где используются внешние и внутренние коды. Фонтанные коды применяются в условиях сложной помеховой обстановки или при потере пакетов информации.

Вычислительные затраты состоят в том, что для декодирования требуется большая процессорная мощность, использование большого количества памяти для буферизации. И так как таким кодам необходимо «поймать» свой конкретный блок из потока бесконечно передаваемой избыточности, часто декодирование занимает большое количество времени, пока конкретный блок не будет принят [107].

Это означает что рассматривать процессы кодирования и декодирования стоит от двух параметров - это процессорные затраты (количество операций в секунду) и время занимаемое на исследование синдромов.

Для кодирования это вычисление количества операций:

$$K_o = n * (n - k), \quad (3.4)$$

где n -длина блока, k -полезные данные.

И времени, которое займет процесс всего кодирования:

$$T_{kod} = (n * (n - k)) * t1, \quad (3.5)$$

где $t1$ - время одной операции в поле Галуа.

А для декодирования процессы исследования информации займут сумму нескольких последовательностей (вычисление синдромов, поиск многочлена ошибок, поиск корней, исправление):

$$T_{dec} = (Ks + Ke + Kk + Ki) * t1, \quad (3.6)$$

где $Ks=n*(n-k)$ - исследование синдромов на ошибки,

$Ke=(n-k)^2$ - определение многочлена ошибок,

$Kk= n*(n-k)$ - поиск корней, конкретного местоположения ошибки,

$Ki=n-k$ - исправление поврежденной информации.

Рассмотрим процесс принятия пакета его декодирование и запись в микроконтроллер для дальнейшей обработки.

Общее время принятия всего пакета данных складывается из двух этапов: времени приема и времени программной обработки микроконтроллером. Время приема сильно зависит от параметров модуляции:

Для примера возьмем полосу пропускания (500 кГц) и коэффициент расширения спектра ($sf=7$). Один пакет может состоять из 255 байт максимум (из за ограничения LoRa), установленная скорость передачи 52 блока/с по 12 байт каждый = 624 байта. Каждый блок состоит из преамбулы, синхросимвола, заголовка, полезной нагрузки, CRC или помехоустойчивого кода. Время приема каждого бита занимает от 3-300 мкс (в зависимости от расстояния от 150м до 15км). Получается, что принятие каждого блока занимает от 20 до 28 мс.

Декодирование внутреннего кода loRa выполняется самим радиомодулем "на лету" во время приема. На это уходят микросекунды, которые уже включены во время приема. Чип отдает микроконтроллеру уже исправленные данные. Процессор микроконтроллера декодирует код Рида-Соломона. Для блока 12 байт, с частотой процессора

микроконтроллера в 100 МГц, декодирование займет 0.15 мс. Что укладывается во время приема (Рис. 39).

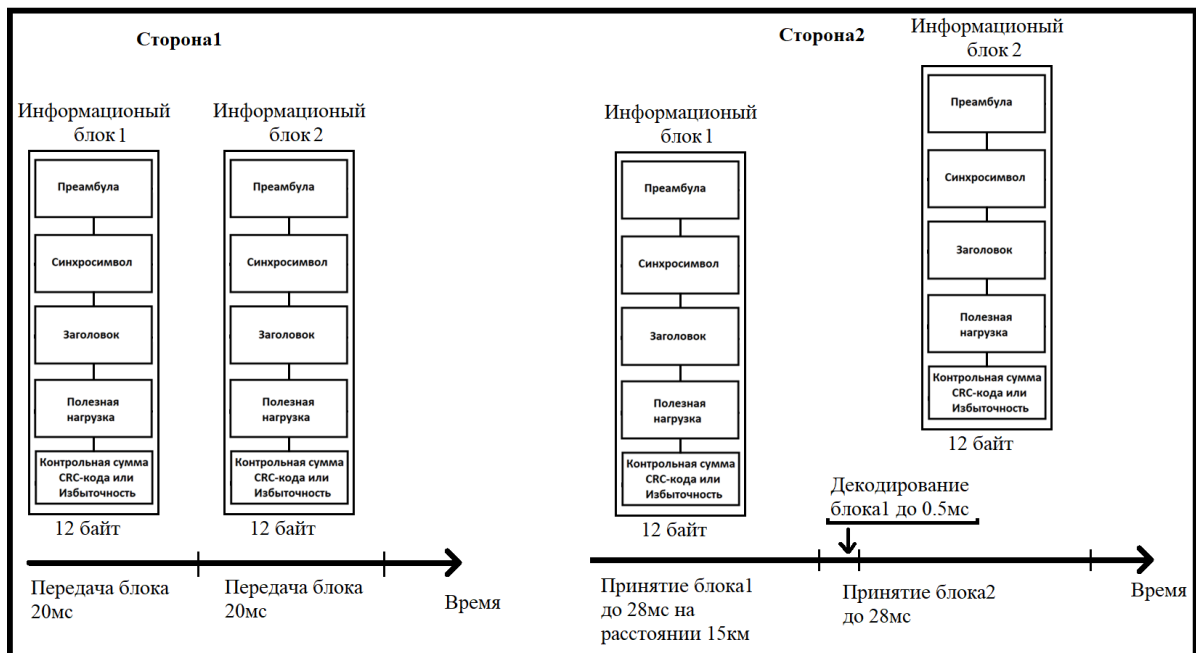


Рис. 39. Временная диаграмма передачи и приёма информационных блоков с учётом задержек декодирования.

Передача 52 блоков в секунду означает, что блок передается до 20 мс, прием блока займет до 28 мс, с учетом максимального расстояния. Настройки кодирования никак не повлияют негативно на систему связи с точки зрения времени. Но если посмотреть с другого угла и увеличить количество всей информации в блоке, то процесс декодирования заметно нагрузит процессор, что увеличит потребление мощности и выделение тепла.

Важно понимать, какую информацию мы добавляем. При установленной длине блока в 12 байт, мы можем варьировать либо полезной нагрузкой, либо же избыточностью уменьшая что то из двух.

Если это полезная нагрузка, то процесс декодирования для всех последовательностей займет следующее количество времени:

$$T_{dec} = \left((n - (k + x_{pn})) \right) * (3n - (k + x_{pn}) + 1) * t_1, \quad (3.7)$$

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

Длина блока остается такой же, а время декодирования станет меньше. Но если мы добавим избыточную информацию, то время декодирования станет больше:

$$T_{dec} = ((n + x_{in}) - k) * (3 * (n + x_{in}) - k + 1) * t1, \quad (3.8)$$

где x_{in} - количество добавочных бит избыточности.

При $n=12$ байт, $k=8$ байт, $t1=20$ нс (частота процессора 100 МГц), время на декодирование займет 144 мкс. Теперь добавим 1 байт полезной нагрузки, тогда время на декодирование займет 104 мкс (тк длина блока остается прежней, а избыточность меньше), что быстрее, чем блок при стандартных установках на 27.7%. Но если мы добавим 1 байт избыточности, время на декодирование займет 199 мкс, что дольше, чем блок при стандартных настройках на 38.3%.

Даже с учетом, что выигрыш по времени декодирования, в случае уменьшения избыточности, меньше нагружает процессор микроконтроллера, мы теряем степень защиты помехоустойчивого кода. Важен баланс ведь абсолютный выигрыш по времени не дает выигрыша по помехозащищенности.

С другой стороны, можно выиграть в экономической составляющей, за счет выигрыша по декодированию, используя более простой и дешевый процессор микроконтроллера. Так как длина блока в тестировании вычислительной нагрузки была 12 байт, для этого размера предлагается оптимум, в степени защищенности помехоустойчивого кода и степени нагруженности ядра процессора микроконтроллера, который заключается в использовании 8 байт полезной информации и 4 байт избыточности.

3.6 Исследование разработанного метода адаптации системы связи при изменении длительности передаваемых символов

Как уже было сказано ранее, технология LoRa на рынке представлена в виде линейки чипов, например, таких как SX1262, SX1276, ... [108].

Технология позволяет достаточно гибко проектировать системы связи и управления, путем выбора ряда ключевых параметров, таких как коэффициента расширения спектра (SF), ширины полосы сигнала BW , кодовой скорости внутреннего помехоустойчивого кода V , длины преамбулы P и других. Чувствительность приемника при этом может достигать -140 дБм, а способность принимать сообщения поддерживается до значений соотношения сигнал/шум вплоть до -20 дБ.

Однако, столь высокие результаты достигаются при достаточно низких скоростях передачи информации. Учитывая, что многие реальные системы связи и управления вынуждены функционировать в сложной и изменяющейся помеховой обстановке, а также в условиях переменного уровня принимаемого сигнала (RSSI), в системах связи с технологией LoRa для заданной скорости передачи информации, качество принимаемого сигнала может меняться в широком диапазоне вплоть до обрыва связи.

Обрывы связи особенно негативно сказываются в системах, использующих псевдослучайную перестройку радиочастоты, поскольку необходимо заново инициировать алгоритмы синхронизации приемника и передатчика, что занимает длительное время и снижает функциональные возможности используемого оборудования [109].

Качество связи является одним из основных важных параметров, на который мы будем обращать внимание, под качеством принимаемого сигнала стоит понимать отношение принятых информационных блоков к общему количеству переданных блоков информации:

$$Q = \frac{M}{N}, \quad (3.9)$$

где M - количество принятых информационных блоков, N - количество переданных блоков информации.

Однако в некоторых системах связи, качество принимаемого сигнала можно трактовать как абсолютное число принятых блоков информации N за единицу времени. То есть, в некоторых системах связи достаточно принять N информационных блоков в секунду, независимо от того, сколько блоков информации M было передано. Но для такого критерия качества принимаемой информации следует учитывать, что при низком отношении M/N система связи находится на пороге обрыва соединения и следует учитывать и этот фактор тоже.

Скорость передачи информации, а, следовательно, и достоверность принимаемого сигнала зависят от таких параметров системы связи с технологией LoRa, как:

1. Коэффициент расширения спектра SF ,
2. Ширина полосы сигнала BW ,
3. Кодовая скорость внутреннего помехоустойчивого кода V ,
4. Длина преамбулы P ,
5. Наличие контрольной суммы или избыточности дополнительного внешнего помехоустойчивого кода T_2 ,
6. Временного интервала t_2 , т.е. паузы между передаваемыми блоками информации,
7. Частота обратных сообщений от приемника к передатчику в случае полудуплексных каналов связи t_{ilm} .

На этапе проектирования адаптивной системы связи, необходимо задаваться списком возможных скоростей передачи информации $[U_{min}, \dots, U_{max}]$ и для каждой из них экспериментально выбирать выше перечисленные параметры с точки зрения либо достижения максимального соотношения сигнал/шум (при отсутствии мощных

внешних помех), либо минимального (порогового) значения сигнал/шум SN_p , при котором еще возможен устойчивый прием.

Второй критерий является актуальным для каналов связи со сложной помеховой обстановкой, когда под воздействием внешних помех существует вероятность значительного снижения соотношения сигнал/шум в канале связи.

Следует отметить, что, например, уменьшение ширины полосы сигнала BW повышает соотношение сигнал/шум в системе связи (при отсутствии мощных внешних помех), при пороговом значении сигнал/шум для уверенного приема SN_p , а увеличение коэффициента расширения спектра SF , при неизменном параметре BW , оставляет соотношение сигнал/шум прежним, но снижает порог уверенного приема SN_p .

Таким образом, на этапе проектирования адаптивной системы связи формируется таблица из возможных скоростей передачи информации и списка оптимальных параметров для каждой из них.

Алгоритм адаптивной регулировки скорости, и как следствие, достоверности принимаемой информации, заключается в следующем:

1. На стороне ПП БПЛА оценивается качество принимаемого сигнала и исходя из этой оценки по обратному каналу связи (в том числе и в полудуплексных системах) передается сигнал либо на изменение скорости передачи информации, либо сигнал об отсутствии изменений. Сигнал об изменении скорости передачи информации передается несколько раз, с обратным отсчетом до момента перехода на новую скорость.

2. На стороне ПП БПЛА при наступлении момента перехода на новую скорость, из таблицы, сформированной на этапе проектирования применяются необходимые параметры системы связи, и приемник начинает прием сигналов с новой скоростью передачи.

3. На стороне ПП Оператора при приеме сигнала об изменении скорости передачи информации, с учетом обратного отсчета, осуществляется переход на новое значение скорости передачи информации, за счет применения параметров, соответствующих этой скорости.

В случае если передатчик на стороне ПП Оператора по каким-либо причинам не принял сигналы о переходе на новую скорость, на стороне ПП БПЛА будет полное отсутствие сигнала, а на стороне ПП Оператора отсутствие сигналов по обратному каналу. В этом случае приемник на стороне ПП БПЛА может вернуться к предыдущему значению скорости передачи информации.

В случае длительного отсутствия связи между двумя сторонами приемопередатчиков, они оба могут перейти к минимальной скорости передачи информации, таким образом, восстановив связь и продолжив алгоритм адаптивной подстройки.

Кроме того, поскольку информация по обратному каналу о переходе на новую скорость передачи информации является достаточно лаконичной, можно ее передавать медленно, т.е. с максимальной возможной достоверностью ее приема.

Для определения качества текущего канала связи на приемной стороне, можно предложить следующий метод:

1. Потерянные блоки, которые не были приняты вследствие повреждения преамбулы или синхросимвола, подсчитывать с коэффициентом потерь $K_n=1$.

2. Потерянные блоки за счет несходимости контрольной суммы и информации, учитывать с коэффициентом потерь $K_n = K_{CRC}$. Коэффициент потерь K_{CRC} не должен быть слишком большим, поскольку достаточно повреждения одного бита, чтобы блок был потерян. Необходимо учитывать, что преамбула и синхросимвол были приняты

успешно. Поэтому можно предложить выбор значения этого коэффициента из диапазона $[K_{CRC \min}, K_{CRC \max}]$, где

$$K_{CRC \min} = \frac{1}{N_i}, \quad (3.10)$$

$$K_{CRC \max} = \frac{\frac{N_i + P + S_s}{P + S_s}}{N_i}, \quad (3.11)$$

где N_i – длина информационной части, включая CRC, P – длина преамбулы, S_s – длина синхросимвола.

3. Блоки, в которых внешний помехоустойчивый код не смог исправить ошибки, считать с коэффициентом потерь $K_n = K_{nk}$, где K_{nk} (коэффициент потерянных блоков при декодировании) выбирается из диапазона $[K_{nk \min}, K_{nk \max}]$.

$$K_{nk \min} = \frac{E}{N_i}, \quad (3.12)$$

$$K_{nk \max} = K_{CRC \max}, \quad (3.13)$$

где E – максимальное число ошибок, которое код может исправить. В том случае, когда $K_{nk \min} > K_{nk \max}$, следует выбирать $K_{nk \min}$, как с наибольшим количеством ошибок

4. Блоки, в которых внешний помехоустойчивый код исправил ошибки, считать с коэффициентом потерь $K_n = D/N$, где D – число исправленных символов, N – общая длина информационной части, включая избыточность.

Необходимо отметить, что выбор точных значений коэффициентов K_{CRC} и K_{nk} требует проведения ряда экспериментальных исследований на этапе проектирования системы связи.

Для оценки качества принятой информации можно предложить критерий достоверности принятой информации K_D , который в случае

использования CRC определится как:

$$K_D = \frac{S_p K_{CRC} S_{CRC}}{M}, \quad (3.14)$$

где S_p – сумма потерянных блоков из-за повреждения преамбулы или синхросимволов; K_{CRC} – коэффициент потерянных блоков, в которых не сходится контрольная сумма; S_{CRC} – сумма блоков, где не сошлось значение CRC; M – общее число блоков за единицу времени.

В случае применения внешнего помехоустойчивого кодирования без использования контрольной суммы, критерий достоверности равен:

$$K_D = \frac{(S_p + K_{nk} * S_{RS}) + \int_{i=1}^{S_i} \frac{D_i}{N}}{M}, \quad (3.15)$$

где K_{nk} – 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_{RC} – сумма блоков, где не удалось исправить ошибки помехоустойчивым кодом.

Принятие решения о переходе на новую скорость передачи информации зависит от того находится ли критерий достоверности K_D в диапазоне $[K_{Dmin}, K_{Dmax}]$. Если $K_D < K_{Dmin}$ значит, качество принимаемого сигнала неудовлетворительное и необходимо снизить скорость передачи информации. Если $K_D > K_{Dmax}$, значит, качество принимаемого сигнала выше, чем необходимое для полноценного функционирования аппаратуры на приемной стороне и скорость передачи информации можно повысить.

Для некоторых систем связи, например, беспилотных аппаратов, наряду с определением коэффициента K_D , целесообразно определять количество принятых информационных блоков в единицу времени f_p . В этом случае переход на новую скорость передачи информации осуществляется, если f_p выходит за рамки диапазона $[f_{pmin}, f_{pmax}]$, но

переход на более высокую скорость передачи информации при $f_p < f_{pmin}$, возможен только в случае $K_D > K_{Dmin}$. В противном случае повышение скорости передачи информации приведет к снижению достоверности передачи информации и возможно к обрыву связи.

Диапазон $[K_{Dmin}, K_{Dmax}]$ зависит от конкретной системы связи и ее назначения. Например, для систем телеуправления порог K_{Dmin} может принимать значения от 0,5 до 0,95, а для систем передачи информации от датчиков климат-контроля от 0,1 до 0,3.

Приведенная методика оценки качества достоверности принимаемой информации и алгоритм адаптивной подстройки скорости передачи были исследованы экспериментально. На рисунке 40, приведены разработанные приемник и передатчик на базе чипа SX1262.

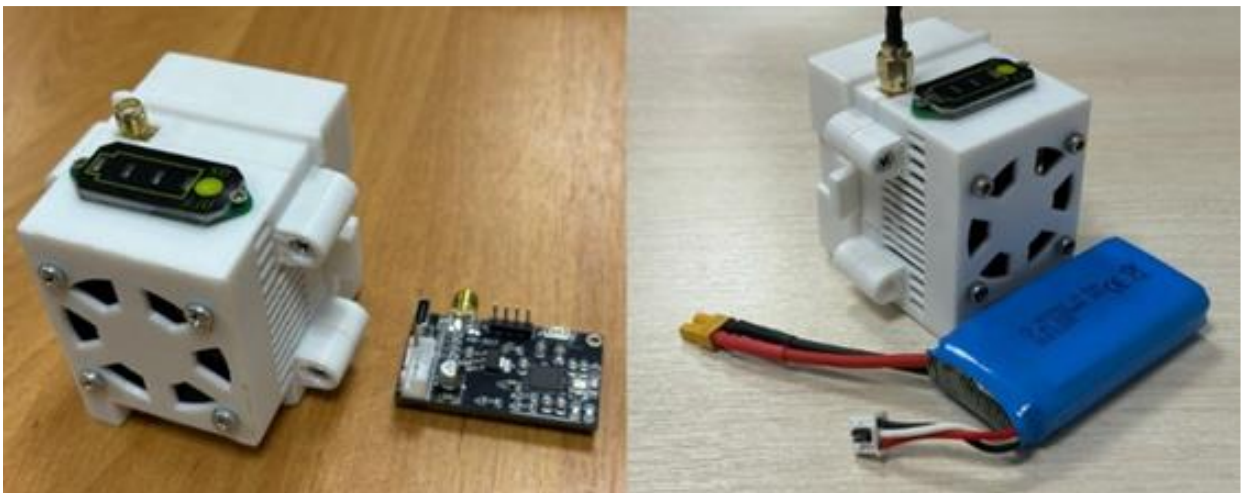


Рис.40. Разработанные передатчик и приемник экспериментальной линии связи

С помощью разработанного программно-аппаратного комплекса был проведен ряд экспериментальных исследований.

В экспериментах фиксировался выигрыш по соотношению с/ш при адаптивном изменении скорости передачи информации.

Для дополнительного повышения достоверности принятой информации применялось внешнее помехоустойчивое кодирование по коду Рида-Соломона.

На рис.41а-г приведены результаты экспериментальных исследований адаптивной системы связи с псевдослучайной перестройкой радиочастоты при различных скоростях передачи информации, соответствующих значениям 14, 25, 50 и 80 информационных блоков в секунду.

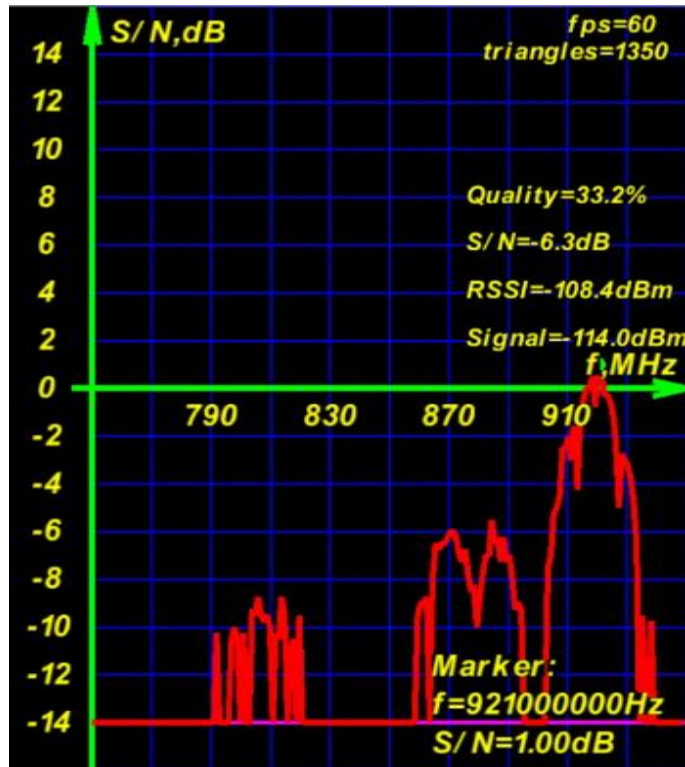


Рис.41а.

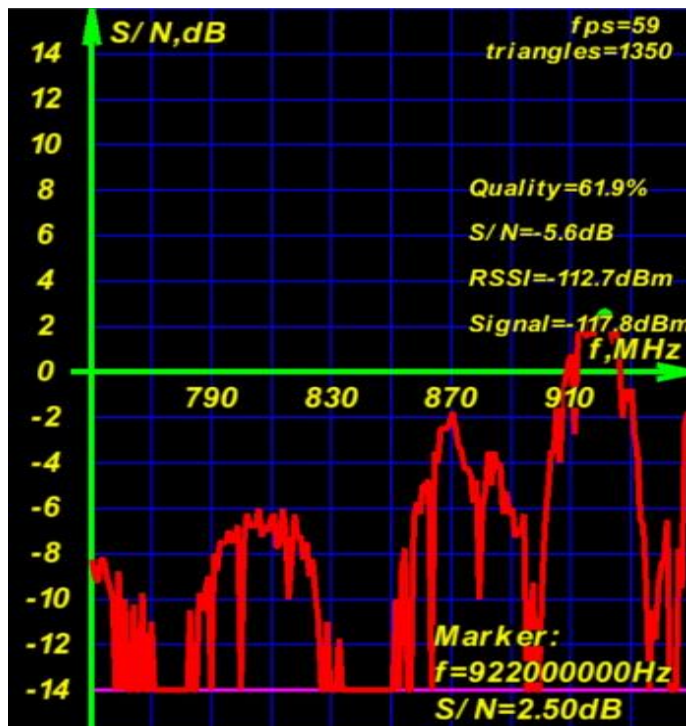


Рис.41б.

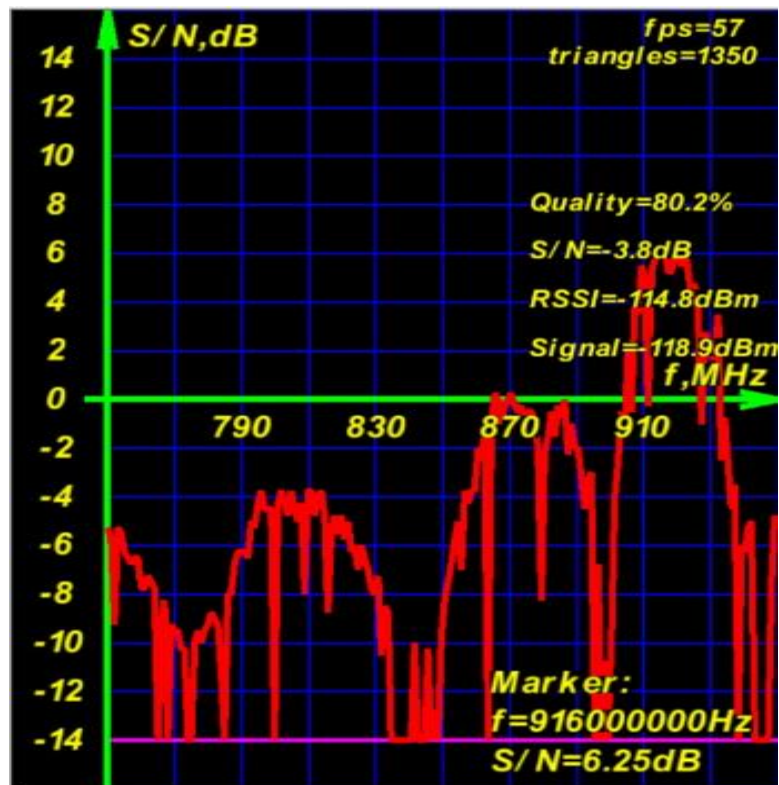


Рис.41в.

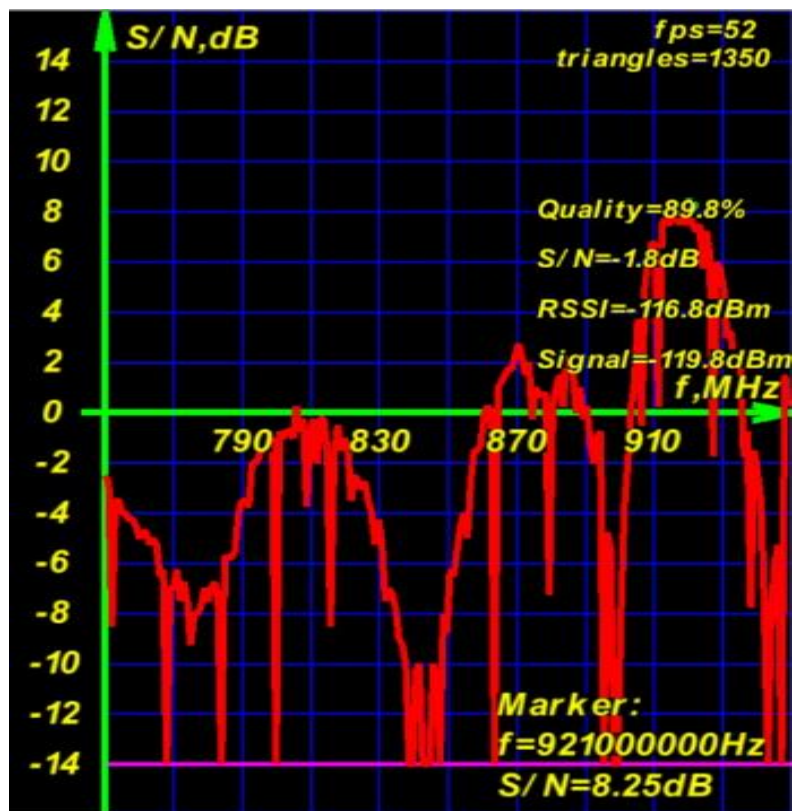


Рис. 41г.

Рис.41а-г. Результаты эксперимента при адаптивном изменении скорости

передачи информации.

Адаптивная регулировка скорости передачи информации осуществлялась изменением полосы пропускания сигнала BW и изменением временной задержки t_z между передаваемыми информационными блоками.

Следует отметить тот факт, что эксперимент проводился при уровне сигнала на входе приемника, соответствующего практически его пороговой чувствительности.

В таблице 15 показаны обработанные результаты экспериментальных исследований, приведенных на рис.41.

Таблица 15. Результаты экспериментальных исследований.

Рисунок 40	Количество переданных блоков в секунду	Среднее соотношение S/N, дБ	Среднее качество связи, %	Среднее количество принятых блоков в секунду, Vb
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

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что помимо ожидаемого увеличения соотношения с/ш от 0,7 до 4,5дБ при снижении скорости передачи информации, повышается как качество принимаемой информации, так и количество принятых информационных блоков.

Так при снижении скорости передачи информации с 80 до 50 блоков в секунду, примерно вдвое с 33% до 62% возрастает число принятых информационных блоков относительно переданных и на 16% возрастает абсолютное число принятых блоков в секунду Vb . Еще более радикальное снижение скорости передачи информации до 25 блоков в секунду

повышает качество принимаемой информации до 80% при снижении на 25% абсолютного количества принимаемых информационных блоков.

Интерполируя полученные данные, можно сделать вывод, что существует оптимум при скорости передачи информации около 38 блоков в секунду, при котором абсолютное количество принятых блоков Vb будет равно количеству принятых блоков при скорости передачи 80 блоков в секунду. Но при этом соотношение с/ш повысится примерно на 1,5дБ, а качество связи увеличится от 30 до 65%, что и составит выигрыш при адаптивной подстройке скорости передачи информации, как показано на рис.42.

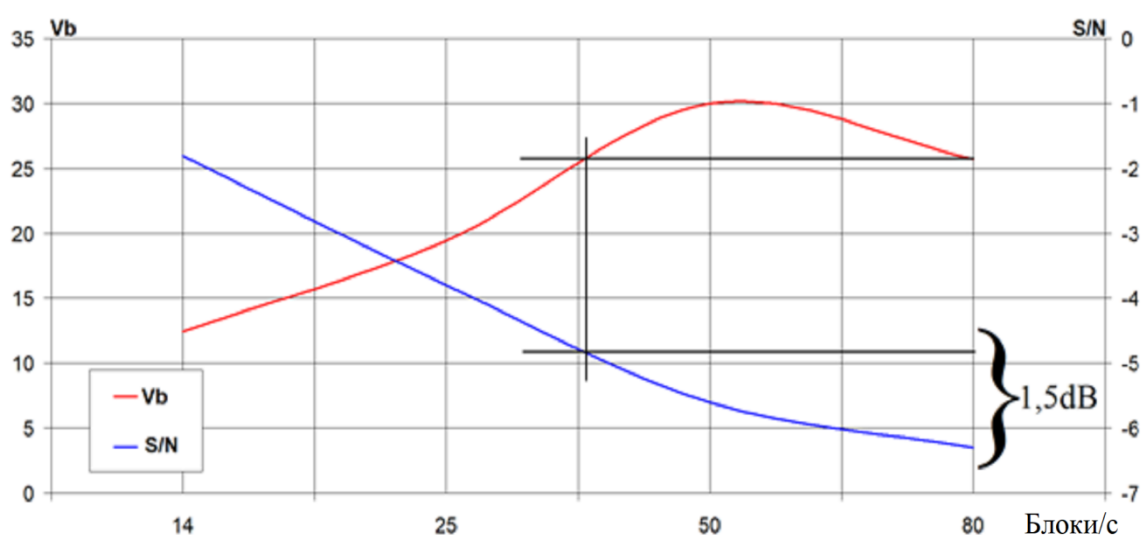


Рис.42. Выигрыш при адаптивной подстройке скорости передачи информации.

Необходимо отметить, что в условиях данного эксперимента, повышение соотношения сигнал/шум на 1-3дБ гарантирует некоторый запас по помехоустойчивости в случае возникновения каких-либо дополнительных внешних помех или снижения уровня сигнала, что особенно актуально в системах управления беспилотными аппаратами.

Таким образом, адаптивная регулировка скорости передаваемой информации способна не только повысить достоверность принимаемой информации, но и увеличить количество принимаемых информационных блоков за единицу времени и гарантировать некоторый запас по

помехоустойчивости в случае возникновения дополнительных помех. При разработке системы связи для беспилотных радиоуправляемых аппаратов (БРА), приведенные алгоритмы способны увеличить радиус действия БРА при снижении риска потери связи.

Выводы по главе III

Произведен анализ оборудования для экспериментальной линии связи, выполнен синтез комплекса адаптивной радиосвязи на примере БПЛА, предложена методика проведения экспериментальных исследований, рассмотрен вопрос влияния вычислительной сложности при кодировании и декодировании, проведены экспериментальные исследования адаптивных методов кодирования с изменением длительности передаваемых символов.

По результатам главы, можно сделать следующие выводы:

1. Предложены варианты построения аппаратуры комплекса адаптивной системы управления мобильными объектами в режимах дуплекс и полудуплекс.
2. Разработана методика работы комплекса адаптивной системы радиосвязи.
3. Получены выражения для оценки вычислительных затрат предложенных методов адаптивного кодирования цифровых сообщений
4. Экспериментально исследованы характеристики антенн разного типа для диапазона частот 750-950 МГц и даны рекомендации по выбору антенн.
5. Разработан и экспериментально исследован программно-аппаратный комплекс адаптивной системы управления мобильными объектами, показавший увеличение отношения С/Ш на 0.7-4.5 dB и увеличение

качества канала связи в 2-2.5 раза при разных характеристиках линии связи.

6. Разработан и экспериментально исследован алгоритм адаптивной регулировки скорости передачи информации и найден оптимум скорости, обеспечивающий выигрыш отношения С/Ш в каналах связи на 1.5 дВ, с увеличением качества канала связи в 2 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель исследования была достигнута благодаря решению всех поставленных задач. О достижении цели свидетельствуют следующие результаты:

1. На основе анализа свойств локальных сетей телеметрии и управления, работающих в условиях замираний, межсимвольной интерференции, помех разного вида и доплеровских сдвигов частоты, впервые выявлено и логически объяснено противоречие при применении статических методов помехоустойчивого кодирования для 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 режима и использования обратного канала. Установлена зависимость дальности связи от чувствительности приемника, на основе которой предложен метод оценки качества текущего канала связи и разработан алгоритм адаптивной регулировки скорости передачи информации.
3. Разработана архитектура внутреннего информационного блока и процесс синхронизации приемо-передачи команд управления и телеметрических данных между приемопередатчиками Оператора и БПЛА. Представлены временные диаграммы синхронизации блоков информации и телеметрии, экспериментально подтверждено уменьшение временных задержек при изменении условий канала 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. Разработаны технические требования к модулям, учитывающие влияние вычислительной сложности процедур кодирования/декодирования на операционные и временные задержки системы. Выявлено влияние вычислительных нагрузок при декодировании принятой информации, которая показывает, что, если добавить хотя бы 1 байт избыточности, время на декодирование займет на 38.3% дольше, чем блока при стандартных настройках. Тогда как если заменить его на 1 байт полезной информации, время на декодирование снизится на 27.7%. Так как длина блока в тестировании вычислительной нагрузки была 12 байт, для этого размера предлагается оптимум, который заключается в использовании 8 байт полезной информации и 4 байт избыточности.
6. Проведена серия натуральных экспериментов на различных дистанциях 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. 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 использованных сокращений

А — Антенна

АМПК — Адаптивные методы помехоустойчивого кодирования

АП — Антенный переключатель

БПЛА — Беспилотный летательный аппарат

БРА — Беспилотный радиоуправляемый аппарат

ИП — Источник питания

КДПИ — Коэффициент достоверности принятой информации

КСВ — Коэффициент стоячей волны

КУУ — Контроллер устройства управления

МК — Микроконтроллер

МШУ — Малошумящий усилитель

ПК — Персональный компьютер

ПП — Приемо-передатчик

ППРЧ — Псевдослучайная перестройка рабочей частоты

ПСПИ — Псевдослучайная последовательность импульсов

РС — Помехоустойчивый код Рида-Соломона

С/Ш — Отношение мощности полезного сигнала к мощности шума

- У — Усилитель
- ФАПЧ — Фазовая автоподстройка частоты
- ACRO — Ручной режим полета квадрокоптера
- ANGLE — Режим полета квадрокоптера со стабилизацией по горизонту
- BW — Ширина полосы радиочастот
- SABAS — Контекстно-зависимое адаптивное двоичное арифметическое кодирование
- CAVLC — Контекстно-зависимое кодирование с переменной длиной серии
- CRC — Циклический избыточный код
- CSI — Информация о состоянии канала связи
- DMA — Прямой доступ к памяти микроконтроллера
- ELRS — Радиопrotocol связи с высокой частотой обновления пакетов и большой дальностью для управления дронами
- FSK — Частотная манипуляция
- GPS — Спутниковая система глобального позиционирования
- LORA — Технология модуляции радиосигнала, обеспечивающая дальнюю связь при низком энергопотреблении
- LT — Фонтанные коды
- LTE — Стандарт беспроводной высокоскоростной передачи данных для мобильных телефонов и терминалов
- LZW — Универсальный алгоритм сжатия данных без потерь
- RQLY — Качество связи на стороне приемника
- RSNR — Отношение сигнал/шум, зафиксированное приемником на дроне
- RSSI — Индикатор уровня мощности принимаемого сигнала
- RTH — Функция автоматического возврата БПЛА в точку взлета
- SF — Коэффициент расширения спектра
- SPI / UART / I2C — Основные цифровые интерфейсы передачи данных между компонентами электроники

TPWR — Текущая выходная мощность радиопередатчика аппаратуры управления

TQLY — Качество связи телеметрии, принимаемой от дрона

TRSS — Уровень мощности сигнала телеметрии, который принимается от дрона

TSNR — Отношение сигнал/шум для телеметрии на стороне управления

TX / RX — Линии передачи и приема данных в последовательных интерфейсах

Список литературы

1. Назаров, А.В. Современная телеметрия в теории и на практике / А.В. Назаров, Г.И. Козырев, И.В. Шитов и др. - С-Пб.: Наука и техника. - 2007. – 667 с. – ISBN 5-94387-409-7

2. Серебряков, А. С. Телемеханика: учебник и практикум для вузов / А. С. Серебряков, Д. А. Семенов, Е. А. Чернов; под общей редакцией А. С. Серебрякова. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2025. — 106 с. — ISBN 978-5-534-19983-3. — Текст: электронный // Образовательная платформа Юрайт. — URL: (дата обращения: 20.08.2025).

3. Баева, Н.Н. Основы многоканальной связи / Н.Н. Баева, И.К. Бобровская, В.А. Брескин, Ю.А. Якуб; под редакцией И.К. Бобровской. — Москва: Связь, 1975. — 328 с.

4. Занин, А.С. Классификация ошибок параметров телеметрии на примере диспетчерского центра электроэнергетики для задачи по автоматизации процесса достоверизации / А. С. Занин, К. И. Бушмелева, - Вестник кибернетики, 2019, №1 (33). – С. 106-111.

5. Макушенко, Е. С. Перспективные сферы применения беспилотных летательных аппаратов / Е. С. Макушенко // Приоритеты новой экономики: энергопереход 4.0 и цифровая трансформация: сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции / под ред. И.

М. Степнова, Ю. А. Ковальчук. – М.: Московский государственный институт международных отношений (университет) Министерства иностранных дел Российской Федерации, 2022. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49599395> (дата обращения: 29.03.2025).

6. Simon, M. K. Digital Communication over Fading Channels / M. K. Simon, M.-S. Alouini. – Wiley. – Hoboken, 2005. – 928 p.

7. Самойлов, А.Г. Потери энергопотенциала на линиях связи космический аппарат - земная станция / А.Г. Самойлов, С.А. Самойлов. - Проектирование и технология электронных средств, 2022, №.3 - С.14-18.

8. Barker R. H. Group Synchronizing of Binary Digital Systems / Communication Theory, Butterworth, 1953. P. 279-287.

9. Hill, R. A. A First Course in Coding Theory / R. A. Hill. – Oxford University Press. – Oxford, 1986. – 256 p.

10. Самойлов, А.Г. Методы и устройства передачи сигналов: учебник / А. Г. Самойлов. - Москва; Вологда: Инфра-Инженерия. - 2024.- 292 с. - ISBN 978-5-9729-2029-7.

11. Крук, Б.И. Телекоммуникационные системы и сети. Том 1. Современные технологии / Б.И. Крук, В.Н. Попантопуло, В.П. Шувалов. – М.: Горячая линия-Телеком. – 2018. – 620 с. – ISBN 978-5-9912-0208-4

12. Трифонов, П. В. Основы помехоустойчивого кодирования / П. В. Трифонов. – СПб: Университет ИТМО, 2011. – 289 с.

13. Pless, V. Introduction to the Theory of Error-Correcting Codes / V. Pless. – Wiley-Interscience. – New York, 1998. – 250 p.

14. Ling, S. Coding Theory: A First Course / S. Ling, C. Xing. – Cambridge University Press. – Cambridge, 2004. – 233 p.

15. Морелос-Сарагоса, Р. Искусство помехоустойчивого кодирования: методы, алгоритмы, применение / Р. Морелос-Сарагоса. – М.: Техносфера, 2006. – 319 с.

16. Тамразян, Г. М. Программно-аппаратная реализация оптимального алгоритма декодирования каскадных кодов на базе кодов Рида-Соломона в адаптивных системах обмена данными: дис. канд. техн. наук: 05.12.13 / Г. М. Тамразян. – Ульяновск, 2017. – 142 с.

17. Блох, Э. Л. Обобщенные каскадные коды / Э. Л. Блох, В. В. Зяблов. – М.: Связь, 1976. – 240 с.

18. Илькевич, В. А. Критерии поиска оптимальных сверточных кодов / В. А. Илькевич // Доклады секции «Радиотехника и электроника»: 54-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – 2018. – С. 137.

19. Сайдахметов, М. Исследование сверточного кодирования данных для проведения анализа эффективности помехоустойчивого кодирования / М. Сайдахметов, Н. Оспанова, К. Балабатыров // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций. – 2020. – № 1. – С. 316–320.

20. Алишери, А. Модельное исследование блочного кода Хэмминга / А. Алишери // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2018. – № 1. – С. 116–118.

21. Самойлов, А. Г. Адаптивное согласование радиопередающих устройств с динамической нагрузкой / А.Г. Самойлов, С.А. Самойлов, В.С. Самойлов. - 78-я Всероссийская конференция (с международным участием) "Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий" ("РЭУС-ИТ 2023"), посвящённая дню РАДИО. - Россия, Москва. - 2023. – С. 305 – 309.

22. Самойлов, А.Г. Методы и устройства передачи сигналов: учебник / А. Г. Самойлов. - Москва; Вологда: Инфра-Инженерия. - 2024.- 292 с. - ISBN 978-5-9729-2029-7.

23. Крук, Б.И. Телекоммуникационные системы и сети. Том 1. Современные технологии / Б.И. Крук, В.Н. Попантопуло, В.П.

Шувалов. – М.: Горячая линия-Телеком. – 2018. – 620 с. – ISBN 978-5-9912-0208-4

24. Борисов, В.И., Помехозащищенность систем радиосвязи. Вероятностно-временной подход / Борисов В. И., Зинчук В. М.- Изд. 2-е исправленное. – М.: РадилоСофт, 2008. – 260 с. – ISBN 5-03274-011-6

25. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. — М.: Мир, 1986. – 566 с.

26. Сидельников, В. М. Теория кодирования / В. М. Сидельников. — Москва: Физматлит, 2008. — 322 с. - ISBN 978-5-9221-0943-7.

27. Витерби, А. Д. Принципы цифровой связи и кодирования / А.Д. Витерби, Дж. К. Омура. – М. : Радио и связь, 1982. – 536 с.

28. Кларк, Дж., мл. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи / Дж. Мл. Кларк, Дж. Кейн. — М.: Радио и связь, 1987. – 392 с.

29. Колесник, В.Д. Кодирование при передаче и хранении информации. Учебное пособие / В.Д. Колесник. – М. Высшая школа. – 2009. - 540 с. – ISBN 978-5-06-005917-5/

30. Питерсон, У. Коды, исправляющие ошибки / У. Питерсон, Э. Уэлдон. — М.: Мир, 1976. – 594 с.

31. Мак-Вильямс, Ф. Дж. Теория кодов, исправляющих ошибки / Ф. Дж. Мак-Вильямс. – М.: Связь, 1979. -744 с.

32. Welch, T. A technique for high-performance data compression. - IEEE Computer. – 1964. – Vol. 17. – pp. 8-19. – DOI: 10.1109/MC.1984.1659158.

33. Gallager R. Variations on a theme by Huffman / - IEEE Transactions on Information Theory. - 1978. - Vol. – pp. 668-674.

34. Сидоренко А.А. Повышение эффективности комбинированных помехоустойчивых кодов / А.А. Сидоренко. – Автореф. докт. дисс. – 2024. – 52 с.

35. Кульпин, А.С. Адаптивный кодер для систем телеуправления магистральными газопроводами / Кульпин А.С., Полушин П.А., Самойлов А.Г., Самойлов С.А. - Проектирование и технология электронных средств, 2005, №.4. - С. 59-63.

36. Самойлов, А.Г. Моделирование и имитация многолучевых радиоканалов / А.Г. Самойлов, С.А. Самойлов, В. С. Самойлов. – Методы и устройства формирования и обработки сигналов в информационных системах: межвузовский сборник научных трудов. – Рязань: Редакционно–издательский центр РГРТУ, 2018. = С.5-10.

37. Самойлов, А.Г. Имитатор радиоканалов 5G / А.Г. Самойлов, С.А. Самойлов, В. С. Самойлов. – Сб. трудов 37-й Всероссийской научно-технической конференции "Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем", г. Серпухов, 2018. - т. 6. – С. 168-171.

38. Samoylov, A. G. Adaptive encoding in remote digital telemetry and command systems / A G Samoylov, S. A. Samoylov, V. S. Samoylov, A.P. Galkin. - MIST Aerospace 2018. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 450 . - DOI: 10.1088/1757-899X/450/5/052002

39. Самойлов, А.Г. Математическая модель радиоканала высотомера БПЛА / А.Г. Самойлов, В. С. Самойлов, С.А. Самойлов. - XXV МНТК «Информационные технологии и системы» (ИСТ-2019), Н. Новгород, 2019, Т. 1. - С. 23-25.

40. Самойлов, А.Г. Блочная синхронизация цифровых информационных потоков с помехоустойчивым кодированием / А. Г. Самойлов, В.С. Самойлов, I A Al-Taxar, S. Nasir. - Сб. тр. III междунар. науч.-техн. форума: Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2020. - Т.3. / Под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2020. - Рязань. – С. 5-8.

41. Samoylov, A.G. Loss of radio waves energy on radio lines satellite-earth station / A.G. Samoylov, V.S. Samoylov, S. Nasir. - Journal of Physics: Conference Series, Volume 2094, Engineering and Materials Science. 2021. - DOI:10.1088/1742-6596/2094/4/042080.

42. Самойлов, А.Г. Особенности распространения радиоволн на радиолиниях космический аппарат земная станция / А. Г. Самойлов, В.С. Самойлов, С. Насир. - Проектирование и технология электронных средств, 2021, №4. - С.21-27.

43. Самойлов, А.Г. Синхронизация базовых станций сети технологической радиосвязи / А.Г. Самойлов, С.А. Самойлов, В.С. Самойлов. - В сб. трудов 14-ой международной научно-технической конференции: Перспективные технологии в средствах передачи информации. - Владимир, 2021. - С. 39-42.

44. 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.

45. Самойлов, А. Г. Адаптивное согласование радиопередающих устройств с динамической нагрузкой / А.Г. Самойлов, С.А. Самойлов, В.С. Самойлов. - 78-я Всероссийская конференция (с международным участием) "Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий" ("РЭУС-ИТ 2023"), посвящённая дню РАДИО. - Россия, Москва. - 2023. – С. 305 – 309.

46. Самойлов, А. Г. Измерения замираний сигналов в многолучевых радиоканалах и имитация интерференционных замираний / А. Г. Самойлов, В. С. Самойлов. – НТК физического факультета ННГУ им Н. И. Лобачевского. – Нижний Новгород, 2023. – С. 223-226.

47. 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.

48. Самойлов, В. С. Адаптивный канал связи для беспилотных радиоуправляемых аппаратов / В.С. Самойлов. - Проектирование и технология электронных средств. – 2025, №1. – С. 30-34.

49. Huffman, D. (1952). A Method for the Construction of Minimum-Redundancy Codes (PDF). Proceedings of the IRE. 40 (9):1098–1101. doi:10.1109/JRPROC.1952.273898.

50. "LZW Patent Information". About Unisys. Unisys. Archived from the original on June 26, 2009. Retrieved March 6, 2014.

51. Ziv, J.; Lempel, A. (1978). "Compression of individual sequences via variable-rate coding" (PDF). IEEE Transactions on Information Theory. 24 (5): 530. CiteSeerX 10.1.1.14.2892. doi:10.1109/TIT.1978.1055934.

52. 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.

53. Huffman, D. (1952). A Method for the Construction of Minimum-Redundancy Codes (PDF). Proceedings of the IRE. 40 (9):1098–1101. doi:10.1109/JRPROC.1952.273898.

54. Самойлов, В. С. Адаптивный канал связи для беспилотных радиоуправляемых аппаратов / В.С. Самойлов. - Проектирование и технология электронных средств. – 2025, №1. – С. 30-34.

55. Шеннон К. Математическая теория связи // Работы по теории информатики и кибернетике: пер. с англ.; под ред. Р.Л. Добрушина, О.В. Луканова. – М.: Иностран. Лит., 1963. – 830 с.

56. Варгузин, В. А. Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи / В. А. Варгузин, И. А. Цикин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2013. – 352 с.

57. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2016. – 1104 с.

58. Возенкрафт, Дж. Теоретические основы техники связи / Дж. Возенкрафт, И. Джекобс. – М.: Мир, 1969. – 392 с.

59. Модуль LoRa SX1276 Datasheet [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/800239/SEMTECH/SX1276.html> (дата обращения: 13.10.2024).

60. Финк, Л. М. Сигналы, помехи, ошибки / Л. М. Финк. – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с.

61. Кловский, Д. Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам / Д. Д. Кловский. – М.: Связь, 1982. – 304 с.

62. Справочник по радиорелейной связи / под. ред. С. В. Бородича. – М.: Радио и связь, 1981. – 415 с.

63. Советов, Б. Я. Помехоустойчивость передачи команд телеуправления в системе с запросом / Б. Я. Советов // Автоматика и телемеханика. – 1966. – №12. – С. 43–48.

64. Цифровая обработка сигналов / под ред. А. Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2003. – 604 с.

65. Котов, П. А. Повышение достоверности передачи цифровой информации / П. А. Котов. – М.: Связь, 1966. – 192 с.

66. Шлома, А. М. Новые алгоритмы формирования и обработки сигналов в системах подвижной связи / А. М. Шлома, М. Г. Бакулин, В. Б. Крейнделин, А. П. Шумов; под ред. А. М. Шломы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 344 с.

67. Левин, Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Книга 1 / Б. Р. Левин. – М.: Советское радио, 1974. – 552 с.
68. Сергиенко, А. Б. Цифровая связь: учеб. пособие / А. Б. Сергиенко. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – 164 с.
69. Студенникова, Д. А. Основы телекоммуникаций: учебник / Д. А. Студенникова. – М.: Академия, 2019. – 256 с.
70. Большая советская энциклопедия / гл. ред. О. Ю. Шмидт. – М.: Советская энциклопедия, 1926–1947.
71. Горохов, В. Г. Методологический анализ системотехники / В. Г. Горохов. – М.: Радио и связь, 1982. – 325 с.
72. Галлагер, Р. Теория информации и надежная связь / Р. Галлагер. – М.: Советское радио, 1974. – 568 с.
73. Ковалгин, Ю. А. Цифровое радиовещание: системы и технологии: монография / Ю. А. Ковалгин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2021. – 580 с.
74. Зюко, А. Г. Теория передачи сигналов / А. Г. Зюко, Д. Д. Кловский, М. В. Назаров, Л. М. Финк. – М.: Радио и связь, 1998. – 288 с.
75. Пятибратов, А. П. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации / А. П. Пятибратов. – М.: Радио и связь, 1998. – 512 с.
76. Булинский, А. В. Теория случайных процессов / А. В. Булинский, А. Н. Ширяев. – М.: Физматлит, 2003.
77. Галкин, А. П. Моделирование каналов систем связи / А. П. Галкин, А. Н. Лапин, А. Г. Самойлов. – М.: Связь, 1979.
78. Шахнович, И. В. Современные технологии беспроводной связи: издание второе, исправленное и дополненное / И. В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2006. – 288 с.
79. Перфилов, О. Ю. Радиопомехи: учебн. пособие для вузов / О. Ю. Перфилов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2016. – 110 с.

80. Волков, Л. Н. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: учебн. пособие / Л. Н. Волков, М. С. Немировский, Ю. С. Шинаков. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 390 с.
81. Прокис, Д. Цифровая связь / Д. Прокис; под. ред. Д. Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
82. Громаков, Ю. А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи / Ю. А. Громаков. – М.: Эко-Трендз, 1998. – 239 с.
83. Каганцов, С. М. Кодек для цифровых радиорелейных станций / С. М. Каганцов, П. А. Полушин, А. Г. Самойлов, С. А. Самойлов // Пятая Российская конференция по атмосферному электричеству. Том 2. – Владимир: Транзит ИКС, 2003. – С. 148–149.
84. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебн. пособие / В. Е. Гмурман. – М.: Высшее образование, 2006. – 479 с.
85. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей: учебник / Е. С. Вентцель. – М.: Высшая школа, 2006. – 575 с.
86. Гнеденко, Б. В. Курс теории вероятностей / Б. В. Гнеденко. – М.: Едиториал УРСС, 2005. – 448 с.
87. Баврин, И. И. Высшая математика / И. И. Баврин. – М.: Наука, 2000. – 611 с.
88. Комаров, В. Н. Об исправлении многократных пакетов ошибок / В. Н. Комаров // Техника средств связи. – 1980. – Вып. 3.
89. Мелентьев, О. Г. Теоретические аспекты передачи данных по каналам с группирующимися ошибками / О. Г. Мелентьев; под ред. В. П. Шувалова. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 232 с.
90. Бородич, С. В. Искажения и помехи в многоканальных системах радиосвязи с частотной модуляцией / С. В. Бородич. – М.: Связь, 1976. – 256 с.

91. Ключев, Л. Л. Теория электрической связи: учебник / Л. Л. Ключев. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2019. – 448 с.
92. Волков, А. А. Повышение помехоустойчивости радиосвязи / А. А. Волков, Г. В. Карпова, О. Е. Журавлев // Мир транспорта. – 2012. – №3. – С. 31–33.
93. Karn, P. A New Channel Access Scheme for Packet Radio / P. Karn. – Proceedings of the 9th ARRL Computer Networking Conference. – Redondo Beach, 1990. – P. 134–140.
94. Haykin, S., Moher, M. Modern Wireless Communications / S. Haykin, M. Moher. – Pearson Education. – Upper Saddle River, 2005. – 608 p.
95. Скобелева, С. Н. Повышение помехозащищенности радиоприемных трактов / С. Н. Скобелева, Н. М. Шевченко // Наука промышленности и сервис. – Тольятти: Поволжский Государственный Университет сервиса, 2010. – С. 103–109.
96. Rice, M. Digital Communications: A Discrete-Time Approach / M. Rice. – Pearson Education. – Boston, 2008. – 688 p.
97. Sklar, B. Digital Communications: Fundamentals and Applications / B. Sklar. – Prentice Hall. – Upper Saddle River, 2001. – 1104 p.
98. Goldsmith, A. Wireless Communications / A. Goldsmith. – Cambridge University Press. – Cambridge, 2005. – 644 p.
99. Proakis, J. G., Salehi, M. Digital Communications / J. G. Proakis, M. Salehi. – McGraw-Hill. – New York, 2008. – 1150 p.
100. Cover, T. M., Thomas, J. A. Elements of Information Theory / T. M. Cover, J. A. Thomas. – Wiley-Interscience. – Hoboken, 2006. – 776 p.
101. Zyablov, V. V., Shavgulidze, S. A. Adaptive Coding and Modulation for Communication Systems / V. V. Zyablov, S. A. Shavgulidze. – Springer. – Berlin, 2014. – 286 p.
102. Simon, M. K., Alouini, M.-S. Digital Communication over Fading Channels / M. K. Simon, M.-S. Alouini. – Wiley. – Hoboken, 2005. – 928 p.

103. Модуль LoRa SX1276 Datasheet [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/800239/SEMTECH/SX1276.html> (дата обращения: 13.10.2024).

104. Векторный анализатор NanoVNA-F V3. Руководство пользователя [Электронный ресурс]. – URL: <https://gsm-repiteri.ru/files/2024/09/vektornyy-analizator-nanovna-f-v3-rukovodstvo-polzovatelya.pdf> (дата обращения: 17.03.2026).

105. Геоинформационный сервис визуализации рельефа местности А-102 [Электронный ресурс]. – URL: <https://a-102.ru/> (дата обращения: 21.04.2026).

106. Berrou, C. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes / C. Berrou, A. Glavieux, P. Thitimajshima // IEEE International Conference on Communications. – 1993. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://mat.hjg.com.ar/tic/img/Near%20Shannon%20Limit%20Error.pdf> (дата обращения: 17.03.2026).

107. Shokrollahi, A. Raptor codes / A. Shokrollahi // IEEE Transactions on Information Theory. – 2006. – [Электронный ресурс]. – URL: https://people.ece.ubc.ca/janm/Papers_RG/Shokrollahi_IT_June06.pdf (дата обращения: 17.03.2026).

108. SEMTECH Corporation. Wireless & Sensing products: [Электронный ресурс]. 2020. URL: https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R0000001Rbr/6EfVZUorrpoKFfvaF_Fkrgp5kzjiNyiAbqcpqh9qSjE. (Дата обращения: 5.10.2024).

109. SEMTECH Corporation. LoRa Calculator: [Электронный ресурс]. 2024. URL: <https://www.semtech.com/design-support/lora-calculator>. (Дата обращения: 5.10.2024).

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025683857

**Программа управления амплитудой и фазой
радиопередающего устройства.**

Правообладатель: **ОБЩЕСТВО ОГРАНИЧЕННОЙ
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "СТУДИЯ 17" (RU)**

Авторы: **Якубовский Родион Михайлович (RU), Гасанов
Джамил Интигам оглы (RU), Самойлов Сергей
Александрович (RU), Самойлов Владислав Сергеевич (RU)**



Заявка № 2025682479

Дата поступления 25 июля 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 09 сентября 2025 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 0492e761a6300b15412401670bca2026
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025684737

Программа мультуправления углом поворота
диаграммы направленности

Правообладатель: **ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "СТУДИЯ 17" (RU)**

Авторы: **Якубовский Родион Михайлович (RU), Гасанов
Джамил Интигам Оглы (RU), Самойлов Сергей
Александрович (RU), Самойлов Владислав Сергеевич (RU)**



Заявка № 2025669026

Дата поступления 29 июля 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 16 сентября 2025 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 0492e761a6300b154f2401670bca2026
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационного исследования Самойлова В.С. на тему «Разработка и исследование методов адаптивного кодирования цифровых сообщений в локальных сетях телеметрии и управления».

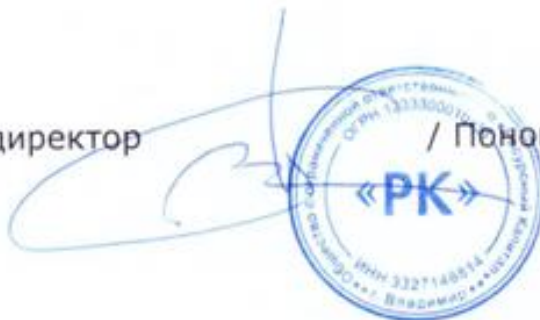
Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационного исследования Самойлова В.С. использованы компанией ООО «Ресурсный Капитал» при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. В частности, были использованы предложенные в диссертации «Метод адаптивного управления избыточностью сетевого трафика каналов управления и телеметрии» и «Методика адаптации системы связи при изменении длительности передаваемых символов».

Полевые испытания системы дистанционного управления подтвердили, что полученные в диссертационной работе результаты обеспечили выигрыш по соотношению сигнал/шум на +4.5дБ, увеличение качества канала связи до 80% и увеличение дальности связи до 2-х раз.

Настоящий акт не является основанием для финансовых претензий.

Генеральный директор

/ Пономарев В.Г. /



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационного исследования Самойлова В.С. «Разработка и исследование методов адаптивного кодирования цифровых сообщений в локальных сетях телеметрии и управления».

Настоящим подтверждаю, что разработанная при диссертационном исследовании «Методика определения достоверности передачи информации в адаптивных системах связи и телеметрии» использована при выполнении научной работы компанией ООО «Студия 17». При этом использованы выражения для расчета достоверности, результаты испытаний и рекомендации для практического применения разработанной методики.

Настоящий акт не является основанием для финансовых претензий.

Генеральный директор



/ Якубовский Р.М. /