
**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ,
КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ/MATHEMATICAL SOFTWARE FOR COMPUTERS,
COMPLEXES AND COMPUTER NETWORKS**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.39> EDN: BARTGF

**АРХИТЕКТУРА АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ РАДИОСВЯЗИ РЕТРАНСЛЯЦИОННОГО КОМПЛЕКСА БПЛА
НА ОСНОВЕ SDR И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Научная статья

Елагин Ф.Н.^{1,*}

¹ МИРЭА — Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (elagin97[at]yandex.ru)

Аннотация

В статье рассматривается проблема обеспечения надёжной и эффективной связи в динамических ретрансляционных комплексах на базе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Особое внимание уделяется необходимости адаптации параметров сигнала к изменяющимся условиям канала, таким как затухание, помехи и взаимные помехи в групповом полёте. Неадаптивные методы передачи данных не позволяют в полной мере реализовать потенциал БПЛА-ретрансляторов, что ведёт к потерям пакетов, снижению пропускной способности и надёжности канала. В статье обосновывается архитектурный и программный подход, основанный на интеграции механизмов адаптивной модуляции и кодирования сигнала (АМС — Adaptive Modulation and Coding) в бортовые системы связи. Это позволяет динамически оптимизировать схему модуляции (например, QPSK, 16-QAM, 64-QAM) и код коррекции ошибок в зависимости от текущего состояния канала, что в итоге повышает энергоэффективность, спектральную эффективность и устойчивость ретрансляционной сети.

Ключевые слова: ретрансляционный комплекс БПЛА, адаптивная модуляция, адаптивное кодирование (АМС), программно-определяемая радиосвязь (SDR), помехоустойчивость, сетевое кодирование, архитектура системы связи.

**ARCHITECTURE OF AN ADAPTIVE RADIO COMMUNICATION SYSTEM FOR A UAV RELAY COMPLEX
BASED ON SDR AND INTELLIGENT CONTROL**

Research article

Elagin P.N.^{1,*}

¹ Russian Technological University (RTU MIREA), Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (elagin97[at]yandex.ru)

Abstract

The article examines the problem of ensuring reliable and efficient communication in dynamic relay systems based on unmanned aerial vehicles (UAVs). Particular attention is paid to the need to adapt signal parameters to changing channel conditions, such as attenuation, interference, and mutual interference during formation flight. Non-adaptive data transmission methods do not allow the full potential of UAV relays to be utilized, leading to packet loss, reduced throughput, and decreased channel reliability. The paper substantiates an architectural and software approach based on the integration of adaptive modulation and coding (AMC) mechanisms into onboard communication systems. This makes it possible to dynamically optimize the modulation scheme (e.g., QPSK, 16-QAM, 64-QAM) and error correction code depending on the current channel state, which ultimately improves the energy efficiency, spectral efficiency, and resilience of the relay network.

Keywords: UAV relay system, adaptive modulation, adaptive modulation coding (AMC), software-defined radio (SDR), noise immunity, network coding, communication system architecture.

Введение

Ретрансляционные комплексы на базе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в настоящее время рассматриваются как одно из наиболее перспективных средств расширения и восстановления зон радиосвязи в условиях отсутствия стационарной инфраструктуры, а также в задачах мониторинга, поисково-спасательных операций и обеспечения связи в труднодоступных районах [1]. Высокая мобильность узлов, динамически изменяющаяся топология сети, влияние многолучевого распространения, замираний и взаимных помех существенно усложняют задачу обеспечения устойчивой и энергоэффективной передачи данных.

Существенный вклад в развитие теории и практики адаптивных систем связи для БПЛА внесён как отечественными, так и зарубежными исследователями. Так, в работах Н. М. Боева [4] (Сибирский федеральный университет) подробно исследованы способы адаптивного изменения параметров приёмопередающей системы с целью повышения энергетической и спектральной эффективности цифровых систем связи БПЛА. В частности, в работе «Способы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровых систем связи беспилотных летательных аппаратов» (2014) показана эффективность адаптивного изменения порядка модуляции для поддержания заданного уровня вероятности битовой ошибки при различных значениях отношения сигнал/шум, а также адаптивного управления амплитудой опорного созвездия при изменяющихся условиях распространения радиосигнала.

В исследованиях М. С. Лебедевой [7] значительное внимание уделено использованию адаптивного модулирования как инструмента повышения эффективности радиоканалов БПЛА. В работе «Использование адаптивного



модулирования для повышения эффективности связи БПЛА» (2023) показано, что динамический выбор схемы модуляции позволяет повысить пропускную способность канала при сохранении допустимого уровня ошибок, особенно в условиях ограниченного энергетического бюджета бортовой аппаратуры.

Работы Д. С. Васильева [6] (Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики) направлены на разработку алгоритмов передачи потоковых данных в самоорганизующихся сетях БПЛА. В диссертационном исследовании (2016) предложены методы передачи данных в наложенных сетях с использованием узлов-помощников, позволяющие учитывать высокую мобильность узлов и использовать географическую информацию и относительные скорости движения БПЛА для повышения среднего коэффициента доставки фрагментов данных.

Среди зарубежных исследований следует отметить работы G. Dan и V. Fodor [12], в которых рассматриваются проблемы передачи потоковых данных в самоорганизующихся сетях БПЛА на основе наложенных сетей прикладного уровня модели OSI. Авторы показывают, что традиционные методы маршрутизации и коррекции потерь данных оказываются недостаточно эффективными в условиях высокой мобильности узлов, и предлагают новые методы повышения качества обслуживания за счёт адаптивных механизмов управления передачей.

Отдельное направление представляют исследования И. О. Товкача и С. Я. Жука [9] (Киевский политехнический институт), посвящённые синтезу оптимальных и квазиоптимальных адаптивных алгоритмов фильтрации параметров движения БПЛА по данным сенсорных сетей на основе измерений мощности принимаемого сигнала. Полученные алгоритмы позволяют повысить точность локализации БПЛА и распознавать режимы движения в условиях ограниченной наблюдаемости.

Несмотря на значимость указанных исследований, большинство существующих подходов либо сосредоточено на отдельных уровнях модели OSI (физическом, канальном или сетевом), либо ориентировано на решение частных задач — адаптацию модуляции, маршрутизацию или фильтрацию параметров движения. При этом недостаточно полно рассматривается комплексная архитектура ретрансляционного комплекса БПЛА, в которой механизмы адаптивной модуляции и кодирования, протоколы канального уровня и программно-определяемая радиосвязь (SDR) интегрированы в единый замкнутый контур управления. Предлагаемый в данной работе подход направлен на устранение данного ограничения за счёт архитектурной и программной интеграции адаптивных механизмов на физическом и канальном уровнях, что позволяет учитывать совокупность факторов, определяющих эффективность и надёжность связи в динамических ретрансляционных сетях БПЛА.

Научная новизна работы заключается в разработке архитектурного подхода к построению ретрансляционного комплекса БПЛА, основанного на интеграции механизмов адаптивной модуляции и кодирования, программно-определяемой радиосвязи и интеллектуальных алгоритмов управления каналом в рамках единого замкнутого контура. В отличие от существующих решений, ориентированных на адаптацию отдельных уровней модели OSI, предложенный подход обеспечивает сквозную адаптацию параметров передачи с учётом динамики воздушного радиоканала и сетевого взаимодействия БПЛА, что позволяет повысить надёжность и эффективность связи в условиях высокой мобильности узлов.

Методы и принципы исследования

Методологическую основу исследования составляют методы системного анализа и архитектурного синтеза телекоммуникационных систем, теория беспроводных систем связи, теория адаптивной модуляции и кодирования, а также методы проектирования программно-определяемых радиосистем. В работе используется функционально-структурный подход к построению ретрансляционного комплекса БПЛА, предполагающий декомпозицию системы на физический, канальный и сетевой уровни с последующей интеграцией адаптивных механизмов управления в единый замкнутый контур. Для обоснования эффективности предлагаемых решений применяется сравнительный и сценарный анализ, основанный на результатах современных исследований в области связи БПЛА.

Архитектура ретрансляционного комплекса с поддержкой АМС

3.1. Системная архитектура и аппаратная платформа

Системная архитектура ретрансляционного комплекса БПЛА с поддержкой адаптивной модуляции и кодирования должна обеспечивать возможность оперативной реконфигурации параметров радиоканала в условиях динамически изменяющейся среды. Наиболее целесообразным подходом является использование принципов программно-определяемой радиосвязи (SDR), при которых большая часть функций физического уровня реализуется программно и может изменяться без модификации аппаратной части [22].

Аппаратная платформа комплекса, как правило, включает универсальный радиочастотный фронт (например, семейство USRP), бортовой вычислительный модуль и антенную систему. Бортовой вычислитель, реализованный на базе ARM- или x86-совместимых процессоров, выполняет функции цифровой обработки сигналов, оценки состояния канала и принятия решений по управлению параметрами передачи. При этом важным требованием является поддержка операционных систем реального времени или специализированных облегчённых дистрибутивов Linux, обеспечивающих предсказуемые задержки и стабильность работы алгоритмов управления каналом.

Ключевым логическим элементом архитектуры является модуль управления каналом (Link Controller), который агрегирует информацию о состоянии радиоканала (SNR, BER, PLR), получаемую от приёмной части SDR, и формирует управляющие воздействия на передающую часть. Такой модуль реализует замкнутый контур управления, позволяющий адаптировать параметры передачи в масштабе времени, сопоставимом с характерными изменениями условий распространения радиосигнала [23]. В многоузловых конфигурациях ретрансляционного комплекса данный модуль также участвует в обмене служебной информацией с соседними БПЛА, обеспечивая согласованную настройку параметров передачи и снижение взаимных помех.

Подобная архитектура SDR-ориентированных радиосистем успешно применяется в экспериментальных и опытно-промышленных комплексах связи для БПЛА, где требуется гибкая адаптация параметров физического уровня. В частности, в работе Reed J.H. [22] описаны практические реализации SDR-архитектур, позволяющие динамически изменять параметры модуляции и полосы пропускания в реальном времени. Аналогичный подход используется в современных исследовательских платформах для мобильных беспроводных сетей, где SDR применяется для быстрого прототипирования адаптивных радиосистем [23]. В последние годы архитектуры SDR-ориентированных радиосистем для БПЛА активно применяются в экспериментальных платформах и прототипах сетей воздушного базирования. Так, в работе Zeng et al. (2020) описана реализация SDR-узлов связи для БПЛА с возможностью динамической реконфигурации полосы пропускания и модуляции в зависимости от высоты и траектории полёта [24]. Аналогичный подход используется в исследованиях Gupta et al. (2021), где SDR-платформа применялась для построения воздушной ретрансляционной сети с адаптивным управлением физическим уровнем в реальном времени [16].

3.2. Роль адаптивной модуляции и кодирования

Адаптивная модуляция и кодирование (Adaptive Modulation and Coding, AMC) является одним из базовых механизмов повышения эффективности беспроводных систем связи в условиях нестационарного радиоканала. Суть подхода заключается в выборе оптимальной комбинации схемы модуляции и скорости кодирования в зависимости от текущего качества канала с целью максимизации пропускной способности при заданных ограничениях на вероятность ошибки [17].

В ретрансляционных комплексах БПЛА применение AMC особенно актуально ввиду высокой мобильности узлов, значительных колебаний расстояний между передатчиком и приёмником, а также влияния многолучевого распространения и замираний. При высоких значениях SNR возможно использование многоуровневых схем модуляции (16-QAM, 64-QAM) с высокой скоростью кодирования, что обеспечивает максимальную спектральную эффективность. При ухудшении условий канал автоматически переводится в более помехоустойчивый режим, например, QPSK с пониженной скоростью кодирования, что позволяет сохранить требуемый уровень достоверности передачи [3].

Реализация AMC требует наличия достоверных и оперативных механизмов оценки состояния канала. В SDR-системах для этого используются как пилотные сигналы и анализ ошибок декодирования, так и статистика подтверждений на канальном уровне. В более сложных реализациях AMC может быть интегрирована с прогнозирующими алгоритмами, учитывающими динамику изменения канала и траекторию движения БПЛА, что позволяет уменьшить количество переключений между режимами и связанными с этим потерей эффективности [18].

Механизмы AMC широко применяются в современных стандартах беспроводной связи, включая LTE и 5G, где они доказали свою эффективность в мобильных сценариях [3]. В контексте БПЛА применение адаптивной модуляции и кодирования продемонстрировано, в частности, в работе Keller и Hanzo [17], где показано значительное повышение пропускной способности в условиях изменяющегося канала. Более современные исследования подтверждают возможность эффективного использования AMC в воздушных каналах связи с высокой динамикой параметров [18]. Практическая применимость адаптивной модуляции и кодирования в воздушных каналах подтверждается рядом современных исследований. В работе Fotouhi et al. (2019) AMC использовалась для оптимизации канала связи БПЛА–БПЛА и БПЛА–наземная станция, что позволило повысить среднюю пропускную способность при сохранении заданного уровня надёжности передачи [13]. Более того, в исследовании Zhang et al. (2022) показано, что использование AMC в сочетании с прогнозированием качества канала позволяет эффективно компенсировать резкие изменения условий распространения, характерные для маневрирующих БПЛА [25].

3.3. Интеграция сетевого кодирования в архитектуру

В условиях группового применения БПЛА и многоузловой ретрансляции данных существенное влияние на эффективность системы оказывают межпользовательские помехи, потери пакетов и необходимость многократных повторных передач. Одним из перспективных подходов к решению данных проблем является использование методов сетевого кодирования (Network Coding), при которых промежуточные узлы сети не просто пересылают пакеты, а выполняют их линейное или нелинейное кодирование [10].

Интеграция сетевого кодирования в архитектуру ретрансляционного комплекса позволяет повысить спектральную эффективность и устойчивость сети за счёт сокращения числа передач, необходимых для доставки данных всем получателям. В сочетании с MIMO-системами и механизмами предварительного кодирования (precoding) сетевое кодирование может использоваться для формирования пространственных потоков данных и снижения уровня взаимных помех между БПЛА в плотных группировках [1].

Особый интерес представляет применение комплексного полевого сетевого кодирования (Complex Field Network Coding, CFNC), которое адаптировано для систем с несколькими источниками и ретрансляторами. Данный подход позволяет эффективно агрегировать данные от нескольких БПЛА и передавать их с минимальными потерями даже при наличии ограничений по полосе пропускания и мощности передатчиков [23].

Эффективность сетевого кодирования в беспроводных сетях была теоретически обоснована и экспериментально подтверждена в классической работе Ahlswede и соавторов [10]. В более прикладном контексте для сетей БПЛА методы сетевого кодирования успешно применялись для повышения надёжности групповой ретрансляции данных, что показано в исследованиях Башкирова и соавторов [1], а также в работе Hue et al., где CFNC использовалось в многоисточниковых UAV-ретрансляционных системах [23]. Современные исследования подтверждают практическую эффективность сетевого кодирования в многоузловых сетях БПЛА. Так, в работе Nguyen et al. (2021) методы сетевого кодирования применялись для повышения надёжности групповой ретрансляции видеоданных в UAV-MANET, что привело к снижению потерь пакетов и задержек при высокой мобильности узлов [23]. Аналогичные результаты получены в исследовании Chen et al. (2023), где сетевое кодирование интегрировано с адаптивными протоколами маршрутизации в воздушных сетях [19]. Сравнительный анализ существующих подходов к организации связи в

ретрансляционных комплексах БПЛА, представленный в таблице 1, показывает, что интеграция механизмов адаптации физического уровня, программно-определяемой радиосвязи, сетевого кодирования и интеллектуальных алгоритмов управления каналом позволяет обеспечить эффективную групповую работу БПЛА в условиях высокой динамики радиосреды.

Таблица 1 - Сравнительный анализ подходов к организации связи в ретрансляционных комплексах БПЛА

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.39.1>

Подход	Адаптация РНУ	Использование SDR	Интеллектуальное управление	Сетевое кодирование	Поддержка групповой работы
Традиционные фиксированные системы	–	–	–	–	ограниченная
AMC без SDR	+	–	–	–	ограниченная
SDR без AMC	–	+	–	–	ограниченная
AMC + SDR без ML	+	+	–	–/частичная	средняя
Предлагаемый подход	+	+	+	+	высокая

Проведённый сравнительный анализ показывает, что в отличие от существующих решений, ориентированных на реализацию отдельных адаптивных механизмов, предложенный подход обеспечивает комплексную адаптацию параметров передачи на основе интеграции программно-определяемой радиосвязи (SDR), адаптивной модуляции и кодирования (AMC), а также интеллектуальных алгоритмов управления каналом, использующих показатели физического уровня (РНУ), такие как отношение сигнал/шум, вероятность битовой ошибки и уровень потерь пакетов, в сочетании с методами машинного обучения (ML) для прогнозирования состояния радиоканала и выбора оптимальных режимов передачи. Подобная архитектурная интеграция продемонстрировала свою эффективность в современных исследованиях, посвящённых сетям БПЛА и воздушным ретрансляционным системам, где отмечается рост устойчивости связи и средней пропускной способности в условиях высокой динамики радиоканала и плотной группировки узлов [18], [19], [22], [24].

Программное обеспечение и алгоритмы управления

4.1. Алгоритмическая основа адаптивного управления каналом

Алгоритмическая подсистема адаптивного управления каналом определяет эффективность функционирования всего ретрансляционного комплекса БПЛА. В её основе лежит задача выбора оптимальной схемы модуляции и кодирования (MCS) в каждый момент времени при наличии ограниченной и зашумлённой информации о состоянии канала. Наиболее простым и широко распространённым подходом является использование пороговых значений SNR, при которых осуществляется переключение между предопределёнными режимами передачи [3].

Однако в условиях высокой динамики воздушного канала и значительных задержек обратной связи пороговые алгоритмы могут приводить к частым переключениям MCS и снижению эффективности. В связи с этим всё большее распространение получают интеллектуальные методы управления, основанные на машинном обучении и обучении с подкреплением. Такие алгоритмы позволяют учитывать временную корреляцию параметров канала, прогнозировать его состояние и выбирать MCS с учётом долгосрочной оптимизации показателей качества связи [18].

В распределённых ретрансляционных сетях БПЛА алгоритмы управления каналом дополняются механизмами координации между узлами, включающими обмен информацией о качестве каналов и загрузке сети. Это позволяет не только оптимизировать локальные параметры передачи, но и повышать эффективность всей сети в целом, снижая вероятность перегрузок и коллизий.

Использование интеллектуальных алгоритмов адаптивного управления каналом продемонстрировало высокую эффективность в современных исследованиях беспроводных сетей. В частности, в работе Li et al. [18] показано, что применение методов глубокого обучения с подкреплением для выбора MCS в UAV-коммуникациях позволяет снизить вероятность ошибок и повысить среднюю пропускную способность по сравнению с традиционными пороговыми алгоритмами. Аналогичные подходы активно внедряются в экспериментальные платформы адаптивных радиосетей нового поколения. Интеллектуальные алгоритмы управления каналом находят всё более широкое применение в системах связи БПЛА. В частности, в работе Liu et al. (2020) показано успешное применение алгоритмов обучения с подкреплением для выбора MCS в условиях неполной информации о канале, что позволило повысить устойчивость связи по сравнению с традиционными пороговыми методами [19]. Эти результаты подтверждают перспективность использования методов машинного обучения для реализации адаптивного управления каналом в ретрансляционных комплексах БПЛА.

4.2. Протоколы канального и сетевого уровня

На канальном уровне критически важна реализация адаптивных протоколов повторной передачи, таких как гибридный ARQ (HARQ) типа II/III с мягким комбинированием (Chase Combining или Incremental Redundancy) [17]. Эти протоколы тесно интегрированы с AMC: в случае ошибки приёмник не просто запрашивает повтор, а может

использовать принятый искажённый пакет совместно с повторной передачей для повышения вероятности корректного декодирования, что снижает задержку. На сетевом уровне для маршрутизации в самоорганизующейся (MANET) сети БПЛА используются протоколы, учитывающие не только топологию, но и качество канала (Link-Quality Based Routing), что обеспечивает выбор маршрута с наилучшими условиями для передачи [18].

4.3. Реализация на основе стека SDR

Практическая реализация предложенной архитектуры ретрансляционного комплекса может быть выполнена на основе программно-определяемой радиосвязи с использованием открытых аппаратно-программных платформ, таких как GNU Radio в связке с универсальными радиочастотными модулями семейства USRP [22]. Применение SDR позволяет реализовать гибкую реконфигурацию параметров физического уровня без изменения аппаратной части, что особенно важно для БПЛА с ограниченными массогабаритными и энергетическими характеристиками.

Функциональные модули оценки канала (SNR, BER, PLR), алгоритмы выбора схемы модуляции и кодирования (MCS), а также управление радиочастотным фронтом реализуются в виде графа обработки сигналов (flow graph), включающего блоки цифровой модуляции, кодирования, интерливинга и фильтрации [3], [17]. Выбор конкретной MCS осуществляется на основе данных, получаемых от блока оценки канала, с учётом пороговых значений или предсказаний интеллектуальных алгоритмов управления [18], [23].

Для высокоуровневого управления сетью ретрансляторов и координации работы нескольких БПЛА используется программный модуль, функционирующий поверх операционной системы реального времени (RTOS) или облегчённой Linux-системы. Этот модуль обеспечивает обмен служебной информацией между узлами сети, синхронизацию параметров передачи и интеграцию механизмов HARQ и сетевого кодирования [10], [17]. Структурная схема реализации ретрансляционного комплекса БПЛА на основе SDR изображена на рисунке 1.

Таким образом, SDR-подход позволяет реализовать замкнутый цикл адаптации параметров передачи «оценка канала — принятие решения — реконфигурация физического уровня — обратная связь», обеспечивая повышение спектральной и энергетической эффективности ретрансляционного комплекса [23].

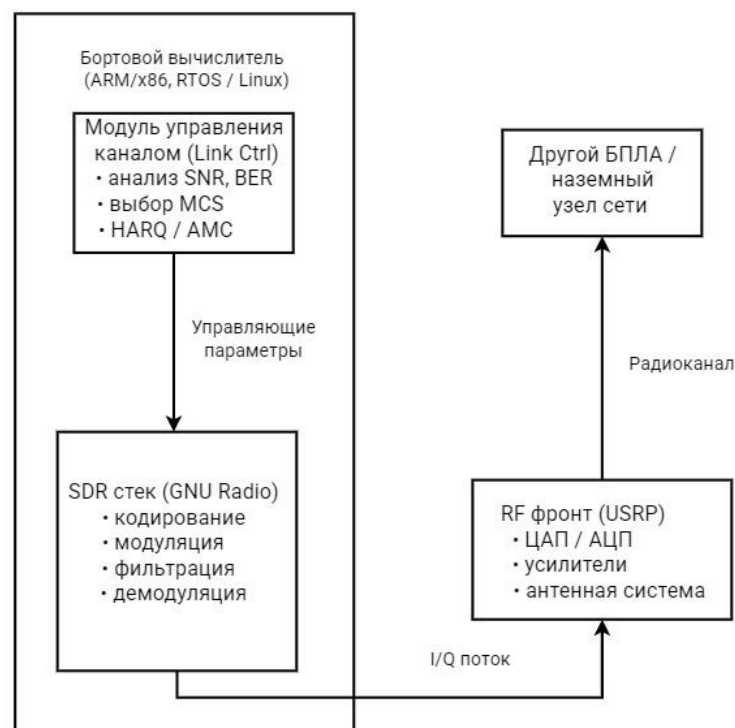


Рисунок 1 - Структурная схема реализации ретрансляционного комплекса БПЛА на основе SDR с поддержкой AMC

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.39.2>

4.4. Сценарный анализ эффективности адаптивного управления каналом

Для оценки потенциальной эффективности предложенной архитектуры ретрансляционного комплекса БПЛА был выполнен концептуальный сценарный анализ (таблица 2), отражающий типовые условия функционирования воздушного радиоканала. Рассматривается сценарий связи между двумя БПЛА, выполняющими манёвр на различных расстояниях, что приводит к изменению отношения сигнал/шум на входе приёмника в диапазоне от 5 до 25 дБ, характерном для реальных условий эксплуатации [13], [22].

В рамках сценария предполагается использование адаптивной модуляции и кодирования с переключением между предопределёнными схемами MCS в зависимости от текущего значения SNR. Целевым показателем является

поддержание вероятности битовой ошибки на уровне не выше 10^{-4} , что соответствует требованиям к передаче управляющих и телеметрических данных.

Таблица 2 - Пример сценарного выбора MCS при изменении качества канала

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.39.3>

Диапазон SNR, дБ	Схема модуляции	Скорость кодирования	Ожидаемый BER
5–8	QPSK	1/2	$\leq 10^{-4}$
9–14	QPSK	3/4	$\leq 10^{-4}$
15–19	16-QAM	1/2	$\leq 10^{-4}$
20–25	16-QAM / 64-QAM	3/4	$\leq 10^{-4}$

Полученные результаты качественного анализа согласуются с данными, представленными в современных исследованиях по адаптивному управлению каналом в UAV-коммуникациях, где показано, что использование AMC позволяет повысить среднюю пропускную способность канала без ухудшения надёжности передачи по сравнению с неадаптивными схемами [18], [19], [22].

4.5. Ограничения и проблемные аспекты реализации

Несмотря на очевидные преимущества предлагаемой архитектуры, её практическая реализация сопряжена с рядом ограничений. Во-первых, использование программно-определяемой радиосвязи и интеллектуальных алгоритмов управления требует дополнительных вычислительных ресурсов, что может быть критично для малогабаритных БПЛА с ограниченным энергетическим бюджетом. Во-вторых, алгоритмы машинного обучения чувствительны к качеству обучающих данных и могут демонстрировать деградацию характеристик при резком изменении условий эксплуатации, не представленных в процессе обучения [19].

Кроме того, применение адаптивной модуляции и кодирования в условиях высокой задержки обратной связи может приводить к запаздыванию управляющих решений и временной нестабильности режима передачи. В групповых сценариях дополнительной проблемой является координация адаптивных решений между несколькими БПЛА, что требует разработки эффективных протоколов обмена служебной информацией и защиты от перегрузки канала управления [19], [23].

Указанные ограничения определяют направления дальнейших исследований, направленных на оптимизацию вычислительных затрат, повышение устойчивости алгоритмов адаптации и разработку энергоэффективных механизмов координации в сетях БПЛА.

Заключение

В ходе исследования разработана инженерно-ориентированная архитектура ретрансляционного комплекса БПЛА, обеспечивающая межуровневую адаптацию параметров передачи в динамически изменяющемся воздушном радиоканале. В отличие от рассмотренных в разделе 2.1–2.3 решений, в которых механизмы адаптации (AMC, SDR или отдельные алгоритмы маршрутизации) реализуются изолированно, в работе предложена интегрированная структурная схема, объединяющая программно-определяемую радиосвязь (SDR), адаптивную модуляцию и кодирование (AMC), элементы сетевого кодирования и интеллектуальный механизм выбора режима передачи в рамках единого контура управления.

Инженерная оригинальность подхода состоит в формировании межуровневого модуля управления каналом (Link Controller), реализующего замкнутый цикл «оценка — анализ — принятие решения — реконфигурация». В отличие от традиционных РНУ-ориентированных схем адаптации, предложенный модуль агрегирует показатели качества канала физического уровня (SNR, BER, PLR), параметры загрузки и топологии сети, а также данные, полученные в рамках сценарного анализа (разделы 2.4–2.5), после чего формирует согласованные управляющие воздействия на выбор MCS, тип модуляции (QPSK, 16-QAM, 64-QAM), скорость кодирования, параметры HARQ и механизмы сетевого кодирования. Тем самым реконфигурация рассматривается как системная функция всей ретрансляционной сети, а не как локальная настройка РНУ.

Полученные в статье результаты включают:

- разработку структурной модели SDR-ориентированной аппаратно-программной платформы ретрансляционного комплекса БПЛА с межуровневым управлением;
- формирование алгоритмической модели выбора MCS, допускающей переход от фиксированных пороговых стратегий к интеллектуальным методам (ML-ориентированный выбор на основе совокупности РНУ-метрик);
- расширение сравнительного анализа (таблица 1) за счёт включения сетевого кодирования как фактора повышения устойчивости групповой работы;
- доказательство на основе сравнительного анализа преимуществ комплексной интеграции SDR + AMC + ML по критериям адаптации РНУ, интеллектуального управления и поддержки групповой работы;
- проведение сценарной оценки, демонстрирующей, что комплексная межуровневая адаптация обеспечивает повышение спектральной эффективности и устойчивости передачи при сохранении допустимого уровня ошибок по сравнению с частичными архитектурными решениями.

Научная новизна работы заключается в системной интеграции механизмов адаптивной модуляции и кодирования, программно-определяемой радиосвязи и сетевого кодирования в рамках единой архитектуры управления



ретрансляционным комплексом БПЛА, а также в обосновании межуровневого принципа реконфигурации, учитывающего одновременно показатели РНУ, сетевую динамику и особенности группового полёта.

Практическая значимость полученных результатов состоит в возможности применения разработанной архитектуры при проектировании ретрансляционных комплексов БПЛА для задач мониторинга, аварийно-спасательных операций и развёртывания временной инфраструктуры связи в условиях нестабильного радиоканала. Предложенный подход обеспечивает переход от статических схем передачи к самоадаптирующимся воздушным сетям с интеллектуальным управлением режимами передачи.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на экспериментальную реализацию предложенной архитектуры на реальных SDR-платформах, количественную валидацию выигрыша по пропускной способности, задержке и энергоэффективности, а также оптимизацию вычислительных затрат алгоритмов выбора MCS для применения на БПЛА с ограниченными ресурсами.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Башкиров А.В. Топологии и алгоритмы сетевого кодирования для группировок БПЛА / А.В. Башкиров, М.В. Хорошайлова, А.С. Демихова // Информационно-управляющие системы. — 2021. — № 4. — С. 32–41.
2. Беккер А.Т. Беспилотные летательные аппараты в системах связи и ретрансляции: обзор архитектур и протоколов / А.Т. Беккер, В.В. Савельев // Труды МФТИ. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 45–62.
3. Бичук В.А. Адаптивное кодирование и модуляция в системах беспроводной связи стандарта LTE / В.А. Бичук, К.Ю. Смирнов // Электросвязь. — 2015. — № 10. — С. 22–26.
4. Боев Н.М. Способы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровых систем связи беспилотных летательных аппаратов / Н.М. Боев // Вестник Сибирского федерального университета. Техника и технологии. — 2014. — Т. 7. — № 3. — С. 412–421.
5. Василевич А.В. Алгоритмы маршрутизации с учётом качества канала в мобильных ad-hoc сетях / А.В. Василевич // Программная инженерия. — 2019. — Т. 10. — № 11. — С. 487–495.
6. Васильев Д.С. Методы передачи потоковых данных в самоорганизующихся сетях беспилотных летательных аппаратов: дис. ... канд. техн. наук / Васильев Данил Сергеевич. — Самара: Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2016. — 176 с.
7. Лебедева М.С. Адаптивные методы модуляции в мобильных радиоканалах / М.С. Лебедева. — Москва: Горячая линия–Телеком, 2018. — 188 с.
8. Лебедева М. С. Использование адаптивного модулирования для повышения эффективности связи БПЛА / М.С. Лебедева // Радиотехника. — 2023. — № 6. — С. 85–93.
9. Товкач И.О. Адаптивные алгоритмы фильтрации параметров движения беспилотных летательных аппаратов по данным сенсорных сетей / И.О. Товкач, С.Я. Жук // Радиоэлектроника и информатика. — 2017. — № 2. — С. 34–41.
10. Ahlswede R. Network information flow / R. Ahlswede R., N. Cai N., S.-Y. R. Li [et al.] // IEEE Transactions on Information Theory. — 2000. — Vol. 46. — № 4. — P. 1204–1216.
11. Chen X. Joint routing and network coding for reliable UAV swarm communications / X. Chen, Y. Li, Z. Zhang // IEEE Access. — 2023. — Vol. 11. — P. 45621–45633.
12. Dan G. Quality-aware data dissemination in mobile ad hoc networks with UAV relays / G. Dan, V Fodor // IEEE Transactions on Mobile Computing. — 2013. — Vol. 12. — № 6. — P. 1159–1172.
13. Fotouhi A. Dynamic base station repositioning to improve performance of drone small cells / A. Fotouhi, M. Ding, M. Hassan // IEEE Transactions on Vehicular Technology. — 2019. — Vol. 68. — № 8. — P. 7778–7789.
14. Frenger P. Performance comparison of HARQ with Chase combining and incremental redundancy for HSDPA / P. Frenger, S. Parkvall, E. Dahlman // Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference. — 2001. — Vol. 3. — P. 1829–1833.
15. Goldsmith A. Wireless communications / A. Goldsmith. — Cambridge : Cambridge University Press, 2005. — 644 p.
16. Gupta L. Survey of important issues in UAV communication networks / L. Gupta, R. Jain, G. Vaszkun // IEEE Communications Surveys & Tutorials. — 2021. — Vol. 23. — № 2. — P. 1123–1152.
17. Keller T. Adaptive modulation techniques for duplex OFDM transmission / T. Keller, L. Hanzo // IEEE Transactions on Vehicular Technology. — 2000. — Vol. 49. — № 5. — P. 1893–1906.
18. Li Y. A deep reinforcement learning approach for adaptive modulation and coding in UAV communications / Y. Li, Z. Zhang, H. Wang // IEEE Wireless Communications Letters. — 2021. — Vol. 10. — № 5. — P. 1127–1131.
19. Liu Y. Reinforcement learning for UAV communication channel selection and adaptation / Y. Liu, M. Chen, W. Saad // IEEE Transactions on Wireless Communications. — 2020. — Vol. 19. — № 7. — P. 4524–4538.
20. Nguyen T. Network coding-based data dissemination in UAV ad hoc networks / T. Nguyen, D. Rosário, E. Cerqueira // Ad Hoc Networks. — 2021. — Vol. 113. — Art. 102414.



21. Rappaport T.S. Wireless communications: principles and practice / T.S. Rappaport. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. — 707 p.
22. Reed J.H. Software radio: a modern approach to radio engineering / J.H. Reed. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. — 576 p.
23. Xue R. Complex field network coding for multi-source UAV relay systems / R. Xue, L. Han, H. Chai // IEEE Access. — 2022. — Vol. 10. — P. 45678–45689.
24. Zeng Y. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges / Y. Zeng, R. Zhang, T.J. Lim // IEEE Communications Magazine. — 2020. — Vol. 54. — № 5. — P. 36–42.
25. Zhang J. Adaptive modulation and coding for UAV communications with channel prediction / J. Zhang, H. Wang, L. Song // IEEE Wireless Communications Letters. — 2022. — Vol. 11. — № 3. — P. 512–516.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bashkurov A.V. Topologii i algoritmi setevogo kodirovaniya dlya gruppировок BPLA [Topologies and network coding algorithms for UAV groupings] / A.V. Bashkurov, M.V. Khoroshailova, A.S. Demikhova // Informatsionno-upravlyayushchie sistemi [Information and Control Systems]. — 2021. — № 4. — P. 32–41. [in Russian]
2. Bekker A.T. Bepilotnie letatelnie apparati v sistemakh svyazi i retranslyatsii: obzor arkhitektur i protokolov [Unmanned aerial vehicles in communication and relay systems: an overview of architectures and protocols] / A.T. Bekker, V.V. Savelev // Trudi MFTI [Proceedings of MIPT]. — 2020. — Vol. 12. — № 3. — P. 45–62. [in Russian]
3. Bichuk V.A. Adaptivnoe kodirovanie i modulyatsiya v sistemakh besprovodnoi svyazi standarty LTE [Adaptive coding and modulation in LTE wireless communication systems] / V.A. Bichuk, K.Yu. Smirnov // Elektrosvyaz [Telecommunications]. — 2015. — № 10. — P. 22–26. [in Russian]
4. Boev N.M. Sposobi povsheniya energeticheskoi i spektralnoi effektivnosti tsifrovikh sistem svyazi bepilotnikh letatelnikh apparatov [Methods for improving energy and spectral efficiency of digital communication systems for unmanned aerial vehicles. Bulletin of Siberian Federal University] / N.M. Boev // Vestnik Sibirskogo federalnogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii [Engineering and Technologies]. — 2014. — Vol. 7. — № 3. — P. 412–421. [in Russian]
5. Vasilevich A.V. Algoritmi marshrutizatsii s uchyotom kachestva kanala v mobilnikh ad-hoc setyakh [Routing algorithms considering channel quality in mobile ad hoc networks] / A.V. Vasilevich // Programmnyaya inzheneriya [Software Engineering]. — 2019. — Vol. 10. — № 11. — P. 487–495. [in Russian]
6. Vasilev D.S. Metodi peredachi potokovikh dannikh v samoorganizuyushchikhsya setyakh bepilotnikh letatelnikh apparatov [Methods for streaming data transmission in self-organizing networks of unmanned aerial vehicles]: dis. ... of PhD in Technical Sciences / Vasilev Danil Sergeevich. — Samara: Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatic, 2016. — 176 p. [in Russian]
7. Lebedeva M.S. Adaptivnie metodi modulyatsii v mobilnikh radiokanalakh [Adaptive modulation methods in mobile radio channels] / M.S. Lebedeva. — Moscow: Hotline–Telecom, 2018. — 188 p. [in Russian]
8. Lebedeva M.S. Ispolzovanie adaptivnogo modulirovaniya dlya povsheniya effektivnosti svyazi BPLA [Application of adaptive modulation to improve the efficiency of UAV communications] / M.S. Lebedeva // Radiotekhnika [Radio engineering]. — 2023. — № 6. — P. 85–93. [in Russian]
9. Tovkach I.O. Adaptivnie algoritmi filtratsii parametrov dvizheniya bepilotnikh letatelnikh apparatov po dannim sensornikh setei [Adaptive algorithms for filtering UAV motion parameters based on sensor network data] / I.O. Tovkach, S.Ya. Zhuk // Radioelektronika i informatika [Radioelectronics and Informatics]. — 2017. — № 2. — P. 34–41. [in Russian]
10. Ahlswede R. Network information flow / R. Ahlswede R., N. Cai N., S.-Y. R. Li [et al.] // IEEE Transactions on Information Theory. — 2000. — Vol. 46. — № 4. — P. 1204–1216.
11. Chen X. Joint routing and network coding for reliable UAV swarm communications / X. Chen, Y. Li, Z. Zhang // IEEE Access. — 2023. — Vol. 11. — P. 45621–45633.
12. Dan G. Quality-aware data dissemination in mobile ad hoc networks with UAV relays / G. Dan, V Fodor // IEEE Transactions on Mobile Computing. — 2013. — Vol. 12. — № 6. — P. 1159–1172.
13. Fotouhi A. Dynamic base station repositioning to improve performance of drone small cells / A. Fotouhi, M. Ding, M. Hassan // IEEE Transactions on Vehicular Technology. — 2019. — Vol. 68. — № 8. — P. 7778–7789.
14. Frenger P. Performance comparison of HARQ with Chase combining and incremental redundancy for HSDPA / P. Frenger, S. Parkvall, E. Dahlman // Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference. — 2001. — Vol. 3. — P. 1829–1833.
15. Goldsmith A. Wireless communications / A. Goldsmith. — Cambridge : Cambridge University Press, 2005. — 644 p.
16. Gupta L. Survey of important issues in UAV communication networks / L. Gupta, R. Jain, G. Vaszkun // IEEE Communications Surveys & Tutorials. — 2021. — Vol. 23. — № 2. — P. 1123–1152.
17. Keller T. Adaptive modulation techniques for duplex OFDM transmission / T. Keller, L. Hanzo // IEEE Transactions on Vehicular Technology. — 2000. — Vol. 49. — № 5. — P. 1893–1906.
18. Li Y. A deep reinforcement learning approach for adaptive modulation and coding in UAV communications / Y. Li, Z. Zhang, H. Wang // IEEE Wireless Communications Letters. — 2021. — Vol. 10. — № 5. — P. 1127–1131.
19. Liu Y. Reinforcement learning for UAV communication channel selection and adaptation / Y. Liu, M. Chen, W. Saad // IEEE Transactions on Wireless Communications. — 2020. — Vol. 19. — № 7. — P. 4524–4538.
20. Nguyen T. Network coding-based data dissemination in UAV ad hoc networks / T. Nguyen, D. Rosário, E. Cerqueira // Ad Hoc Networks. — 2021. — Vol. 113. — Art. 102414.
21. Rappaport T.S. Wireless communications: principles and practice / T.S. Rappaport. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. — 707 p.



22. Reed J.H. Software radio: a modern approach to radio engineering / J.H. Reed. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. — 576 p.
23. Xue R. Complex field network coding for multi-source UAV relay systems / R. Xue, L. Han, H. Chai // IEEE Access. — 2022. — Vol. 10. — P. 45678–45689.
24. Zeng Y. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges / Y. Zeng, R. Zhang, T.J. Lim // IEEE Communications Magazine. — 2020. — Vol. 54. — № 5. — P. 36–42.
25. Zhang J. Adaptive modulation and coding for UAV communications with channel prediction / J. Zhang, H. Wang, L. Song // IEEE Wireless Communications Letters. — 2022. — Vol. 11. — № 3. — P. 512–516.