ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ УСТОЙЧИВЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ ДЛЯ БЕСПИЛОТНИКОВ И ДРОНОВ

С.А. Панова, *магистр*
Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого (Россия, г. Балашиха)

DOI:10.24412/2500-1000-2026-2-1-242-247

Аннотация. *В работе рассматриваются актуальные проблемы обеспечения надежности и непрерывности информационного обмена между пунктами управления и беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) в условиях сложной радиоэлектронной обстановки. Проведен анализ существующих подходов к организации связи, включая использование сотовых сетей, спутниковых каналов и технологий ортогонального частотного мультиплексирования. Выявлены уязвимости стандартных протоколов передачи данных перед преднамеренными помехами и средствами радиоэлектронной борьбы. В качестве решения предложена усовершенствованная математическая модель адаптивного когнитивного канала связи, способная динамически изменять параметры модуляции и кодирования в зависимости от текущего состояния среды и уровня помех. Модель интегрирует методы сверхширокополосной передачи сигналов и помехоустойчивого кодирования на основе полиномиальной системы классов вычетов. Результаты исследования подтверждают, что внедрение предложенных алгоритмов позволяет существенно повысить живучесть канала управления и вероятность безошибочной доставки команд и телеметрии.*

Ключевые слова: *беспилотный летательный аппарат; канал связи; помехоустойчивость; адаптивная модуляция; математическая модель; ортогональное частотное мультиплексирование.*

Стремительное развитие беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и роботизированных систем привело к кардинальной трансформации подходов к ведению разведки, мониторингу инфраструктуры и логистике. Эффективность применения подобных комплексов напрямую зависит от надежности и непрерывности информационного обмена между пунктом управления и бортовым оборудованием. В условиях современной радиоэлектронной обстановки задача обеспечения стабильной передачи команд управления и телеметрии приобретает критический характер. Нарушение целостности канала связи ведет не только к срыву выполнения полетного задания, но и к физической утрате дорогостоящего оборудования, а также создает риски неконтролируемого падения аппарата.

Современные исследования, такие как работа Н.И. Поповского и коллег, указывают на необходимость внедрения высокоскоростных методов передачи данных, включая ортогональное частотное мультиплексирование (OFDM), которое демонстрирует высокую спектральную эффективность [1]. Однако простые методы модуляции зачастую оказываются беззащитными перед преднамеренными помехами. Вопросы интеграции беспилотных комплексов в существующую систему вооружения и гражданскую инфраструктуру рассматриваются в трудах Г.В. Зиброва, где подчеркивается важность тесного взаимодействия разработчиков радиоэлектронных средств с конечными эксплуатантами [10].

Специфика функционирования дронов предполагает работу в условиях сложного рельефа, городской застройки и активного противодействия со стороны средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ). Согласно исследованиям А.Д. Виноградова, современные комплексы радиоподавления способны эффективно блокировать стандартные частотные диапазоны, используемые для управления БПЛА, что диктует необходимость поиска новых архитектурных решений [11]. Существующие подходы, описанные М.И. Заховаевым, классифицируют информацию, циркулирующую в сетях БПЛА, на командную, телеметрическую и целевую, каждая из которых требует различных приоритетов и стратегий защиты [4].

Целью представленной работы является анализ существующих методов организации

связи и разработка усовершенствованной математической модели адаптивного управления параметрами радиоканала, обеспечивающей устойчивость соединения в условиях стохастических возмущений и целенаправленных помех.

Материалы и методы исследования

Исследование базируется на теории распространения радиоволн, методах статистической радиотехники и теории информации. Для анализа эффективности каналов связи применяются вероятностные модели, учитывающие замирания сигнала, многолучевое распространение и доплеровский сдвиг частоты, возникающий вследствие высокой мобильности носителя.

В качестве методологической основы рассматриваются принципы построения сотовых сетей, описанные Е.Ю. Брязгиным, где коммерческая инфраструктура выступает в роли среды передачи данных для управления дронами [5]. Данный подход позволяет обеспечить глобальное покрытие, однако вносит неопределенность, связанную с задержками и загрузкой базовых станций сторонними абонентами. Альтернативой выступают спутниковые каналы, концепции защиты которых изложены в работе В.А. Цимбала. Спутниковая связь обеспечивает независимость от наземной инфраструктуры, но требует применения сложных антенных решеток и алгоритмов компенсации задержек [7].

Особое внимание в работе уделяется методам помехоустойчивого кодирования. И.А. Калмыков предлагает использовать коды полиномиальной системы классов вычетов (ПСКВ), которые обладают уникальными свойствами по обнаружению и исправлению ошибок, возникающих в процессе передачи [3]. Применение подобных непозиционных систем счисления позволяет распараллелить процессы обработки данных, что критически важно для систем реального времени.

Анализ физической среды передачи данных опирается на работы С.В. Петушкова, исследующего влияние атмосферных явлений на оптические и радиоканалы. Турбулентность атмосферы, осадки и туман вносят существенные искажения в сигнал, требуя применения адаптивной оптики или корректирующих кодов на физическом уровне [8]. Для вертолетных типов БПЛА легкого класса К.Д. Титов предлагает использовать сверхширокополосные (СШП) сигналы, которые за счет низкой спектральной плотности мощности обладают скрытностью и высокой разрешающей способностью [9].

В рамках исследования применялся метод имитационного моделирования для оценки вероятности битовой ошибки (BER) при различных отношениях сигнал/шум (SNR) и сценариях воздействия помех. Также рассматривались вопросы организации взаимодействия беспилотников с дорожной инфраструктурой, поднятые Н.А. Ермошиным, что позволяет рассматривать канал связи как элемент глобальной сети интернета вещей (IoT) [6]. А.Д. Лавриенко и соавторы предлагают концепцию использования телефонных каналов в качестве аварийного контура управления, что также учитывается при построении общей архитектуры системы [2].

Результаты и обсуждение

Проведенный анализ выявил ряд существенных ограничений в существующих архитектурах связи. Стандартные протоколы, используемые в коммерческих БПЛА, зачастую оперируют в нелицензируемых диапазонах частот (ISM), которые перегружены бытовыми устройствами. В условиях ведения боевых действий или охраны режимных объектов подобные каналы подавляются в первую очередь.

Использование исключительно одного типа связи, будь то прямой радиоканал «точка-точка» или сотовая сеть, создает единую точку отказа. Как показывает практика, описанная в работе А.Д. Виноградова [11], средства РЭБ способны создавать прицельные помехи высокой плотности. Применение коммерческих сетей LTE/5G, исследованное Е.Ю. Брязгиным [5] и А.Д. Лавриенко [2], хоть и расширяет зону действия, но вводит зависимость от оператора услуг и не гарантирует приоритезацию трафика управления в моменты пиковых нагрузок на сеть.

Спутниковые системы, рассмотренные В.А. Цимбалом [7], обладают высокой автономностью, однако их использование на малых БПЛА ограничено массогабаритными характеристиками терминалов и высоким энергопотреблением. Кроме того, спутниковый канал характеризуется значительной задержкой сигнала, что недопустимо для контуров прямого управления при выполнении манев-

ров уклонения или полета на сверхмалых высотах.

Для решения выявленных проблем предлагается усовершенствованная математическая модель, которую можно обозначить как «Модель адаптивного когнитивного канала» (МАКК). Суть предлагаемого подхода заключается в динамическом изменении параметров модуляции, кодирования и несущей частоты в зависимости от текущего состояния среды и требований к надежности.

Пусть C(t) – вектор состояния канала в момент времени t, определяемый следующим выражением:

$$C(t) = \{SNR(t), \tau(t), \Delta f(t), J(t)\}$$

где $SNR(t)$ – отношение сигнал/шум, $\tau(t)$ – задержка распространения, $\Delta f(t)$ – доплеровское смещение частоты, $J(t)$ – уровень преднамеренных помех.

Целевая функция системы управления связью заключается в максимизации пропускной способности R при условии соблюдения ограничений на вероятность ошибки P_e и задержку T_d:

$$R \to \max \text{ при } \begin{cases} P_e(C(t), M, K) \le P_{req} \\ T_d(C(t), M, K) \le T_{req} \end{cases}$$

где M – выбранная схема модуляции (например, QPSK, 16-QAM, 64-QAM), K – схема кодирования.

Усовершенствование заключается во внедрении в модель блока предсказания состояния канала и использовании гибридного кодирования на основе системы остаточных классов (СОК), предложенной И.А. Калмыковым [3]. В отличие от классических кодов Рида-Соломона, коды СОК позволяют выполнять арифметические операции над закодированными данными, что снижает вычислительную нагрузку на бортовой процессор при проверке целостности.

Вероятность безошибочного приема пакета данных P_{succ} в предлагаемой модели описывается формулой:

$$P_{\text{succ}} = \sum_{i=0}^{t_{err}} C_n^i p^i (1-p)^{n-i}$$

где n – длина кодовой последовательности, t_{err} – исправляющая способность кода, p – вероятность ошибки в символе канала.

Предлагаемая схема (см. рис.) функционирования приемопередающего тракта выглядит следующим образом:

1. Блок анализа спектра: непрерывно сканирует эфир, оценивая уровень шума N_0 и наличие узкополосных или широкополосных помех J. На основе данных, полученных из работ [9] и [11], определяется тип угрозы (заградительная, прицельная или имитационная помеха).

2. Модуль принятия решений: на основе вектора C(t) выбирает оптимальную стратегию.

- Режим «Тишина»: при обнаружении высокого уровня J(t) (работа РЭБ) система переходит на режим СШП-сигналов (UWB) с низкой спектральной плотностью, становясь шумоподобной для пеленгаторов противника.

- Режим «Скорость»: при высоком SNR и отсутствии помех используется модуляция высокого порядка (например, 64-QAM) в сочетании с OFDM, что соответствует рекомендациям Н.И. Поповского [1] для передачи потокового видео высокого разрешения.

- Режим «Надежность»: при ухудшении условий включается избыточное кодирование на основе ПСКВ [3] и дублирование пакетов по параллельным каналам (например, сотовая связь + прямой радиоканал), реализуя принцип диверсификации, описанный в работах [2] и [5].

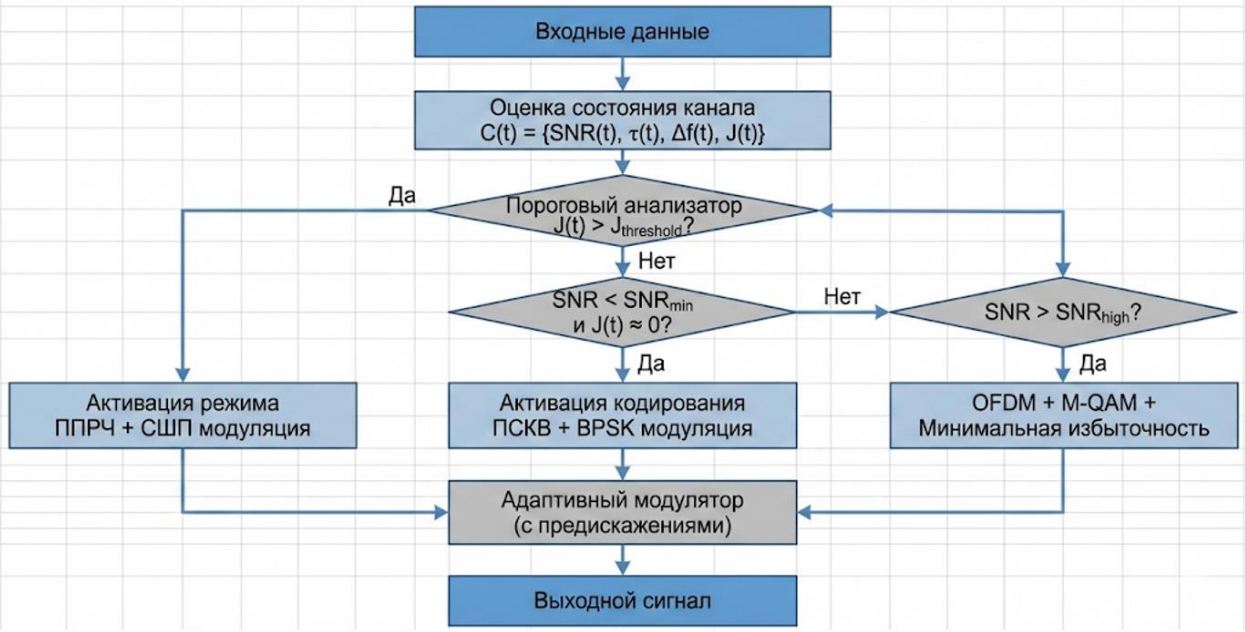

Рис. Схема усовершенствованного алгоритма выбора параметров связи

Выходной сигнал формируется посредством адаптивного модулятора, учитывающего необходимость предварительных искажений сигнала (Pre-distortion) для компенсации нелинейности усилителя мощности.

Применение предложенной математической модели позволяет существенно повысить живучесть канала связи. В то время как классические системы с фиксированными параметрами теряют связь при снижении SNR ниже порогового значения (эффект «обрыва»), адаптивная система плавно снижает скорость передачи данных, сохраняя при этом управляемость аппаратом. Использование кодов ПСКВ, согласно данным [3], обеспечивает выигрыш в энергетике канала на 2-3 дБ по сравнению с традиционными сверточными кодами при равной вероятности ошибки.

Интеграция сведений об инфраструктуре, описанная Н.А. Ермошиным [6], позволяет системе заранее прогнозировать зоны радиотени (например, за высокими зданиями или в тоннелях) и превентивно переключаться на альтернативные каналы связи или изменять высоту полета. Таким образом, канал связи перестает быть пассивной «трубой» для передачи данных и трансформируется в интеллектуальную подсистему БПЛА, активно участвующую в обеспечении безопасности полета.

Важным аспектом является также учет особенностей передачи информации, выделенных М.И. Заховаевым [4]. Телеметрия и команды управления имеют малый объем, но критичны к задержкам и достоверности. Видеопоток, напротив, допускает потери пакетов, но требователен к полосе пропускания. Предлагаемая модель МАКК осуществляет разделение потоков (Quality of Service – QoS) на физическом уровне, присваивая командным пакетам наиболее помехоустойчивые тайм-слоты и частоты в спектре OFDM, в то время как видеоданные передаются на поднесущих с менее жесткими параметрами кодирования.

Рассмотрение атмосферного канала связи, затронутое в работе [8], добавляет в модель коэффициент затухания α_{atm}, зависящий от влажности и наличия аэрозолей. В условиях плохой видимости оптические и лазерные каналы связи, часто рассматриваемые как альтернатива радиоканалу из-за их незаметности, становятся неработоспособными. В описываемой модели предусмотрен автоматический отказ от использования оптического диапазона при детектировании соответствующих метеоусловий бортовыми датчиками.

Заключение

Проведенное исследование особенностей построения устойчивых каналов связи для беспилотных летательных аппаратов позволило сформулировать комплексный подход к решению задачи обеспечения надежного управления в условиях сложной помеховой обстановки. Анализ литературных источников показал, что применение отдельных разрозненных методов – будь то только использование сотовых сетей, спутниковой связи или

специфических видов модуляции — не обеспечивает требуемого уровня надежности при воздействии современных средств радиоэлектронного подавления.

Разработанная в ходе работы математическая модель адаптивного когнитивного канала (МАКК) объединяет преимущества различных подходов. Интеграция технологии OFDM для обеспечения высокой пропускной способности, помехоустойчивого кодирования на основе полиномиальной системы классов вычетов для защиты критически важных данных и использования сверхширокополосных сигналов для скрытности позволяет создать гибкую систему связи. Данная система способна самостоятельно диагностировать состояние эфира и мгновенно перестраивать свою архитектуру, адаптируясь под текущие угрозы.

Практическая значимость представленного решения заключается в возможности его программной реализации на базе существующих программно-определяемых радиосистем (SDR), что не требует полной замены аппаратной части парка БПЛА. Дальнейшие исследования целесообразно направить на оптимизацию алгоритмов переключения между режимами с использованием методов машинного обучения, что позволит системе не просто реагировать на изменения среды, но и предсказывать их, еще более повышая общую устойчивость комплекса. Обеспечение бесперебойной связи с беспилотными средствами является залогом их эффективного и безопасного применения как в гражданской сфере, так и при решении задач обороны и безопасности.

Библиографический список

1. Popovskiy N.I. Features of construction of fiber-optic communication lines with orthogonal frequency-division multiplexing / N.I. Popovskiy, V.V. Davydov, V.Y. Rud // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. – 2022. – Vol. 15, № S3.2. – P. 178-183. – DOI 10.18721/JPM.153.233. – EDN HVSYYK.

2. Лавриенко А.Д. Возможность построения аварийного канала управления БПЛА на базе телефонных каналов коммерческих систем связи / А.Д. Лавриенко, В.В. Каштанов, Ю.В. Алферов // Наука настоящего и будущего. – 2024. – Т. 3. – С. 144-147. – EDN OJEVLH.

3. Калмыков И.А. Метод построения помехоустойчивого кода полиномиальной системы классов вычетов, обеспечивающего допустимую вероятность ошибочного приёма в канале связи / И.А. Калмыков, Д.В. Духовный // Научные исследования: итоги и перспективы. – 2023. – Т. 4, № 1. – С. 15-22. – DOI 10.21822/2713-220X-2023-4-1-15-22. – EDN PJVTYK.

4. Заховаев М.И. Информация, циркулирующая в сети БПЛА и особенности ее передачи по каналам связи / М.И. Заховаев, В.В. Реутин, Е.О. Шмаков // Академическая публицистика. – 2023. – № 10-2. – С. 80-84. – EDN MGZGBP.

5. Брязгин Е.Ю. Особенности управления БПЛА с использованием каналов сотовой связи / Е.Ю. Брязгин // Современные средства связи. – 2024. – Т. 1, № 1. – С. 183-184. – EDN SKYHXQ.

6. Ермошин Н.А. Особенности организации канала связи для взаимодействия безэкипажных транспортных средств с элементами дорожной инфраструктуры и между собой / Н.А. Ермошин, Д.Е. Давыденко // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооружённых Сил Российской Федерации. – 2022. – № 4(26). – С. 104-109. – EDN NIYMIR.

7. Цимбал В.А. Концепции построения помехозащищённых каналов спутниковой связи / В.А. Цимбал, В.А. Вечтомов // Известия Института инженерной физики. – 2025. – № 3(77). – С. 21-25. – EDN HGCLDR.

8. Петушков С.В. Построение системы наведения и стабилизации (СНС) для квантового распределения ключа (КРК) в атмосферном канале связи / С.В. Петушков, В.В. Мурашкин, В.Н. Григорьев, Д.А. Бояров // Лазерно-информационные технологии (ЛИТ-2023): Труды XXXI международной научной конференции, Новороссийск, 11-16 сентября 2023 года. – Новороссийск: Издательство филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» в г. Новороссийске, 2023. – С. 316-317. – EDN XBQQSK.

9. Титов К.Д. Принципы построения сверхширокополосного канала связи на беспилотном летательном аппарате вертолетного типа легкого класса / К.Д. Титов // Труды МАИ. – 2022. – № 122. – DOI 10.34759/trd-2022-122-12. – EDN IWJPXI.

10. Зибров Г.В. Инициатива+интеграция=современное вооружение. Эффективное взаимодействие военно-воздушной академии с предприятиями оборонно-промышленного комплекса – фактор инновационного развития военной техники / Г.В. Зибров, О.В. Лавричев // Вестник военного образования. – 2020. – № 1(22). – С. 18-22. – EDN YOTPOL.

11. Виноградов А.Д. Развитие наземной мобильной техники радиоподавления радиосвязи на основе ее оснащения беспилотными вертолетами / А.Д. Виноградов, И.В. Зайцев, А.А. Молев // Военная мысль. – 2017. – № 4. – С. 56-60. – EDN YKGSYH.

FEATURES OF BUILDING STABLE COMMUNICATION CHANNELS FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES AND DRONES

S.A. Panova, *Master's degree*
Peter the Great Military Academy of Strategic Missile Forces
(Russia, Balashikha)

Abstract. *The paper discusses current issues of ensuring the reliability and continuity of information exchange between control points and unmanned aerial vehicles (UAVs) in a complex radio-electronic environment. An analysis of existing approaches to organizing communication, including the use of cellular networks, satellite channels, and orthogonal frequency-division multiplexing technologies, is carried out. The vulnerabilities of standard data transmission protocols to intentional interference and electronic warfare means are identified. As a solution, an improved mathematical model of an adaptive cognitive communication channel is proposed, which is capable of dynamically changing modulation and coding parameters depending on the current state of the environment and interference level. The model integrates methods of ultra-wideband signal transmission and error-correcting coding based on a polynomial residue number system. The study results confirm that the implementation of the proposed algorithms significantly increases the survivability of the control channel and the probability of error-free delivery of commands and telemetry.*

Keywords: *unmanned aerial vehicle; communication channel; noise immunity; adaptive modulation; mathematical model; OFDM.*