

Труды МАИ. 2025. № 141  
Trudy MAI. 2025. No. 141. (In Russ.)

Научная статья

УДК 621.396.9

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184502>

EDN: <https://www.elibrary.ru/LFTNUZ>

## **ОСОБЕННОСТИ РАДИОСИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЦЕЛЕВЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА – ВЫСОТНОГО МОНТАЖНИКА**

**Максим Васильевич Коротков<sup>1</sup>, Алексей Юрьевич Гетманцев<sup>2</sup>**✉

<sup>1</sup>Государственный летно-испытательный центр им. В.П. Чкалова

Минобороны России, Ахтубинск, Астраханская область, Российская Федерация

<sup>2</sup>Филиал «Взлет» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), Ахтубинск, Астраханская область, Российская Федерация

<sup>1</sup>[maksim.korotkov14@gmail.com](mailto:maksim.korotkov14@gmail.com)

<sup>2</sup>[tomamens@mail.ru](mailto:tomamens@mail.ru)✉

**Аннотация.** В статье рассмотрены особенности проектирования помехоустойчивого радиоканала управления целевым оборудованием беспилотного летательного аппарата (БЛА), представляющим собой четыре шестизвенных манипулятора с захватами и/или быстросъемными многофункциональными электроинструментами. Приведена структурная схема радиоканала управления целевым оборудованием при выполнении функционала высотного монтажника.

**Ключевые слова:** беспилотный летающий манипулятор, радиоканал управления, помехоустойчивое кодирование

**Для цитирования:** Коротков М.В., Гетманцев А.Ю. Особенности радиосистемы управления целевым оборудованием беспилотного летательного аппарата – высотного монтажника // Труды МАИ. 2025. № 141. URL:

Original article

## **FEATURES OF THE RADIO CONTROL SYSTEM FOR THE TARGET EQUIPMENT OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE – A HIGH-ALTITUDE INSTALLER**

**Maxim V. Korotkov<sup>1</sup>, Alexey Yu. Getmantsev<sup>2</sup>**✉

<sup>1</sup>V.P. Chkalov State Flight Test Center of the Russian Ministry of Defense,  
Akhtubinsk, Astrakhan region, Russian Federation

<sup>2</sup>Branch of the "Take-off" of the Moscow Aviation Institute (National Research University),  
Akhtubinsk, Astrakhan region, Russian Federation

<sup>1</sup>[maksim.korotkov14@gmail.com](mailto:maksim.korotkov14@gmail.com)

<sup>2</sup>[tomamens@mail.ru](mailto:tomamens@mail.ru)✉

**Abstract.** The article discusses the design features of an interference-resistant radio channel for controlling the target equipment of an unmanned aerial vehicle (UAV), which consists of four six-pin manipulators with grips and/or quick-release multifunctional power tools.

The topic of consideration is the radio control system for the target equipment of an unmanned aerial vehicle – a high-altitude installer and its essential features. The purpose of the work: to determine the composition and individual key parameters of the UAV manipulator radio control system. Applied methods: methods of functional analysis, structural synthesis of radio transmitters and radio receivers, methods of noise-resistant encoding of information, methods of analysis and synthesis of antenna systems, etc. The methodology of the work consists in the step-by-step synthesis of the main elements of the radio control system of the target equipment of the UAV with manipulators, with an emphasis on high noise immunity, since the UAV performs the role of a high-altitude installer on radio towers in conditions of significant electromagnetic interference. The result of the work is the synthesis of a refined structural diagram of a radio line with the binding of elements and nodes of the circuit to the calculated values of the transmitter power, to certain

parameters of the information and noise-resistant frame of the transmitted signal, the polarization parameters of the emitted pulse, as well as taking into account the noise-resistant properties of the information encoding method used. It is shown that the given calculated values make it possible to successfully implement an independent radio control channel for four six-pin manipulators with grips and quick-release multifunctional power tools. The field of application of the results is of high practical importance, since in world practice a combination of manipulators and unmanned aerial vehicles is found in single experimental design works. In addition to the functionality of a high-rise installer, a UAV with manipulators can be used in high-rise construction work, extraction of people during emergency rescue operations, providing the UAV operator with safe working conditions.

**Keywords:** unmanned flying manipulator, radio control channel, noise-resistant coding

**For citation:** Korotkov M.V., Getmantsev A.Yu. Features of the radio control system for the target equipment of an unmanned aerial vehicle – a high-altitude installer. *Trudy MAI*. 2025. No. 141. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=184502>

Активное внедрение роботизированных систем, происходящее в последние годы, позволяет заменить человека при выполнении многих опасных и особо опасных работ. К таким работам относятся все операции, связанные с проведением сложных технологических процессов на большой высоте или в условиях воздействия жестких электромагнитных излучений. Применяемые в настоящее время беспилотные летательные аппараты (БЛА) используются в основном для высокоточной фото- и видеосъемки, а также для перевозки грузов незначительной массы. В ходе дальнейшего расширения функциональных возможностей БЛА на них стали устанавливать манипуляторы различных типов: выдвигающиеся, многозвенные, дельтаобразные и т.д. [1-4]. Добавление бортовой системы манипулирования на БЛА существенно усложняет алгоритмы его пилотирования из-за смещения центровочных и массогабаритных характеристик. Физическое взаимодействие манипулятора с различными подвижными и неподвижными объектами затрудняет процесс стабилизации движения БЛА, что, в свою очередь, приводит к трудностям позиционирования БЛА и снижению точности наведения

захвата манипулятора. Однако преимущества, которые получает БЛА при оснащении его одним или несколькими манипуляторами с закрепленными на них быстросъемными инструментами, многократно превосходят издержки, возникающие за счет усложнения беспилотной системы [5-8]. Прогрессивное развитие автоматизации и роботизации во всех отраслях экономики приводит к неизбежной замене опасного ручного труда на автоматизированные или полностью автоматические технологии. В связи с вышеизложенным, разработка БЛА с манипуляторами и многофункциональными инструментами в настоящее время является важным и перспективным технологическим решением, например, для замены человека опасной профессии – высотного монтажника (радиомонтажника).

Безусловно, дополнительная целевая нагрузка в виде манипуляторов и специального монтажного оборудования требует повышенных энергоресурсов БЛА для выполнения полетов и проведения монтажных работ. Существенными являются ограничения на полеты такого БЛА в сильный ветер либо во время осадков, однако в такую погоду и высотные специалисты-монтажники не выполняют каких-либо ремонтных или монтажных работ. Проблема совершенствования автоматизированных высотно-монтажных систем и средств является весьма острой. Во всем мире сейчас проводятся активные научные исследования и опытно-конструкторские работы по внедрению перспективных радиоэлектронных и роботизированных (беспилотных) технологий на наземные, воздушные и морские высокоподвижные транспортные платформы, однако разработка прототипов БЛА с манипуляторами проводится лишь единичными компаниями. Актуальность темы настоящей статьи определяется потребностью внедрения перспективных цифровых технологий в средства радиоуправления целевой нагрузкой специализированных БЛА [1, 4, 7-9]. Новизна исследования заключается в анализе существующих и синтезе новых способов управления уникальной многофункциональной целевой нагрузкой БЛА в виде роботизированных манипуляторов за счет использования перспективных элементов цифровой радиотехники.

Имеется мировая тенденция расширения областей применения цифровых радиоэлектронных технологий в робототехнике за счет разработки новых систем

передачи данных и радиуправления. Тема статьи имеет ярко выраженную практическую значимость, т.к. исследуемая радиосистема командного радиуправления может применяться в дистанционных беспроводных технологических процессах практически любой технической направленности.

Перечень типовых задач, которые в настоящее время успешно выполняют радиоэлектронные и вычислительно-информационные системы с БЛА:

- мониторинг воздушной и наземной обстановки в реальном масштабе времени;

- фотографирование и видеосъемка объектов в высоком качестве;

- построение 3D-моделей производственных объектов по результатам сканирования;

- интеграция данных в единое цифровое пространство 3D-копий и соединение отсканированного объекта с проектной документацией;

- контроль выполнения административных задач (контроль техники безопасности, автоматическая фиксация отсутствия систем защитных ограждений или страховочных механизмов, автоматическая фиксация нарушений правил дорожного движения, контроль логистических операций и т.д.).

Однако системы с БЛА, осуществляющие физическое взаимодействие с объектами при помощи встроенных манипуляторов, многократно расширяют область полезного применения дронов. Добавляются, например, такие возможности:

- ремонт высотных объектов;

- техническое обслуживание на мосту, на фасаде или крыше высотного здания;

- точная доставка и установка антенн и т.п. в любую внешнюю или внутреннюю точку объекта;

- присоединение или разъединение различных элементов на высоте или в воздухе, например, резка воздушных кабелей;

- доставка спасательных буйев и тросов на море;

- доставка средств спасения при пожаре в высотном здании;

- посадка и удержание БЛА на проводах, перилах, мачтах антенн и т.п.;

– устранение препятствий, которые блокируют продвижение к целевой точке, например, очистка завалов в опасной зоне [1-2].

В настоящее время манипуляторами обычно оснащаются только наземные роботизированные транспортные средства ввиду отсутствия в этом случае проблем со стабилизацией центра масс движущегося объекта [4]. Беспилотные системы с управляемыми манипуляторами и захватами чаще всего размещаются на мультироторных платформах и поэтому называются ММ-UAV (Mobile Manipulating Unmanned Aerial Vehicles). Разработка беспилотных летательных манипуляторов (БЛМ) по сравнению с разработкой обычного БЛА сопровождается значительно большим числом трудностей по причине отсутствия стабильной платформы в воздухе. БЛМ будет с высокой вероятностью находиться в некоторой области пространства, при этом он не будет иметь постоянных точных координат, особенно при функционировании под открытым небом [7-9].

В большинстве случаев манипулятор монтируется непосредственно в нижнюю часть платформы БЛА [6], при этом движущийся манипулятор с захватом и грузом во время полета БЛА значительно изменяет распределение масс и моментов сил. Возникают дополнительные динамические силы реакции, которые должны быть компенсированы системой управления при помощи силовой установки БЛА [8]. Результаты моделирования [9] показали, что манипулятор создает наименьшее количество проблем со стабилизацией БЛА в том случае, когда все его звенья движутся одновременно, а центр массы манипуляторов с грузом находится ниже центра массы всего БЛМ. Тем не менее, мультикоптер имеет колебания, усложняющие стабилизацию во время полета. Применение БЛМ для высотных-монтажных работ в таком случае должно быть разделено по виду типовых операций на следующие группы:

- 1) доставка грузов, инструмента и деталей к месту монтажа, при этом высокая точность стабилизации не требуется;
- 2) монтаж / демонтаж, который должен производиться с высокой точностью при неподвижной платформе;
- 3) монтаж / демонтаж в воздухе, когда требуется не только стабилизация

собственной платформы БЛА, но и синхронизация в воздушном потоке с движущимися объектами монтажа.

Типовых операций третьего вида в настоящее время выполняется меньше всего. Для этого используются автовышки и другие специализированные наземные высотно-подъемные средства, либо монтаж полностью переносится на землю, после чего собранное изделие поднимают.

На рис. 1 приведена упрощенная схема всех систем управления и передачи информации между БЛА и пультом управления оператора. Показано, что управление целевым оборудованием БЛМ должно осуществляться по отдельному радиоканалу для исключения каких-либо помех и перегрузки полетного процессора.

Группу технологических операций по подготовке к полету выполняет оператор. Остальные технологические операции, касающиеся БЛМ, выполняют и непрерывно контролируют в автоматическом режиме микропроцессор БЛА и микропроцессор управления целевым оборудованием.

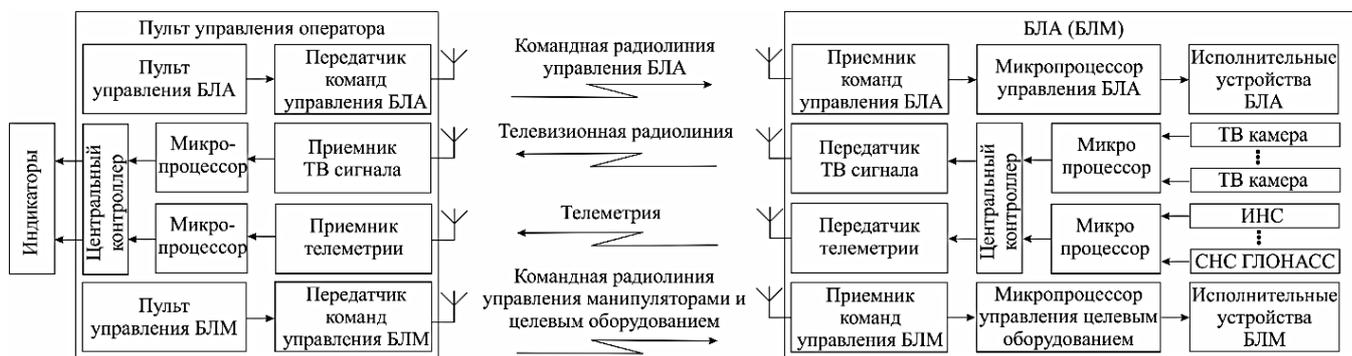


Рисунок 1 - Упрощенная схема управления и передачи информации

Для жесткой фиксации на объекте монтажа БЛМ должен быть надежно зафиксирован при помощи не менее чем трех манипуляторов. Не менее чем один манипулятор необходим для работы с инструментом и скрепляемыми деталями. Каждый манипулятор должен иметь не менее шести звеньев для обеспечения перемещения в трех плоскостях и поворота по трем осям. Кроме того, захват на конце каждого манипулятора должен иметь не менее 2 степеней движения: поворот вокруг своей оси и сжатие/разжатие. На рис. 2 показан БЛМ с четырьмя шестизвеньевыми манипуляторами, заканчивающимися захватами с двумя степенями свободы. На манипуляторе в захвате может быть закреплено от 1 до 4 быстросъемных

электроинструмента: шуруповёрта, дрели, заклепочника и/или гайковерта. Для включения каждого инструмента должны быть предусмотрены независимые разъемы электропитания с дистанционными выключателями-регуляторами оборотов.

Из-за необходимости смены направления поворота каждым элементом манипулятора (или инструмента), в команде должна учитываться возможность отрицательного знака напряжения питания в случае изменения направления поворота узла БЛМ или направления вращения электроинструмента. Поэтому для управления манипуляторами и инструментом должен применяться симметричный линейный код [10].



Рисунок 2—Использование БЛА с манипуляторами в качестве монтажника

Получателем информации управления БЛМ является микропроцессор управления целевым оборудованием. Радиоканал управления БЛМ (по сравнению с оптическими и инфракрасными каналами управления) позволяет снять пространственные ограничения на перемещение БЛМ в пределах дальности устойчивой радиосвязи (обычно не более 10 км), обладая нечувствительностью к пыли, ветру и осадкам. К недостаткам радиолиний следует отнести подверженность радиопомехам, для компенсации которых применяются специальные помехоустойчивые способы передачи данных. В том случае, если мощности аккумуляторов БЛА с манипуляторами недостаточно для продолжительной энергетически нагруженной работы, БЛМ может поднять с собой к объекту монтажа питающий кабель. В этом случае энергетические характеристики БЛМ будут резко

увеличены в пределах расстояния, определяемого длиной кабеля.

В настоящей статье рассматривается один из четырех радиоканалов, показанных на рис.1, а именно – радиоканал управления БЛМ. Для его реализации используется симплексный (однонаправленный) тип радиосвязи – от пульта управления к БЛМ. Структурная схема радиосистемы управления БЛМ приведена на рис.3. Оператор при помощи пульта управления осуществляет дистанционное радиоуправление положением четырех манипуляторов и четырех контроллеров, выполняющих функции выключателей-регуляторов оборотов быстросъемного электроинструмента. Датчики пульта управления опрашиваются микропроцессором пульта управления с частотой в несколько герц, а затем сформированный двоичный симметричный последовательный код поступает в блок формирования помехоустойчивого кода (БФПК), где производится помехоустойчивое кодирование сигнала. Закодированная кодовая информационная последовательность поступает в ОФМ-модулятор высокочастотной передающей части (ВЧ ПРД), а затем излучается антенной. В высокочастотной части приемника принятый антенной сигнал демодулируется – из высокочастотного сигнала извлекается помехозащищенный закодированный двоичный сигнал с двоичной импульсно-кодовой модуляцией. Декодер помехоустойчивого кода (ДПК) выделяет информационные символы из принятой кодовой комбинации, проверяет их на соответствие разрешенному алфавиту и исправляет обнаруженные ошибки [11-13]. Далее команды управления вместе с тактовыми синхросигналами и служебной информацией поступают в микропроцессор управления БЛМ и целевым оборудованием. С соответствующих портов его выходов команды управления передаются к исполнительным устройства БЛМ:

- в блок манипуляторов на четыре контроллера шаговых двигателей (КШД);
- в блок электроинструментов на четыре контроллера инструментов.

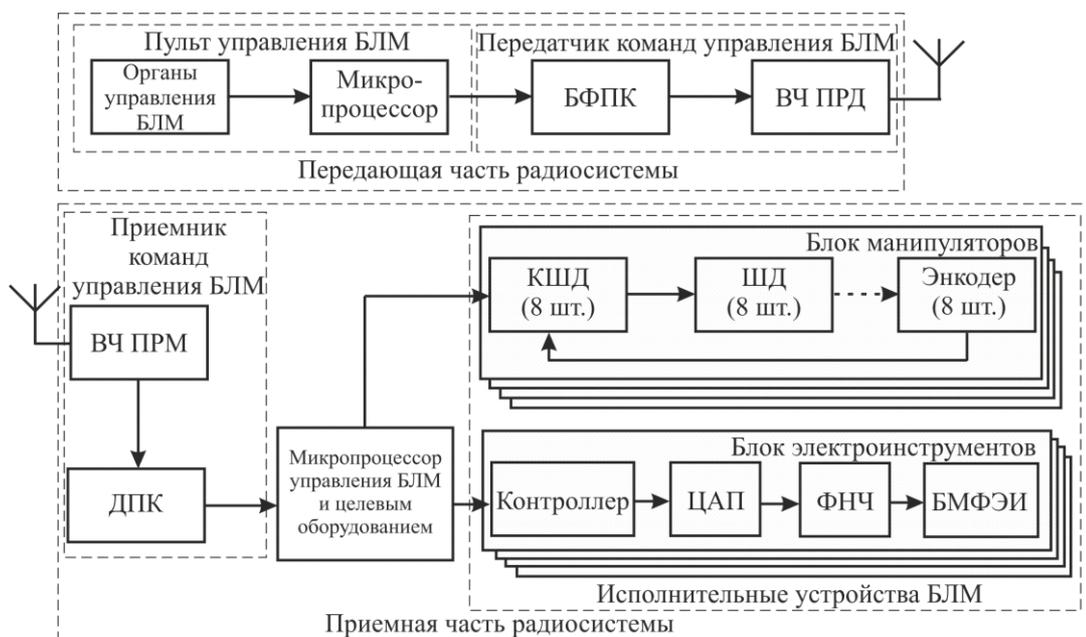


Рисунок 3 – Структурная схема радиосистемы управления БЛМ

КШД передают определенное число импульсов заданной полярности на шаговые двигатели (ШД), приводящие в движение непосредственно манипуляторы и захваты. Для непрерывного контроля за углом поворота каждого ШД применяются независимые датчики – энкодеры, передающие точную информацию о текущем положении вала ШД в КШД. Контроллеры блока электроинструментов через биполярные цифро-аналоговые преобразователи и фильтры нижних частот передают аналоговый сигнал требуемой полярности на быстросъемный многофункциональный электроинструмент (БМФЭИ). Тем самым обеспечивается радиоуправление независимо четырьмя шестизвенными манипуляторами с захватами и четырьмя электроинструментами.

Выбор вида модуляции зависит от предъявляемых тактико-технических требований к проектируемой радиотехнической системе:

- работать в жестких условиях радиопомех;
- обеспечивать максимально возможное значение отношения «сигнал/шум» при вероятности ошибки меньше  $10^{-6}$ ;
- блоки должны иметь наименьшую массу, поскольку установлены на БЛА и на ПУ;
- иметь минимальное энергопотребление для снижения массы источника питания на БЛА.

Предполагается воспользоваться наиболее помехоустойчивым видом модуляции – фазовой манипуляцией (ФМ). Этот вид модуляции требует наименьшей мощности передатчика при заданной вероятности ошибки по сравнению с другими видами модуляции (рис. 4) [13]. Существенным недостатком ФМ является возможность эффекта «обратной работы», когда вместо «1» может идентифицироваться «0» и наоборот, из-за случайных скачков фазы и неправильной демодуляции первого ФМ-сигнала. Для предотвращения этого эффекта применяется относительная фазовая манипуляция (ОФМ), имеющая несколько худшие показатели (рис. 4). При ОФМ модулирующая информация закладывается не в абсолютном значении фазы высокочастотного сигнала, а в разности фаз по сравнению с предыдущим тактовым интервалом. Поэтому выбран вид модуляции – ОФМ, способ приема – квазикогерентный. Логической единице «1» будет соответствовать сохранение фазы высокочастотного колебания предыдущего тактового периода, а логическому нулю «0» - скачкообразное изменение фазы на 180 градусов по сравнению с фазой предыдущей тактовой посылки.

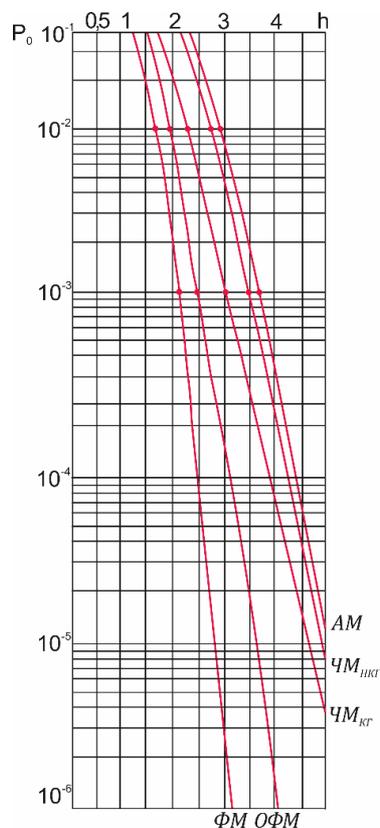


Рисунок 4 – Вероятности ошибки при различных видах модуляции (манипуляции) в зависимости от отношения «сигнал/шум»

В командной радиолинии сигналы о текущем положении органов управления должны передаваться с достаточно высокой частотой опроса. Общее количество независимых типов команд равно 36:

24 команды – для управления четырьмя манипуляторами с 6 ШД на каждом;

8 команд – для поворота и сжатия четырех «кистевых» захватов;

4 команды – на включение и выбор скорости четырех электроинструментов.

$$6 \cdot 4 + 2 \cdot 4 + 4 = 36.$$

Период передачи всех 36 команд должен быть меньше постоянной времени БЛМ, как малоинерционного звена. Поскольку постоянная времени манипуляторов ориентировочно составляет  $\tau \approx 0,2$  с, частота опроса каждого датчика должна быть:

$$f_{\text{опроса}} \geq \frac{1}{\tau}$$

Следовательно, частота опроса  $f_{\text{опроса}}$  каждого датчика пульта управления должна быть не менее 5 Гц. Для одновременной передачи 36 видов команд с указанной частотой применяется временное разделение каналов (ВРК) [10]. К достоинствам ВРК следует отнести простоту аппаратной реализации, отсутствие необходимости настраивать большое количество колебательных контуров. Полный кадр сигнала, передаваемый по командной радиолинии управления БЛМ за  $\tau = 0,2$  с, должен содержать 36 команд (слов). В начале каждого передаваемого пакета (кадра) должна передаваться специальная кодовая комбинация, содержащая сигнал кадровой синхронизации.

Анализ литературы по роботизированным системам показывает:

- точность наведения любого звена манипулятора должна быть не хуже  $0,5^\circ$ , что соответствует линейной точности 4,35 мм при длине плеча манипулятора 0,5 м;
- полный поворот любого звена манипулятора вокруг своей оси на  $360^\circ$  должен выполняться за время 1 с.

Для поворота манипулятора на любой угол в пределах полного круга по часовой стрелке с заданной точностью число вариантов поворота должно быть не менее:

$$N_{\text{команд } 1} = \frac{360^\circ}{0,5^\circ} = 720.$$

Таким образом, за интервал опроса датчиков  $\tau = 0,2$  с требуемое число вариантов поворота уменьшается до значения

$$N_{\text{команд } 0,2} = N_{\text{команд}} \cdot \tau; \quad N_{\text{команд } 0,2} = 720 \cdot 0,2 = 144.$$

Команды управления должны передаваться с таким шагом квантования, чтобы обеспечивалась заданная точность поворота каждого шагового двигателя манипулятора. Для передачи такого объема информации необходима разрядность кода не менее

$$R \geq \log_2(N_{\text{команд } 0,2}); \quad R \geq 7,17 \approx 8 \text{ бит.}$$

С учетом знакового разряда применяемого симметричного кода, учитывающего направления поворота ШД по часовой или против часовой стрелки, число разрядов в слове становится равным  $R = 9$  бит.

Для управления скоростью вращения БМФЭИ количество вариантов скоростей при 5-ти разрядном слове равно:

$$K = 2^R, \quad K = 2^5 = 32.$$

Такого количества вариантов скоростей достаточно для существующего БМФЭИ. Старший разряд в слове команды используется для определения направления вращения вала БМФЭИ по часовой или против часовой стрелки. Общее количество разрядов в команде управления для каждого БМФЭИ будет равно 6.

Таким образом, длина каждого из тридцати двух слов – по 9 бит, четырех слов – по 6 бит. Заголовком кадра будет использована кодовая посылка кадровой синхронизации длиной  $N_{\text{КС}} = 8$  бит, содержащая информационные сигналы «1». Этот синхросигнал представляет собой уникальное зарезервированное кодовое слово, которое запрещено использовать в информационной части посылки.

Общая длина кадра будет равна:

$$N_{\text{кадра}} = N_{\text{команд } 0,2} \cdot R + N_{\text{КС}}; \quad N_{\text{кадра}} = 32 \cdot 9 + 4 \cdot 6 + 8 = 320 \text{ бит}$$

При частоте опроса  $F_{\text{опроса}} = 5$  Гц с пульта управления за 1 секунду должно уходить 5 кадров с общим объемом информации:

$$N_{\text{объема}} = N_{\text{кадра}} \cdot F_{\text{опроса}}; \quad N_{\text{объема}} = 320 \cdot 5 = 1600 \text{ бит.}$$

Это соответствует скорости передачи 1600 бит/с или бод. Длительность передачи одного информационного символа  $\tau_{\text{имп}}$  и цикла в целом  $T_{\text{ц}}$  будут составлять соответственно:

$$\tau_{\text{имп}} = \frac{1}{N_{\text{объема}}}; \quad \tau_{\text{имп}} = 0,625 \text{ мс.}$$

$$T_{\text{ц}} = N_{\text{кадра}} \cdot \tau_{\text{имп}}; \quad T_{\text{ц}} = 320 \cdot 0,625 = 0,2 \text{ с}$$

Структура информационного кадра представлена на рис. 5.

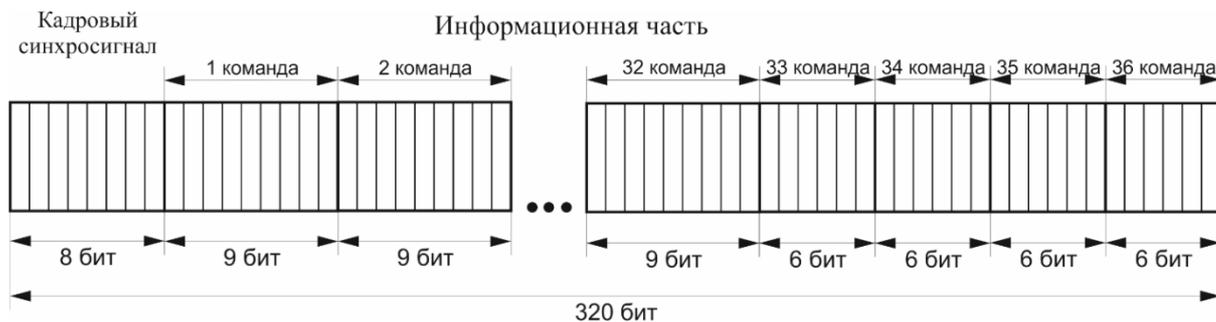


Рисунок 5 – Структура информационного кадра

Для дополнительного повышения помехоустойчивости [14-18] будет применяться кодирование информационных посылок ортогональным кодом (16,8), при котором к каждому информационному биту будет добавляться проверочный бит. При этом полный кадр будет содержать уже не 320, а 640 бит информации (рис. 6).

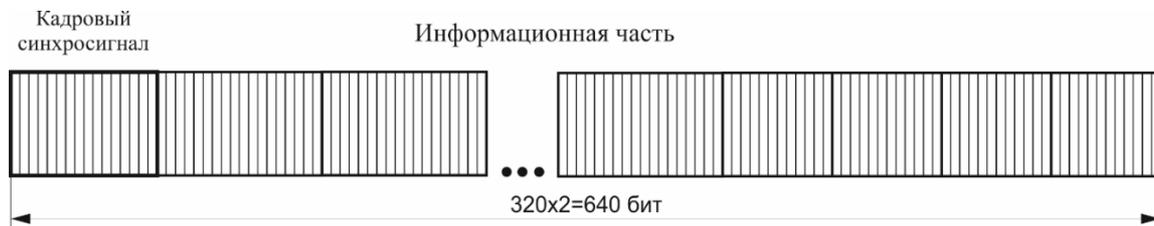


Рисунок 6 – Структура информационного кадра после помехоустойчивого кодирования

Длительность информационного импульса в этом случае уменьшится в 2 раза:

$$\tau_{\text{имп кодир}} = \frac{\tau_{\text{имп}}}{2}; \quad \tau_{\text{имп кодир}} = \frac{0,625}{2} = 0,3125 \text{ мс.}$$

Несущая частота радиосигнала выбрана 120 МГц. При использовании ОФМ-сигналов необходимо, чтобы длительность передаваемых элементарных информационных импульсов была равна или кратна периоду несущей частоты:

$$T_{\text{вч}} = \frac{1}{120 \cdot 10^6}; \quad T_{\text{вч}} = 8,33 \cdot 10^{-9} \text{ с} = 8,33 \text{ нс}$$

За один период закодированного информационного сигнала может быть передано следующее число высокочастотных колебаний:

$$N_{\text{ВЧ}} = \frac{\tau_{\text{имп кодир}}}{T_{\text{ВЧ}}}; \quad N_{\text{ВЧ}} = \frac{0,3125 \cdot 10^{-3}}{8,33 \cdot 10^{-9}} = 37500.$$

Такого количества колебаний достаточно для устойчивой обработки ОФМ-сигнала.

Скорость передачи закодированной информации будет равна:

$$V_{\text{инф кодир}} = \frac{1}{\tau_{\text{имп кодир}}}; \quad V_{\text{инф кодир}} = \frac{1}{0,3125 \cdot 10^{-3}} = 3200 \frac{\text{бит}}{\text{с}}.$$

Как уже отмечалось выше, для повышения достоверности принимаемой информации использовано помехоустойчивые кодированием ортогональным кодом  $(n, k) = (16, 8)$ .

У этого кода минимальное кодовое расстояние (расстояние Хэмминга) равно:

$$d_{\text{min}} = \frac{n}{2}; \quad d_{\text{min}} = \frac{16}{2} = 8$$

Этот код обнаруживает ошибки кратностью:

$$\alpha_{\text{обн}} = d_{\text{min}} - 1; \quad \alpha_{\text{обн}} = 8 - 1 = 7$$

то есть одно-, двух-, трех- ... семикратные ошибки в слове.

Кроме того, этот код способен исправлять ошибки кратностью:

$$\alpha_{\text{исп}} = \frac{d_{\text{min}} - 1}{2}, \quad \alpha_{\text{исп}} = \frac{8 - 1}{2} = 3,5,$$

то есть до трех ошибок в слове из 8 бит. Структура фрагмента информационного слова имеет длину 640 бит. Такой кадр можно представить в виде 80 посылок по 8 бит, поступающих на вход помехоустойчивого кодера.

Длина волны высокочастотного ОФМ-сигнала определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{c}{f_0}; \quad \lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{120 \cdot 10^6} = 2,5 \text{ м},$$

где  $c$  – скорость света;

$f_0$  – частота несущего колебания, равная 120 МГц.

Приемная и передающая антенны представляют собой четвертьволновые вибраторы длиной

$$l = \frac{\lambda}{4}, \quad l = \frac{2,5}{4} = 0,625 \text{ м.}$$

Диаграмма направленности этих антенн тороидальная в меридиональной плоскости и круговая в экваториальной плоскости, поэтому необходимо применять штыревые симметричные антенны, которые должны располагаться горизонтально [19-20]. Ширина диаграммы направленности по уровню мощности 0,5 в меридиональной плоскости равна  $80^\circ$  (рисунок 7). На БЛА проводники приемной антенны крепятся симметрично в верхней части, не мешая двигателям и пропеллерам. На пульте управления проводники передающей антенны должны быть в виде двух гибких проволочных горизонтальных антенн. Это позволяет расположить главный максимум диаграммы направленности антенны вертикально, в плоскости полета БЛМ, практически без «мертвых зон». Ширина главного луча диаграммы направленности приемной и передающей антенн в горизонтальной плоскости по уровню 0,5 от максимальной мощности равна  $2\theta_{0,5} = 80^\circ$ , в вертикальной плоскости  $\beta_{0,5} = 360^\circ$ .

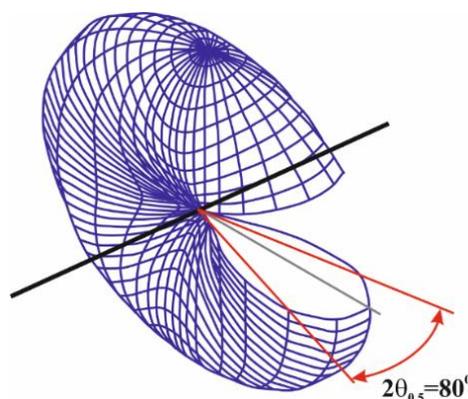


Рисунок 7 – Диаграмма направленности четвертьволнового горизонтального симметричного вибратора

Мощность сигнала на выходе передатчика определяется по формуле:

$$P_{\text{ПРД}} = \frac{P_{\text{с}} \cdot (4\pi \cdot D)^2 \cdot \xi}{G_{\text{ПРД}} \cdot G_{\text{ПРМ}} \cdot \lambda^2},$$

где  $D$  – дальность радиолинии передачи команд управления ( $D = 10$  км);

$\xi$  – коэффициент дополнительного ослабления в среде распространения;

$G_{\text{ПРД}}, G_{\text{ПРМ}}$  – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн

( $G_{\text{ПРМ}} = G_{\text{ПРД}} = 3,28$ ) [20].

Расчетная минимальная мощность передатчика будет равна:

$$P_{\text{ПРД}} = 4 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} = 0,04 \text{ мкВт.}$$

Полученное значение является очень маленьким. Этой мощности будет недостаточно для устойчивой работы радиолинии в условиях воздействия реальных помех возле объектов, непосредственно обслуживаемых БЛА – высотным монтажником. Для повышения помехоустойчивости, борьбы с замираниями, компенсации потерь из-за неточности наведения максимумов диаграмм направленности приемной и передающей антенн друг на друга передатчик должен иметь выходную мощность порядка  $P_{\text{ПРД}} = 0,1 \text{ Вт}$ , т.е. запас в 250.000 раз. Отношение «сигнал/шум» составит:

$$h^2 = 7,03 \cdot 10^8 \text{ раз} = 98 \text{ дБ.}$$

Этот по мощности может быть потрачен на многократное увеличение дальности полета БЛМ при условии обеспечения дальности прямой видимости, которое при такой мощности составит не менее 30,4 км.

Дальность прямой видимости радиосвязи (в км) с учетом сферической формы Земли без учета рефракции (огибания) радиоволн равна [20]:

$$D = 3,57 \cdot (\sqrt{h_{\text{ПУ}}} + \sqrt{h_{\text{БЛА}}}),$$

где  $h_1, h_2$  – соответственно высота подъема антенны ПУ (1 м) и высота антенны БЛА при проведении высотно-монтажных работ (минимальная равна 10 м, максимальная равна 150 м).

$$D_{\text{min}} = 3,57 \cdot (\sqrt{1} + \sqrt{10}) = 14,86 \text{ км.}$$

$$D_{\text{max}} = 3,57 \cdot (\sqrt{1} + \sqrt{150}) = 47,29 \text{ км.}$$

Таким образом, совместное использование роботизированных, вычислительных и радиотехнических технологий позволяет повысить оперативность, эффективность и безопасность внедрения сложных высокотехнологических процессов. В статье рассмотрена перспективная радиосистема управления целевым оборудованием беспилотного летательного аппарата – высотного монтажника, а также выполнены следующие действия:

- определен тип канала радиосвязи;

- выбран и обоснован вид модуляции высокочастотного сигнала;
- выбран метод кодирования;
- определена структура принимаемого сигнала.

Кроме того, были выполнены расчеты основных параметров разрабатываемой радиосистемы: минимальной выходной мощности передатчика; отношения «сигнал/шум»; максимальной дальности прямой видимости на максимальной и минимальной высоте полета БЛА – высотного монтажника.

### **Список источников**

1. Ронжин А.Л., Нгуен В.В., Соленая О.Я. Анализ проблем разработки беспилотных летательных манипуляторов и физического взаимодействия БЛА с наземными объектами // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=90439&eng=Y>
2. Капков Р.Ю., Тятюшкина О.Ю., Ульянов С.В. Интеллектуальное когнитивное управление роботизированными социотехническими системами: квантовые сквозные ИТ в объяснительном сильном ИИ для проекта «Индустрия 5.0» // Системный анализ в науке и образовании. 2024. № 2. С. 47-90.
3. Нго К.Т., Соленая О.Я., Ронжин А.Л. Анализ подвижных роботизированных платформ для обслуживания аккумуляторов беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=84444>
4. Нгуен В.В., Усина Е.Е. Динамические модели управления и стабилизации движения манипулятора БЛА // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020. № 24 (4). С. 200-216.
5. Канащенков А.И., Меркулов В.И. Авиационные системы радиоуправления. Т. 1. Принципы построения систем радиоуправления. Основы синтеза и анализа. – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.
6. Иванов А.А., Шмаков О.А. Алгоритм определения внутренней геометрии манипулятора змеевидного типа при движении лидирующего звена по наращиваемой траектории // Труды СПИИРАН. 2016. № 49. С. 190-207.

7. Korpela C.M., Danko T.W., Oh P.Y. MM-UAV: Mobile Manipulating Unmanned Aerial Vehicle // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2012. No. 65. P. 93-101. DOI: [10.1007/s10846-011-9591-3](https://doi.org/10.1007/s10846-011-9591-3)
8. Gardecki S., Kasinski A., Bondyra A., Gasior P. Multicopter Aerial Platform with Manipulation System - Static Disturbances // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2017. P. 357-366. DOI: [10.1007/978-3-319-54042-9\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-319-54042-9_33)
9. Orsag M., Korpela C., Oh P. Modeling and Control of MM-UAV: Mobile Manipulating Unmanned Aerial Vehicle // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2013. No. 69. P. 227–240. DOI: [10.1007/s10846-012-9723-4](https://doi.org/10.1007/s10846-012-9723-4)
10. Трошин А.В. Цифровые системы передачи. – Самара: ГОУВПО ПГУТИ, 2013. – 128 с.
11. Браммер Ю.А., Пащук И.Н. Импульсные и цифровые устройства. – М.: Высшая школа, 2003. – 352 с.
12. Журавлев В.И. Поиск и синхронизация в широкополосных сигналах. - М.: Радио и связь, 1986. – 240 с.
13. Сиверс А.П. Проектирование радиоприёмных устройств. – М.: Советское радио, 1976. – 480 с.
14. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. – М.: Мир, 1986. - 576 с.
15. Волков А.С. Разработка имитационной модели канала с группирующимися ошибками // Труды МАИ. 2023. № 128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=171396>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-12](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-12)
16. Габидулин Э.М., Афанасьев В.Б. Кодирование в радиоэлектронике. - М.: Радио и связь, 1986. - 175 с.
17. Кловский Д.Д., Сойфер В.А. Обработка пространственно-временных сигналов в каналах передачи информации. - М.: Связь, 1978. - 206 с.
18. Буренко Е.А. Обоснование эффективности использования сигналов с ортогональным частотным разделением каналов в авиационных радиосистемах передачи информации // Труды МАИ. 2022. № 127. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=170344>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-14)

19. Галицкая Е.О., Стенин Ю.М., Корчагин Г.Е. Лабораторные работы по распространению радиоволн и антеннам. – Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2014. – 40 с.

20. Ерёменко В.Т. и др. Антенны и распространение радиоволн. - Орёл: Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, 2017. – 329 с.

## References:

1. Ronzhin A.L., Nguen V.V., Solenaya O.Ya. Analysis of the problems of the development of unmanned aerial manipulators and the physical interaction of UAVs with ground objects. *Trudy MAI*. 2018. No. 98. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90439&eng=Y>

2. Kapkov R.Yu., Tyatyushkina O.Yu., Ul'yanov S.V. Intelligent cognitive management of robotic sociotechnical systems: quantum end-to-end IT in explanatory strong AI for the Industry 5.0 project. *Sistemnyi analiz v nauke i obrazovanii*. 2024. No. 2. P. 47-90. (In Russ.)

3. Ngo K.T., Solenaya O.Ya., Ronzhin A.L. Analysis of mobile robotic platforms for servicing batteries of unmanned aerial vehicles. *Trudy MAI*. 2017. No. 95. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=84444>

4. Nguen V.V., Usina E.E. Dynamic models of control and stabilization of the movement of the UAV manipulator. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. 2020. No. 24 (4). P. 200 - 216. (In Russ.)

5. Kanashchenkov A.I., Merkulov V.I. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniya. T. 1. Printsipy postroeniya sistem radioupravleniya. Osnovy sinteza i analiza* (Aviation radio control systems. Vol. 1. Principles of building radio control systems. Fundamentals of synthesis and analysis). Moscow: Radiotekhnika Publ., 2004. 320 p.

6. Ivanov A.A., Shmakov O.A. Algorithm for determining the internal geometry of a serpentine manipulator when the leading link moves along an increasing trajectory. *Trudy SPIIRAN*. 2016. No. 49. P. 190-207. (In Russ.)

7. Korpela C.M., Danko T.W., Oh P.Y. MM-UAV: Mobile Manipulating Unmanned Aerial Vehicle. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2012. No. 65. P. 93-101. DOI: [10.1007/s10846-011-9591-3](https://doi.org/10.1007/s10846-011-9591-3)
8. Gardecki S., Kasinski A., Bondyra A., Gasior P. Multicopter Aerial Platform with Manipulation System - Static Disturbances. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017. P. 357-366. DOI: [10.1007/978-3-319-54042-9\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-319-54042-9_33)
9. Orsag M., Korpela C., Oh P. Modeling and Control of MM-UAV: Mobile Manipulating Unmanned Aerial Vehicle. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2013. No. 69. P. 227–240. DOI: [10.1007/s10846-012-9723-4](https://doi.org/10.1007/s10846-012-9723-4)
10. Troshin A.V. *Tsifrovye sistemy peredachi* (Digital transmission systems). Samara: GOUVPO PGUTI Publ., 2013. 128 p.
11. Brammer Yu.A., Pashchuk I.N. *Impul'snye i tsifrovye ustroystva* (Pulse and digital devices). Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2003. 352 p.
12. Zhuravlev V.I. *Poisk i sinkhronizatsiya v shirokopolosnykh signalakh* (Search and synchronization in broadband signals). Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1986. 240 p.
13. Sivers A.P. *Proektirovanie radiopriemnykh ustroystv* (Designing radio receiving devices). Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1976. 480 p.
14. Bleikhut R. *Teoriya i praktika kodov, kontroliruyushchikh oshibki* (Theory and practice of error-controlling codes). Moscow: Mir Publ., 1986. 576 p.
15. Volkov A.S. The development of simulation model of channel with burst error arrays. *Trudy MAI*. 2023. No. 128. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=171396>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-12](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-12)
16. Gabidulin E.M., Afanas'ev V.B. *Kodirovanie v radioelektronike* (Coding in radio electronics). Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1986. 175 p.
17. Klovsii D.D., Soifer V.A. *Obrabotka prostranstvenno-vremennykh signalov v kanalakh peredachi informatsii* (Processing of space-time signals in information transmission channels). Moscow: Svyaz' Publ., 1978. 206 p.
18. Burenko E.A. Substantiation of the effectiveness of the use of signals with orthogonal frequency division multiplexing in aviation radio systems of information transmission.

*Trudy MAI.* 2022. No. 127. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=170344>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-14)

19. Galitskaya E.O., Stenin YU.M., Korchagin G.E. *Laboratornye raboty po rasprostraneniyu radiovoln i antennam* (Laboratory work on radio wave propagation and antennas). Kazan': Kazanskii (Privolzhskii) federal'nyi universitet Publ., 2014. 40 p.

20. Eremenko V.T. et al. *Antenny i rasprostranenie radiovoln* (Antennas and radio wave propagation). Orel: Orlovskii gosudarstvennyi universitet imeni I.S. Turgeneva Publ., 2017. 329 p.

Статья поступила в редакцию 07.10.2024

Одобрена после рецензирования 25.10.2024

Принята к публикации 25.04.2025

The article was submitted on 07.10.2024; approved after reviewing on 25.10.2024; accepted for publication on 25.04.2025