

Труды МАИ. 2025. № 140
Trudy MAI. 2025. No. 140. (In Russ.)

Научная статья

УДК 621.396.9

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184063>

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

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ КОМАНДНОЙ РАДИОЛИНИИ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫМ АВИАТОПЛИВОЗАПРАВЩИКОМ

Анатолий Михайлович Задорожный¹, Алексей Юрьевич Гетманцев²✉

¹Корпорация «Тактическое ракетное вооружение»,

Ахтубинск, Астраханская область, Российская Федерация

²Филиал «Взлет» Московского авиационного института (национального исследовательского университета),

Ахтубинск, Астраханская область, Российская Федерация

¹zadorozhnyi_anat@mail.ru

²tomamens@mail.ru ✉

Аннотация. В статье рассмотрены особенности роботизации высокоопасного технологического процесса – заправки воздушных судов авиационным топливом. Основное внимание уделено особенностям проектирования помехоустойчивого радиоканала управления роботизированным авиатопливозаправщиком (РАТЗ). Приведены расчеты для формирования тактико-технических характеристик, предъявляемых к радиосистеме и ее узлам. Показана структурная схема радиоканала управления целевым оборудованием РАТЗ при выполнении задач по функциональному назначению, определены основные параметры радиосистемы.

Ключевые слова: роботизированный авиатопливозаправщик, радиоуправление, помехоустойчивое кодирование, безопасность заправки топливом

Для цитирования: Задорожный А.М., Гетманцев А.Ю. Особенности разработки командной радиолинии управления роботизированным авиатопливозаправщиком // Труды МАИ. 2025. № 140. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184063>

Original article

DEVELOPMENT FEATURES COMMAND RADIO CONTROL OF A ROBOTIC AIRCRAFT TANKER

Anatoly M. Zadorozhny¹, Alexey Yu. Getmantsev²✉

¹Joint Stock Company «Tactical Missile Weapons Corporation»,
Akhtubinsk, Astrakhan region, Russian Federation

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

¹zadorozhnyi_anat@mail.ru

²tomamens@mail.ru

Abstract. The article discusses the design features of a noise-resistant radio control channel for an unmanned ground-based robotic aircraft tanker, which is controlled remotely or programmatically. The presented radio channel allows you to transmit commands to the control systems of the car platform, a manipulator with a filling device at its end, as well as a fuel drainage system with high-pressure pumps. The robotization of airfield complexes is of high relevance, especially the robotization of general-purpose airfield equipment for

refueling unmanned aerial vehicles. The purpose of the work is to determine the composition of the elements of the radio control system and calculate its main parameters. The article describes the classical system-wide and specialized methods of complex and structural analysis, functional synthesis of radio transmitters and receivers, radio engineering methods of noise-resistant coding, etc. The result of the work is to create a structural diagram of a radio link, calculate its main parameters, determine approaches for the practical implementation of the calculated values of the minimum and operating power of the transmitter, to determine the parameters of the required number of control channels; a common information and noise-resistant frame of the transmitted signal, to select an interference-resistant code and the preferred method of carrier frequency modulation by the information flow. The given calculated values and selected technical solutions can be successfully implemented by modern hardware, software and electronic components, which confirms the technical feasibility of the task of fully automating the facilities of the airfield technical complex. The field of practical application of the results obtained is much broader than the robotization of individual aircraft tankers - it is the radio control of various remote and software-controlled robotic systems and complexes, which allows either to completely exclude the operator from a highly dangerous technological process, or to provide him with the safest possible working conditions. Conclusions: the above-mentioned radio control system for an aircraft tanker is an integral part of a promising robotic system - a combined airfield, technical and fuel distribution complexes, ensuring their safety, functionality and efficiency in conditions of strong electromagnetic interference of natural and artificial origin.

Keywords: robotic aircraft tanker, radio control, noise-resistant coding, safety of refueling

For citation: Zadorozhny A.M., Getmantsev A.Yu. Development features Command radio control of a robotic aircraft tanker. *Trudy MAI*. 2025. No. 140. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=184063>

Значительное увеличение степени автоматизации во всех отраслях экономики приводит к неизбежной замене ручного труда на автоматизированные или полностью автоматические технологические процессы. При этом активно используется роботизация отдельных операций, которые являются опасными, имеют вредные факторы или высокую степень ответственности, не допускающую применения ручного труда из-за ошибок, вызванных человеческим фактором [1-6].

Актуальной проблемой является полная автоматизация и роботизация движения (перемещения) авиационных нефтепродуктов, а также их учета на всех этапах технологической цепочки: от первичного приема на склад с нефтеперерабатывающего завода до выдачи «в крыло» воздушного судна (ВС) [7].

Однако до настоящего времени не решен вопрос роботизации самого момента заправки ВС авиатопливом, как в случае использования топливораздаточных колонок на местах стоянки ВС, так и при использовании мобильных заправочных цистерн на автомобильном шасси (авиатопливозаправщиков) [8-9]. Каждый раз при заправке ВС привлекаются пожарные расчеты для пресечения возможности возгорания, гибели людей или уничтожения ВС и аэродромно-технического имущества. Кроме того, резко возросли требования по минимизации продолжительности заправки ВС, для чего разрабатываются новые ускоренные способы заправки с использованием насосов большого давления и заправочных

устройств повышенного сечения, а это создает дополнительные технологические риски. Представляет особый интерес автоматическая заправка группы беспилотных летательных аппаратов (БЛА) или беспилотных ВС, работающих удаленно от основного пункта управления и предназначенных, например, для химико-биологической обработки сельскохозяйственных угодий (рис.1).



Рисунок 1– Пример использования РАТЗ для заправки БЛА

В этом случае нужны две технологически одинаковые автоматические системы заправки: одна – для заправки топливом, вторая – для заправки жидкими реагентами. Обе автоматические системы заправки могут быть совмещены на одном шасси, при этом они являются высокоопасными и токсичными, с ненулевой вероятностью нанесения экологического ущерба району применения.

Кроме того, при заправке ВС необходимо автоматическое взвешивание передаваемого топлива для определения центровочных характеристик перед каждым вылетом. Фактические центровочные характеристики являются критическими с точки зрения безопасности при расчете режимов взлета и посадки, выполнения полета по маршруту и применения целевого оборудования. Методы учета топлива объемными счетчиками не могут применяться ввиду существенной погрешности

измерения массы, т.к. плотность топлива сильно изменяется в зависимости от температуры. Таким образом, процесс высокоточной заправки пилотируемых и беспилотных ВС является важным и высокоопасным технологическим процессом. От степени роботизации и технической оснащенности аэродромных средств заправки значительно зависит качество и сроки безопасной подготовки воздушных судов к повторному вылету, в том числе издержки эксплуатанта ВС на аренду авиационной стоянки. Задача совершенствования аэродромно-технических средств общего применения (АТС ОП) является весьма конкурентоспособной: проводится усиленное внедрение современных радиоэлектронных, вычислительных и роботизированных технологий, однако автоматические автономные роботизированные системы (средства) заправки и обслуживания ВС применяются в единичных случаях [8-12].

Объектом исследования в данной статье являются дистанционно-управляемые РАТЗ. Предмет исследования – анализ особенностей, которые должны учитываться при разработке командной линии радиоуправления РАТЗ с наземного пункта управления (НПУ). Актуальность статьи обусловлена потребностью внедрения безопасных цифровых технологий в средства радиосвязи на перспективных роботизированных АТС ОП. Новизна разработки состоит в синтезе новых способов применения роботизированных авиатопливозаправщиков за счет использования современных элементов цифровой радиотехники передачи данных. Выполненное исследование имеет выраженную практическую направленность, поскольку разрабатываемая радиосистема может применяться для дистанционного управления не только высокоопасных РАТЗ, но и других роботизированных АТС ОП.

Одним из ключевых элементов РАТЗ является манипулятор с заправочным

устройством на конце, которое вставляется в заправочную горловину ВС.

В настоящее время в промышленности достаточно широко применяются роботы-манипуляторы и механизмы на их основе для выполнения повторяющихся технологических операций в условиях, вредных или опасных для человека. Для подобных операций требуются крупные исполнительные механизмы с радиусом рабочей зоны больше метра и способные оперировать с полезной нагрузкой в несколько килограмм [13]. Роботом-манипулятором называется тип промышленных роботов, обладающих функциями движения, аналогичными функциям движения человеческой руки. Сегменты манипулятора имеют соединения, допускающие вращательное или поступательное движение. Такой тип робота на сегодняшний день наиболее востребован в промышленных задачах с выполнением работ на некотором удалении от НПУ (роботы-погрузчики, роботы-автокраны, роботы-мойщики самолетов, роботы-кабельщики и т.д.). Роботы-манипуляторы могут выполнять следующие операции: сборка тяжелых частей различных конструкций, сварка, покраска, передача, удержание или доставка материалов и прочее. К роботам-манипуляторам предъявляются типовые требования:

- непрерывная повторяемость сложных задач;
- высокая точность наведения исполнительного устройства манипулятора (захват, мягкий зажим);
- возможность непрерывного функционирования в течение долгого времени;
- возможность точного функционирования во вредных или опасных условиях без необходимости участия человека;
- не требовать частых остановок в работе для технического обслуживания,

ремонта, восполнения расходных материалов.

Таким образом, снижается риск подвергнуть опасности здоровье и жизнь человека на производстве. Ключевую роль в расширении областей практического применения роботов-манипуляторов играют удобство и легкость перенастройки для новых технологических операций (например, для заправки новых видов ВС). В настоящее время появилась возможность резкого увеличения объема роботизированных технологий за счет использования помехоустойчивых способов дистанционного или автоматического радиуправления роботизированными комплексами или одновременно их группами [14-16].

На рис.2 показано основное исполнительное устройство роботизированного авиатопливозаправщика – топливораздаточный узел, который перед подачей топлива необходимо вставить под заданным наклоном с требуемой скоростью и точностью по заранее определенной траектории в открытое топливоприемное устройство самолета.

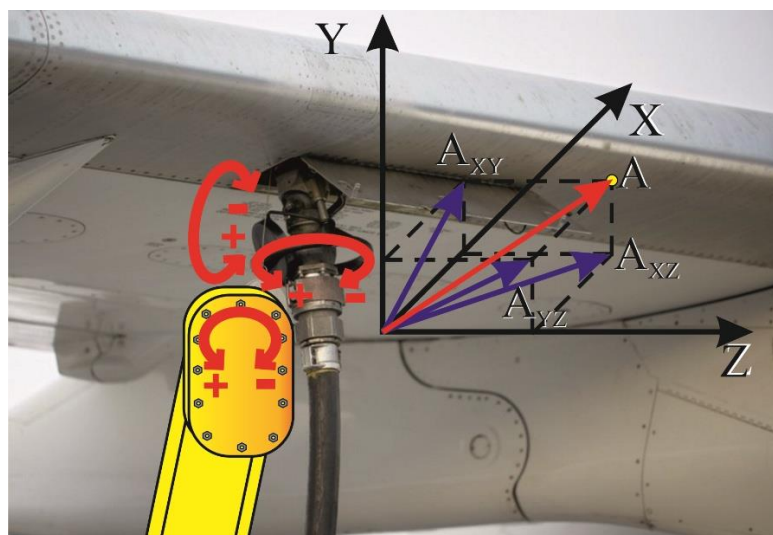


Рисунок 2 –Примеры возможных смещений и поворотов исполнительного устройства на заданные углы в местной системе координат

Для выполнения указанной задачи должен использоваться шестизвенный

робот-манипулятор на подвижной платформе (на самоходном автомобильном шасси (САШ)). Такому роботу-манипулятору РАТЗ требуется задать положение рабочего органа – топливораздаточного узла в пространстве по всем шести координатам (трем линейным и трем угловым) с помощью многозвенного робототехнического манипулятора. САШ должно быть сориентировано относительно заправляемого ВС по четырем координатам: трем линейным (X, Y, Z) и углу курса. Высота определяется гидравлической системой, выравнивающей с требуемой точностью РАТЗ при помощи аутригеров (выдвижных «лап»). Управление РАТЗ осуществляется либо автоматизировано, когда оператор использует выносной пульт управления, либо полностью в автоматическом режиме. Таким образом требуется управление манипулятором по десяти координатам (в положительную или в отрицательную сторону относительно текущего положения), а также управление векторами скорости автомобильной платформы (не менее четырех параметров – скорость движения вперед-назад, скорость поворота вправо-влево отдельно колес передней и отдельно задней оси), направлением и векторами скорости топливораздаточного узла (не менее шести параметров), режимом работы топливного насоса высокого давления и дренажного насоса (не менее четырех параметров). Общее количество параметров, подлежащих передаче через систему радиуправления – не менее 24.

Для упрощения постановки задачи предполагается, что многоканальная система радиуправления роботизированным авиатопливозаправщиком в качестве конечных получателей информационных сообщений имеет цифровые шаговые сервоприводы (шаговые двигатели (ШД)). В корпусе каждого ШД устанавливается дополнительный понижающий редуктор (рис. 3). Он позволяет увеличить

допустимую нагрузку, с которой робот-манипулятор может работать, и повышает точность его перемещения. ШД поворачиваются на определенный угол в зависимости от числа поступивших кодовых импульсов заданной полярности. Положительные импульсы приводят к повороту вала сервопривода на дискретный угол против часовой стрелки, отрицательные – к повороту по часовой стрелке.



Рисунок 3 - Шаговый сервопривод с дополнительным понижающим редуктором

Для точного управления шаговыми сервоприводами используются драйверы (рис. 4) и энкодеры – датчики угла поворота вала, встроенные в ШД.



Рисунок 4 – Внешний вид драйвера шагового двигателя (ДШД).

На рис. 5 приведена примерная структурная схема управления РАТЗ. В данной схеме не рассматриваются достаточно широко распространенные системы: технического зрения, лидаров, датчиков ориентации в пространстве, приемник навигационной информации от спутниковой навигационной системы, датчики расхода топлива, датчики исправности аппаратуры и т.д., которые дополняют систему управления обратными связями, и тем самым делают управление РАТЗ максимально информативным. Радиоканал, в отличие от других способов передачи команд управления, обладает большими преимуществами. Так, в отличие от проводных каналов управления, радиус применения радиоуправляемого

роботизированного авиатопливозаправщика не ограничен длиной проводов и в соответствии с типовыми размерами аэродромов легко может составлять более 20 км. В отличие от оптических беспроводных систем передачи данных, радиолинии нечувствительны к пыли, туману, предметам на линии визирования авиатопливозаправщика с НПУ.

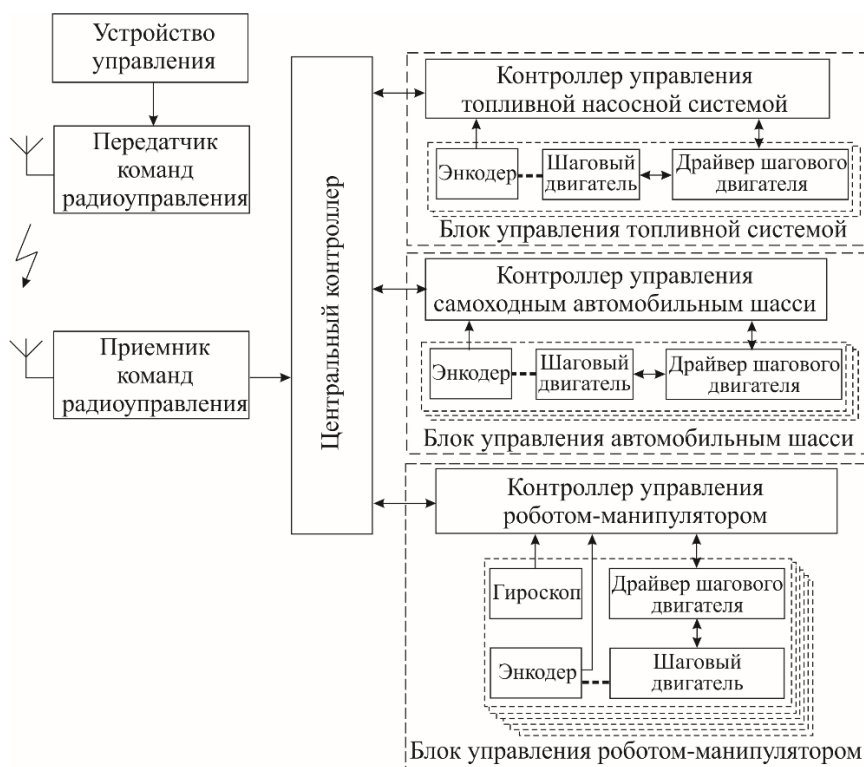


Рисунок 5 – Структурная схема управления РАТЗ

К недостаткам радиолинии управления следует отнести восприимчивость к радиопомехам. Их естественный уровень является высоким в районе аэропорта по причине большого количества используемых радиолокационных, радионавигационных или радиосвязных систем. Для минимизации влияния помех применяются помехоустойчивые способы кодирования передаваемой цифровой информации. В целях повышения скорости обслуживания воздушных судов предлагается использовать РАТЗ двух типов:

1) постоянно подключенные к топливораздаточной колонке безрезервуарные РАТЗ. Длина топливного шланга таких РАТЗ должна быть достаточной для его подключения с любой стороны самолета (вертолета);

2) РАТЗ с топливным резервуаром (в несколько кубических метров), если производится заправка ВС топливом на значительном удалении от топливораздаточной колонки. У таких РАТЗ должна быть небольшая длина топливного шланга, достаточная для подключения РАТЗ к ВС.

При создании системы автоматического управления заправкой ВС ее часть, касающаяся радиоуправления РАТЗ, должна обеспечивать:

- формирование команд на движение САШ РАТЗ по заранее построенной безопасной траектории по аэродрому и в непосредственной близости около ВС;

- формирование команд на траекторное и операционное управление роботом-манипулятором и топливораздаточным узлом при выполнении технологических операций открытия топливоприемной горловины, подключения топливораздаточного узла, перекачки топлива, закрытия горловины.

Таким образом, радиоуправление является основным видом управления, которое может обеспечить гибкое, оперативное, безопасное и надежное управление РАТЗ, а технические требования, предъявляемые к системе радиоуправления, являются технически реализуемыми.

В разрабатываемой системе радиоуправления используется симплексная передача данных, т.к. необходимая для принятия решений контрольная объективная информация (данные от системы технического зрения, от лидаров, от датчиков и т.д.) поступает по другим радиоканалам, не рассматриваемым в данной статье.

Для преобразования в цифровую форму аналоговых команд, поступивших от органов управления РАТЗ, применяются налогово-цифровые преобразователи. Для недопущения снижения отношения сигнал/шум применяется помехоустойчивое кодирование. Передача информации команд радиоуправления осуществляется на фиксированной несущей частоте с использованием относительной фазовой манипуляции несущего колебания.

Потребности любого аэродрома требуют одновременного применения нескольких РАТЗ и других роботизированных АТС ОП. Передача им команд радиоуправления может осуществляться с использованием только многоканальной системы передачи информации от НПУ на РАТЗ. Это можно организовать при помощи частотного разделения каналов (ЧРК), временного разделения каналов (ВРК) или разделения каналов по форме, т.е. кодового разделения каналов (КРК).

При ЧРК передающая часть, устанавливаемая на НПУ, значительно усложняется за счет:

- применения синтезатора сетки несущих частот;
- необходимости точной настройки передатчиков и приемников каждой пары

НПУ – РАТЗ на свою несущую частоту.

При ВРК каждому радионаправлению отводится свой узкий интервал времени. Передача информации осуществляется на одной несущей частоте. Для одновременной работы с 24 органами управления на НПУ применяется временное разделение каналов.

При КРК специально вводится адресация передаваемой информации. Комбинация КРК и ВРК наиболее предпочтительна: всем РАТЗ информация

поступает на одной несущей частоте, но для указания точного получателя используется адресация информационного потока. Такой режим позволяет использовать одну полосу частот для большого количества абонентов, не требуется сложная настройка на собственные несущие частоты и т.д. При этом минимизируется число используемых в аэропорту для управления РАТЗ несущих частот.

Важным становится настройка каждого центрального контроллера АТС ОП на обработку информации по уникальному собственному адресу. В радиосистеме предусматривается 10-ти разрядная адресация передаваемой информации, что позволяет подключить до 1024 абонентов. Для определения состава структурной схемы системы радиуправления РАТЗ необходимо для симплексного типа радиоканала определить мощность передатчика, метод модуляции и метод помехоустойчивого кодирования, определить структуру сигнала.

Минимальная требуемая мощность передатчика определяется по формуле:

$$P_{\text{ПРД}} = \frac{h_0^2 \cdot \Delta F_{\text{ш}} \cdot (4\pi r)^2 \cdot N_0 \cdot L}{G_{\text{ПРД}} \cdot G_{\text{ПРМ}} \cdot \lambda^2},$$

где h_0^2 – отношение «сигнал/шум» (в безразмерных величинах);

$\Delta F_{\text{ш}}$ - полоса пропускания входной цепи приемника ($\Delta F_{\text{ш}} = 38,7 \cdot 10^3$ Гц);

r - расстояние между приемной и передающей антеннами ($r=20$ км);

$G_{\text{ПРД}}$, $G_{\text{ПРМ}}$ - коэффициенты усиления передающей и приемной антенн типа полуволновый вибратор ($G_{\text{ПРД}} = G_{\text{ПРМ}} = 3$ дБ или в 2 раза), как у слабонаправленной антенны;

λ - длина волны, на которой излучает передатчик (3 м, что соответствует частоте 100 МГц);

L - коэффициент ослабления ($L = 10$);

N_0 – спектральная плотность белого шума на входе приёмника (по расчетам $N_0 = 1,611 \cdot 10^{-20}$ Вт/Гц).

При относительной фазовой манипуляции (ОФМн), которая обладает наилучшей помехоустойчивостью по сравнению с другими видами модуляции (рис. 6), в случае безызбыточного кода при вероятности ошибки, равной $P = 10^{-6}$, минимальное отношение «сигнал/шум» будет равно [17]:

$$h_0^2 = 20 \text{ дБ} = 100 \text{ раз.}$$

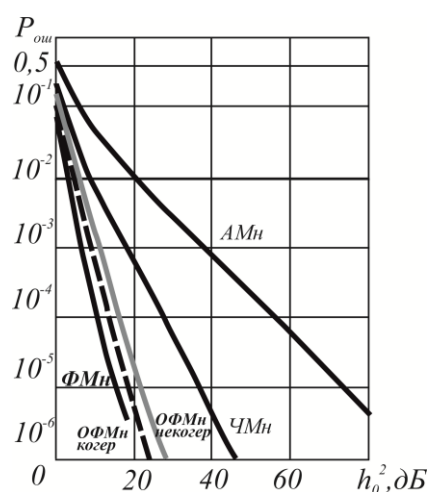


Рисунок 6 – Зависимость вероятности ошибки от отношения «сигнал/шум»

Таким образом, минимальная мощность сигнала на выходе передатчика составит $P_{\text{ПРД мин}} = 1,09 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} = 109 \text{ мкВт}$. Это значение весьма мало, поскольку определяется низким заданным соотношением «сигнал/шум» ($h_0^2 = 20$), небольшим расстоянием ($r = 20 \text{ км}$) и длиной волны передатчика в 3 м .

Для повышения соотношения «сигнал/шум», снижения уровня влияния естественных и специально организованных помех целесообразно увеличить мощность передатчика до $P_{\text{ПРД}} = 1 \text{ Вт}$. Отношение «сигнал / шум» в этом случае равно

$h_0^2 = 3,54 \cdot 10^5$ раз ≈ 56 дБ. Большое отношение «сигнал / шум» показывает об имеющейся потенциальной возможности во много раз увеличить скорость передачи информации (или снизить длительность элементарного одиночного символа) при сохранении требуемого высокого качества передачи данных. Объем передаваемой информации на РАТЗ и скорость передачи данных выбраны достаточными для реализации функциональных задач, поэтому как-либо их изменять не требуется.

Дальность прямой видимости радиосвязи (в км) с учетом сферической формы Земли и без учета рефракции (огибания) радиоволн определяется по формуле:

$$D = 3,57 \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}),$$

где h_1, h_2 - высота подъема антенны НПУ и высота антенны РАТЗ соответственно (в метрах).

Максимальная дальность прямой видимости линии радиосвязи «НПУ-РАТЗ», при высоте подъема антенны на НПУ на 16 метров и высоте антенны РАТЗ 5 метров составляет $D = 22,26$ км. Было получено значение, которое больше, чем минимально необходимое для аэродрома расстояние $D = 20$ км.

Важным параметром является вид модуляции, поскольку от него зависит предельное значение отношения «сигнал/шум». Зависимости вероятности ошибки для следующих видов манипуляции: амплитудной, частотной и фазовой при различных соотношениях «сигнал-шум» h_0^2 были показаны на рис. 6. Анализ этого графика показывает, что наибольшей потенциальной помехоустойчивостью из этих трех видов манипуляции обладает фазовая манипуляция (ФМн) и наименьшей –

амплитудная манипуляция (АМн). При прочих достоинствах фазовая манипуляция имеет недостаток – так называемый эффект «обратной работы», когда из-за неизвестного момента первоначального включения опорного колебания передатчика возможно инверсное определение мгновенной фазы сигнала в приемнике. Для предотвращения режима «обратной работы» модулирующая информация закладывается не в абсолютном значении фазы высокочастотного радиосигнала, а в ее относительном изменении относительно предыдущего информационного такта. Такой метод фазовой манипуляции называется относительной фазовой манипуляцией (ОФМн). Применяются два основных способа приема радиосигнала с ОФМн – когерентный и некогерентный. Был выбран когерентный способ, поскольку он требует меньшего отношения «сигнал/шум» h_0^2 , (примерно на 3-5 дБ при вероятности ошибки 10^{-6}) (рис.6).

Важным является вопрос борьбы с замираниями – временных и пространственных областей с противофазным приходом сигнала в точку приема из-за негативного эффекта многолучевости – переотражений от металлических поверхностей самолетов, зданий аэропортового комплекса и т.п. В связи с невозможностью применить способ разнесения двух приемных антенн на РАТЗ ввиду ограниченности его геометрических размеров, можно использовать периодическое переключение передатчика между двумя передающими антеннами в случае ухудшения приема сигнала на антенне РАТЗ. Для преодоления многолучевости и замираний антенны должны быть расположены друг от друга на расстоянии не менее

$$d = 10 \cdot \lambda = 10 \cdot 3 = 30 \text{ м.}$$

Каждому датчику – источнику сигнала с пульта оператора РАТЗ (кнопка, джойстик и т.д.) выделяется свой отдельный временной интервал. Количество разрядов для сигнала в двоичной форме определяется по формуле:

$$N_{\text{разр}} = \log_2 \left(\frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{\Delta} \right),$$

где U_{max} , U_{min} – максимальный и минимальный уровни входного сигнала;

Δ – шаг дискретизации по амплитуде.

Для передачи каждой аналоговой команды с погрешностью менее 0,5% (т.е. 200 уровней) требуется не менее 8 бит информации, т.к.

$$N_{\text{разр}} = \log_2(1/0,05) \approx \log_2(256) \approx 8.$$

Частота опроса каждого датчика должна быть $F_{\text{опроса}} \geq 10$ Гц. С этой частотой должны быть последовательно опрошены все датчики на пульте управления, формирующие $N_{\text{парам}} = 24$ параметра. Каждый предлагается передавать словами по 8 бит. Общая структура одного кадра информации представлена на рис. 7.

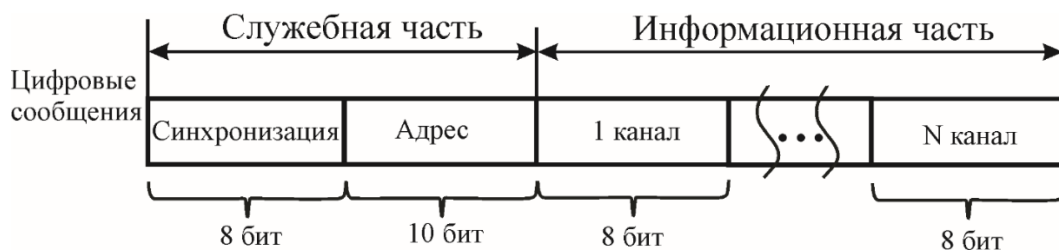


Рисунок 7 – Структура одного информационного кадра

В начале каждой кодовой посылки вставляется служебная информация:

- 1-8 бит – синхросигнал начала сообщения ($N_{\text{синхр}} = 8$);
- 9-18 бит – адрес конкретного получателя ($N_{\text{адрес}} = 10$).

Общая длина посылки содержит

$$N_{\text{пос}} = N_{\text{синхр}} + N_{\text{адрес}} + N_{\text{разр}} \cdot N_{\text{парам}} = 8 + 10 + 8 \cdot 24 = 210 \text{ бит.}$$

Для кодирования может быть применен какой-либо хорошо зарекомендовавший себя помехоустойчивый код [18-20], например, Боудза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ), например, БЧХ (15,7), который содержит на каждые 7 информационных бит 8 проверочных бит.. Общая длина этого фрагмента после помехоустойчивого кодирования становится равной 15 бит. Исходя из этого кодовая посылка из 210 бит разбивается на фрагменты по 7 бит, и каждый фрагмент заменяется 15-ти битным закодированным сообщением. Общая длина посылки после кодирования содержит

$$N_{\text{БЧХ}} = \frac{N_{\text{пос}}}{7} \cdot 15 = 210/7 \cdot 15 = 450 \text{ бит.}$$

С учетом изложенного, длительность одного элементарного информационного импульса должны быть равна:

$$\tau \leq \frac{1}{F_{\text{опроса}} \cdot N_{\text{БЧХ}}},$$

$$\tau = \frac{1}{10 \cdot 450} = 2,22 \cdot 10^{-4} \text{ с} \approx 0,2 \text{ мс.}$$

Этому соответствует скорость передачи информации

$$R = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{2 \cdot 10^{-4}} = 5000 \frac{\text{бит}}{\text{с}} = 5000 \text{ бод.}$$

Для обеспечения подстройки несущей частоты и исключения межсимвольной интерференции в структуре сигнала должны быть предусмотрены 50% защитные интервалы между посылками, поэтому длительность одиночного импульса уменьшается с 0,2 мс до 0,1 мс. Таким образом, один кадр информации,

закодированный БЧХ кодом и имеющий защитные интервалы, передается за время

$$T_{\text{пос}} = N_{\text{БЧХ}} \cdot (\tau_{\text{имп}} + \tau_{\text{защ}}) = 450 \cdot (0,1 + 0,1) = 90 \text{ мс.}$$

С учетом этого, между кодовыми посылками отдельных кадров, следующих с частотой 10 Гц (т.е. с периодом 100 мс), возникают защитные паузы в 10 мс.

При несущей частоте 100 МГц период колебаний равен

$$T_{\text{нес}} = \frac{1}{f_{\text{нес}}}, \quad T_{\text{нес}} = \frac{1}{100 \cdot 10^6} = 10^{-8} \text{ с} = 10 \text{ нс.}$$

На один информационный символ длиной 0,1 мс приходится

$$N_{\text{колеб}} = \frac{\tau_{\text{имп}}}{T_{\text{нес}}}, \quad N_{\text{колеб}} = \frac{10^{-4}}{10^{-8}} = 10^4 = 10.000$$

колебаний несущей частоты. Такого количества колебаний достаточно для устойчивой обработки фазоманипулированного сигнала в когерентном приемнике.

Рассматриваемая радиосистема относится к классу цифровых командных радиосистем передачи информации. Исходя из типовых схем их построения, предлагается следующая структурная схема радиосистемы (рис.8):

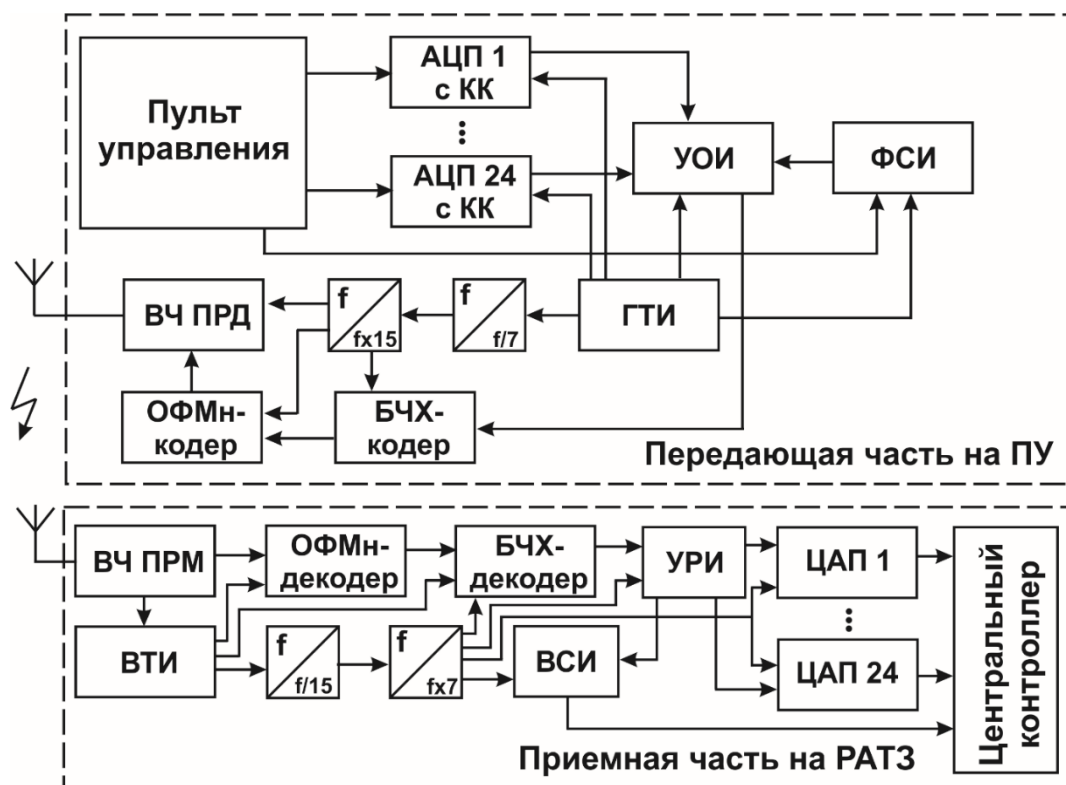


Рисунок 8 – Структурная схема радиосистемы управления РАТЗ

а) передающая часть:

- пульт управления РАТЗ - источник аналоговых сигналов по 24 параметрам;
- АЦП по 24 каналам с канальными ключами (КК);
- формирователь служебной информации (ФСИ), содержащий синхроимпульсы и адреса;
- устройство объединения канальной информации (УОИ), в котором соединяется информационный сигнал со служебным;
- генератор тактовых импульсов (ГТИ);
- делитель частоты на 7 и умножитель частоты на 15 для синхронизации кодера БЧХ;
- БЧХ-кодер;
- ОФМн-кодер;

- высокочастотная часть передатчика (ВЧ ПРД);

- антенна;

- блок питания;

б) приемная часть:

- антенна;

- высокочастотная часть приемника (ВЧ ПРМ);

- ОФМн-декодер;

- делитель частоты на 15 и умножитель частоты на 7 для синхронизации

кодера БЧХ и последующих низкочастотных трактов;

- БЧХ-декодер;

- устройство разделения информации;

- ЦАП (по 24 каналам) при подключении к аналоговым входам центрального

контроллера;

- выделитель тактовых импульсов (ВТИ);

- выделитель служебной информации (ВСИ).

Потребителем этой информации выступает центральный контроллер РАТЗ.

Как передающая часть, так и приемная часть рассматриваемой радиосистемы запитываются от собственных встроенных источников (блоков) питания.

В заключение необходимо отметить, что использование рассмотренных помехозащищенных командных радиолиний позволяет внедрять дистанционное или полностью автоматическое управление с целью роботизации транспортных средств и механизмов в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства.

Список источников

1. Использование промышленных роботов: обзор рынка робототехники в России и мире. URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/ispolzovanie-promyshlennykh-robotov-obzor-rynka-robototekhniki-v-rossii-i-mire>
2. Перевозчикова Ю.В. Робототехника в РФ: текущая ситуация и перспективы развития отрасли // Актуальные вопросы современной экономики. 2024. № 5. С. 745-748.
3. Перспективы развития робототехники в России. URL: <https://vc.ru/tech/122507-perspektivy-razvitiya-robototekhniki-v-rossii>
4. Роботы России. RoboTrends. URL: <http://robotrends.ru/robopedia/roboty-v-rossii>
5. Авдеева И.Л., Цысов А.С. Современный анализ и перспективы развития цифровых технологий в промышленных экономических системах // Естественно-гуманитарные исследования. 2020. № 28(2). С. 24-30. DOI: [10.24411/2309-4788-2020-10069](https://doi.org/10.24411/2309-4788-2020-10069)
6. Цхададзе Н.В. Трансформация промышленности в условиях перехода к «Индустрии 4.0» // Вестник Московского университета МВД России». 2020. № 7. С. 288-291. DOI: [10.24411/2073-0454-2020-10432](https://doi.org/10.24411/2073-0454-2020-10432)
7. Аронов С.Г., Бернер Л.И. и др. Автоматизированная система управления технологическим процессом топливозаправочного комплекса. Современные решения и реализация // Информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2021. № 1. С. 29-35.
8. «ГАЗПРОМ НЕФТЬ» представила первый роботизированный топливозаправочный комплекс. URL:

<https://kodeks63.ru/news/read/gazprom-neft-predstavila-pervyy-robotizirovannyy-toplivoz-apravochnyy-kompleks/novosti-neftegazovogo-kompleksa>

9. «ГАЗПРОМ НЕФТЬ» представила робота-заправщика // Бурение и нефть. 2018. №

11. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_36422249_80507180.pdf

10. Княжский А.Ю., Плясовских А.П. Цифровая модель движения на аэродроме // Вестник Концерна ВКО «Алмаз - Антей». 2020. № 3. С. 96-106. DOI: [2542-0542-20203-96-106](https://doi.org/10.2542-0542-20203-96-106)

11. Кошкаров А.С., Семенова В.П. Основные подходы к автоматизации движения сервисных транспортных средств на территории аэродрома // 14-ая общероссийская молодежная научно-техническая конференция «Молодежь. Техника. Космос» (Санкт-Петербург, 23-27 мая 2022): сборник трудов. - Санкт-Петербург: БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 2022. С. 192-195.

12. Кошкаров А.С., Семенова В.П. Разработка имитационной модели лидара системы предупреждения столкновений сервисного транспортного средства // Труды МАИ. 2023. № 128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=171399>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-15](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-15)

13. Борисов О.И., Громов В.С., Пыркин А.А. Методы управления робототехническими приложениями. - Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2016. - 108 с.

14. Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Анализ эффективности передачи данных в сети связи группировки беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57894>

15. Дорожко И.В., Горохов Г.М., Кириллов И.А. Методический подход к разработке системы поддержки принятия решений оператора автоматизированной системы

управления технологическими процессами на основе динамических байесовских сетей // Труды МАИ. 2022. № 125. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168195>.

DOI: [10.34759/trd-2022-125-23](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-23)

16. Свиридов В.В. Методика оценки качества группового взаимодействия робототехнических комплексов в условиях изменяемой фоноцелевой обстановки // Труды МАИ. 2021. № 121. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=162669>. DOI:

[10.34759/trd-2021-121-22](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-22)

17. Тепляков И.М., Рощин Б.В., Фомин А.И. Радиосистемы передачи информации. -

М: Радио и связь, 1982. - 264 с.

18. Помехоустойчивое кодирование в телекоммуникационных системах. URL:

https://bstudy.net/829051/tehnika/pomehoustoychivoe_kodirovanie_telekommunikatsionnyh_sistemah

19. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы: Справочник. - М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 126 с.

20. Бардин Д.С., Карпухин Е.О. Обеспечение надежной доставки по протоколу UDP с

использованием кодов Рида-Соломона // Труды МАИ. 2010. № 39. URL:

<https://trudymai.ru/published.php?ID=14801>

References

1. *The use of industrial robots: an overview of the robotics market in Russia and the world.*

URL:

<https://delprof.ru/press-center/open-analytics/ispolzovanie-promyshlennykh-robotov-obzor-rynka-robototekhniki-v-rossii-i-mire>

2. Perevozchikova Yu.V. Robotics in the Russian Federation: the current situation and prospects for the development of the industry. *Aktual'nye voprosy sovremennoi ekonomiki*. 2024. No. 5. P. 745-748. (In Russ.)
3. *Prospects for the development of robotics in Russia*. URL: <https://vc.ru/tech/122507-perspektivy-razvitiya-robototekhniki-v-rossii>
4. *Robots of Russia*. Portal Magazine *RoboTrends*. URL: <http://robotrends.ru/robopedia/roboty-v-rossii>
5. Avdeeva I.L., Tsysov A.S. Modern analysis and prospects for the development of digital technologies in industrial economic systems. *Estestvenno-gumanitarnye iss ledovaniya*. 2020. No. 28 (2). P. 24-30. (In Russ.). DOI: [10.24411/2309-4788-2020-10069](https://doi.org/10.24411/2309-4788-2020-10069)
6. Tskhadadze N.V. Transformation of industry in the context of the transition to "Industry 4.0". *Vestnik Moskovskogo universiteta MVD Rossii*. 2020. No. 7. P. 288-291. (In Russ.) DOI: [10.24411/2073-0454-2020-10432](https://doi.org/10.24411/2073-0454-2020-10432)
7. Aronov S.G., Berner L.I. et. al. Aircraft refueling control system for automation of fuel accounting. Modern solutions and implementation. *Informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii*. 2021. No. 1. P. 29-35. (In Russ.)
8. *GAZPROM NEFT unveils first robotic refueling complex*. URL: <https://kodeks63.ru/news/read/gazprom-neft-predstavila-pervyy-robotizirovannyy-toplivoz-apravochnyy-kompleks/novosti-neftegazovogo-kompleksa>
9. GAZPROM NEFT unveiled a refueling robot. *Burenie i neft'*. 2018. No. 11. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_36422249_80507180.pdf
10. Knyazhskii A.YU., Plyasovskikh A.P. Digital model of movement at the airfield. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz - Antei»*. 2020. No. 3. P. 96-106. (In Russ.). DOI:

11. Koshkarov A.S., Semenova V.P. Basic approaches to automating the movement of service vehicles on the territory of the airfield. *14-aya obshcherossiiskaya molodezhnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Molodezh'. Tekhnika. Kosmos»*: sbornik trudov. Saint Petersburg: BGTU «Voenmekh» im. D.F. Ustinova Publ., 2022. P. 192-195.
12. Koshkarov A.S., Semenova V.P. Development of a simulation model of the lidar collision warning system of a service vehicle. *Trudy MAI*. 2023. No. 128. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=171399>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-15](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-15)
13. Borisov O.I., Gromov V.S., Pyrkin A.A. *Metody upravleniya roboto-tekhnicheskimi prilozheniyami* (Methods of control of robotic applications). Saint Petersburg: Universitet ITMO Publ., 2016. 108 p.
14. Borodin V.V., Petrakov A.M., Shevtsov V.A. Analysis of the efficiency of data transmission in a communication network group of unmanned aerial vehicles. *Trudy MAI*. 2015. No. 81. (In Russ.). URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57894>
15. Dorozhko I.V., Gorokhov G.M., Kirillov I.A. Methodological approach to the development of a decision support system for the operator of an automated process control system based on dynamic bayesian networks. *Trudy MAI*. 2022. No. 125. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168195>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-23](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-23)
16. Sviridov V.V. Methodology for assessing the quality of group interaction of robotic complexes in a variable phono-target environment. *Trudy MAI*. 2021. No. 121. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=162669>. DOI: [10.34759/trd-2021-121-22](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-22)
17. Teplyakov I.M., Roshchin B.V., Fomin A.I. *Radiosistemy peredachi informatsii* (Radio information transmission systems). Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1982. 264 p.

18. *Noise-resistant coding in telecommunication systems.* URL: https://bstudy.net/829051/tehnika/pomehoustoychivoe_kodirovanie_telekommunikatsionnyh_sistemah
19. Zolotarev V.V., Ovechkin G.V. *Pomekhoustoichivoe kodirovanie. Metody i algoritmy: Spravochnik* (Noise-resistant coding. Methods and algorithms. Handbook). Moscow: Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2004. 126 p.
20. Bardin D.S., Karpukhin E.O. Ensuring reliable delivery over UDP using Reed-Solomon codes. *Trudy MAI.* 2010. No. 39. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=14801>

Статья поступила в редакцию 11.10.2024

Одобрена после рецензирования 25.10.2024

Принята к публикации 25.02.2025

The article was submitted on 11.10.2024; approved after reviewing on 25.10.2024; accepted for publication on 25.02.2025