**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Учреждение образования**

**«Национальный детский технопарк»**

**Образовательное направление**

**«Электроника и связь»**

**(Радиотехника)**

Исследовательский проект

**«КАНАЛ УПРАВЛЕНИЯ БПЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ППРЧ»**

Выполнил:

Мойсюк-Дранько Ярослав, учащийся

УО «Национальный детский технопарк»

Руководители проекта:

Барабанов Михаил Юрьевич

Бойкачёв Павел Валерьевич

Дубовик Илья Андреевич

Менжинский Андрей Борисович

Сицко Александр Леонидович

Минск 2025

# СОДЕРЖАНИЕ

[СОДЕРЖАНИЕ 2](#_Toc211238754)

# ВВЕДЕНИЕ

# ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

# РАЗДЕЛ 1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АНАЛОГИ

## Аналоги

Современный рынок систем радиоуправления беспилотными летательными аппаратами представлен широким спектром производителей, каждый из которых предлагает решения с различными техническими характеристиками, функциональными возможностями и ценовыми категориями. Эти системы отличаются используемыми протоколами связи, диапазонами частот, дальностью действия и степенью интеграции с экосистемами управления БПЛА.

Компания FrSky занимает одну из ведущих позиций на рынке систем радиоуправления для любительских и профессиональных применений. FrSky разработала несколько собственных протоколов связи, среди которых наиболее известными являются D16, D8 и более современный ACCESS. Протокол D16 работает в диапазоне 2.4 ГГц и поддерживает до 16 каналов управления с использованием технологии ППРЧ, обеспечивая надежную связь на дальности до нескольких километров. Система ACCESS представляет собой эволюцию предыдущих протоколов и предлагает улучшенную помехоустойчивость, более низкую латентность и возможность беспроводного обновления прошивки приемников. Приемники FrSky отличаются компактными размерами и низким энергопотреблением, что делает их популярными для применения в малых БПЛА, включая гоночные дроны и мультикоптеры. Телеметрическая система FrSky позволяет передавать обширные данные о состоянии летательного аппарата, включая напряжение батареи, высоту, скорость, GPS-координаты и параметры работы двигателей, что обеспечивает оператору полный контроль над полетом.

FlySky представляет собой более бюджетный сегмент рынка систем радиоуправления, предлагая доступные решения для начинающих пилотов и любителей. Наиболее распространенными протоколами FlySky являются AFHDS и его улучшенная версия AFHDS 2A. Протокол AFHDS 2A работает в диапазоне 2.4 ГГц и использует технологию ППРЧ с автоматическим выбором частотных каналов для минимизации помех. Система обеспечивает дальность связи до двух километров в оптимальных условиях и поддерживает двустороннюю телеметрию, хотя набор телеметрических параметров более ограничен по сравнению с премиальными системами. Приемники FlySky характеризуются простотой настройки и совместимостью с большинством полетных контроллеров, что делает их популярным выбором для образовательных проектов и недорогих БПЛА. Аппаратура управления FlySky включает модели различного уровня сложности, от базовых четырехканальных передатчиков до многоканальных систем с программируемыми функциями и сенсорными экранами.

Компания DJI, известная своими коммерческими дронами потребительского уровня, разработала собственные системы радиоуправления, которые интегрированы в экосистему продуктов компании. Технология передачи данных DJI OcusSync представляет собой гибридную систему, объединяющую канал управления и канал передачи видео в единую структуру с применением ППРЧ и адаптивного выбора частот. OcusSync работает как в диапазоне 2.4 ГГц, так и в диапазоне 5.8 ГГц, автоматически переключаясь между ними в зависимости от уровня помех, что обеспечивает исключительную надежность связи в условиях плотной радиоэлектронной обстановки. Система обеспечивает дальность связи до семи-восьми километров с одновременной передачей видео высокой четкости с минимальной задержкой, что достигается за счет применения эффективных алгоритмов сжатия и оптимизации протоколов передачи. Более поздняя версия технологии, известная как OcusSync 3.0 и последующие итерации, включая систему O3 Air Unit, предлагает еще большую дальность и поддержку передачи видео в разрешении вплоть до 1080p с частотой кадров 60 fps. Система DJI отличается высокой степенью интеграции программного и аппаратного обеспечения, включая функции автоматического возврата домой, избегания препятствий и интеллектуальные режимы полета, что делает управление БПЛА доступным для пользователей с минимальным опытом.

RadioMaster представляет собой относительно новую компанию на рынке, которая специализируется на производстве универсальных передатчиков с открытой архитектурой и поддержкой множественных протоколов. Аппаратура RadioMaster работает на базе открытого программного обеспечения OpenTX или его форка EdgeTX, что обеспечивает гибкость настройки и возможность программирования сложных функций управления. Передатчики RadioMaster оснащаются мультипротокольными модулями, способными эмулировать протоколы различных производителей, включая FrSky, FlySky, Spektrum, Futaba и многие другие, что позволяет использовать одну аппаратуру для управления БПЛА с различными приемниками. Встроенные высокочастотные модули поддерживают современные протоколы с низкой латентностью, такие как ExpressLRS и Tracer, которые обеспечивают задержку на уровне нескольких миллисекунд и дальность связи до десятков километров при использовании усилителей мощности. Продукция RadioMaster пользуется популярностью в сообществе FPV-пилотов и энтузиастов гоночных дронов благодаря оптимальному соотношению цены и функциональности, а также возможности глубокой кастомизации.

## Принцип работы технологии псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ)

Технология псевдослучайной перестройки рабочей частоты (далее - ППРЧ) представляет собой метод передачи радиосигнала, при котором несущая частота передатчика изменяется во времени согласно определенному алгоритму, известному как псевдослучайная последовательность. Данный метод относится к классу систем с расширенным спектром и обеспечивает существенное повышение помехоустойчивости и скрытности передачи информации по сравнению с традиционными системами связи с фиксированной несущей частотой. Фундаментальная идея ППРЧ заключается в том, что передаваемый сигнал занимает в каждый момент времени лишь узкую полосу частот, но в течение сеанса связи последовательно использует множество различных частотных каналов, распределенных в широком диапазоне частот.

Математическая основа технологии ППРЧ базируется на использовании генераторов псевдослучайных последовательностей, которые создают детерминированную, но внешне случайную последовательность чисел. Эти числа определяют порядок переключения между доступными частотными каналами. Несмотря на кажущуюся случайность, последовательность является полностью детерминированной и воспроизводимой при использовании одинаковых начальных параметров, что критически важно для обеспечения синхронной работы передатчика и приемника. В качестве генераторов псевдослучайных последовательностей обычно применяются регистры сдвига с линейной обратной связью, криптографические генераторы или специализированные алгоритмы, обеспечивающие необходимую длину периода последовательности и статистические свойства, близкие к истинно случайным процессам.

Процесс синхронизации между передатчиком и приемником представляет собой одну из наиболее критичных процедур в системах ППРЧ и включает два основных этапа: начальную синхронизацию и поддержание синхронизации в процессе работы. Начальная синхронизация осуществляется при установлении соединения и требует, чтобы приемник определил текущее положение передатчика в псевдослучайной последовательности. Существует несколько методов достижения начальной синхронизации, включая использование преамбулы на фиксированной частоте, последовательный перебор возможных положений в последовательности или применение специальных синхронизирующих паттернов. После установления начальной синхронизации обе стороны должны поддерживать точное соответствие во времени между своими генераторами псевдослучайных последовательностей, что достигается использованием высокостабильных тактовых генераторов и периодической коррекцией временных сдвигов.

Частотный план системы ППРЧ определяет набор частотных каналов, между которыми осуществляется переключение, и их распределение в выделенной полосе частот. Количество частотных каналов может варьироваться от нескольких десятков до нескольких сотен в зависимости от ширины доступной полосы частот и минимального разноса между соседними каналами. Разнос между каналами должен быть достаточным для минимизации взаимного влияния сигналов на соседних частотах и учитывать нестабильность частоты генераторов. В современных системах управления БПЛА типичный разнос между каналами составляет от нескольких сотен килогерц до единиц мегагерц. Распределение каналов может быть равномерным по всей полосе частот или неравномерным с исключением участков спектра, занятых другими радиослужбами или подверженных повышенному уровню помех.

Временная структура сигнала ППРЧ характеризуется несколькими параметрами, определяющими динамику переключения частот. Длительность пребывания на одной частоте, называемая также временем скачка или временным слотом, представляет собой интервал времени, в течение которого передатчик и приемник работают на одной частоте. Выбор длительности скачка определяется компромиссом между несколькими факторами: более короткие скачки обеспечивают лучшую защиту от помех и перехвата, но требуют более быстрых синтезаторов частоты и усложняют синхронизацию, в то время как более длинные скачки позволяют передать больший объем данных за один скачок, но снижают эффективность противодействия помехам. В системах управления БПЛА длительность скачка обычно составляет от нескольких микросекунд до нескольких миллисекунд в зависимости от конкретной реализации и требований к системе.

Скорость перестройки частоты определяется как количество переключений между частотными каналами в единицу времени и обратно пропорциональна длительности скачка. Различают медленную и быструю перестройку частоты в зависимости от соотношения между длительностью символа модулированного сигнала и временем пребывания на одной частоте. При медленной перестройке в течение одного скачка передается множество информационных символов, что упрощает демодуляцию и обработку сигнала, но снижает защиту от импульсных помех. При быстрой перестройке один информационный символ передается на нескольких последовательных частотах, что обеспечивает максимальную помехоустойчивость за счет частотного разнесения, но требует более сложной обработки сигнала. В современных системах управления БПЛА обычно применяется медленная перестройка со скоростью от нескольких десятков до нескольких тысяч скачков в секунду, что обеспечивает оптимальный баланс между производительностью и сложностью реализации.

Алгоритм формирования последовательности перестройки частот определяет порядок использования доступных частотных каналов и критически влияет на свойства системы ППРЧ. Идеальная последовательность должна обладать несколькими важными свойствами: равномерным распределением, при котором все частотные каналы используются с одинаковой вероятностью; большим периодом повторения, чтобы исключить предсказуемость последовательности; низкой автокорреляцией для всех временных сдвигов, кроме нулевого, что облегчает синхронизацию; и низкой взаимной корреляцией между различными последовательностями для обеспечения возможности одновременной работы нескольких систем ППРЧ в одной полосе частот. На практике используются последовательности, сгенерированные на основе примитивных полиномов над конечными полями, последовательности максимальной длины или криптографически стойкие последовательности, получаемые из блочных или поточных шифров.

Процесс передачи данных в системе ППРЧ организован в виде последовательности пакетов или кадров, каждый из которых передается на определенной частоте, соответствующей текущему элементу псевдослучайной последовательности. Структура пакета включает служебные поля для синхронизации, адресации и контроля ошибок, а также полезную нагрузку, содержащую информационные данные. Синхронизирующая преамбула в начале пакета позволяет приемнику точно определить момент начала приема и скорректировать возможные временные рассогласования. Поле адреса или идентификатора позволяет различать пакеты, предназначенные для разных приемников, что критично при использовании нескольких БПЛА в одной зоне. Контрольные суммы или коды обнаружения и исправления ошибок обеспечивают целостность передаваемых данных и позволяют обнаруживать и в некоторых случаях исправлять искажения, возникшие в процессе передачи.

Механизм обеспечения помехоустойчивости в системах ППРЧ основан на принципе частотного разнесения и избыточности. Когда узкополосная помеха воздействует на систему ППРЧ, она влияет только на те частотные каналы, которые попадают в полосу помехи, в то время как остальные каналы остаются доступными для передачи данных. Если помеха воздействует на определенную долю частотных каналов, то соответствующая доля информационных пакетов будет искажена или потеряна. Применение протоколов с подтверждением приема и автоматической повторной передачей позволяет восстановить потерянные пакеты путем их ретрансляции на других частотах. Дополнительную защиту обеспечивает применение помехоустойчивого кодирования, при котором информация кодируется с избыточностью, позволяющей восстанавливать исходные данные даже при искажении части принятого сигнала. Комбинация частотного разнесения, повторной передачи и помехоустойчивого кодирования создает многоуровневую систему защиты, способную обеспечить надежную связь даже в условиях интенсивных радиопомех.

Энергетические характеристики системы ППРЧ определяются распределением мощности передатчика по частотному спектру и во времени. В каждый момент времени передатчик излучает сигнал на одной частоте с определенным уровнем мощности, но усредненная по времени спектральная плотность мощности оказывается распределенной по всей полосе частот, используемой для перестройки. Это распределение энергии по широкому спектру приводит к снижению спектральной плотности мощности по сравнению с узкополосными системами при одинаковой средней мощности передатчика. Низкая спектральная плотность мощности имеет несколько важных следствий: сигнал становится менее заметным для систем радиоразведки, снижается влияние на другие радиосистемы, работающие в том же диапазоне частот, и усложняется преднамеренное подавление сигнала, так как для эффективного глушения необходимо распределить мощность передатчика помех по всей используемой полосе частот.

Адаптивные алгоритмы в системах ППРЧ позволяют динамически изменять параметры работы в зависимости от текущей радиоэлектронной обстановки и требований к качеству связи. Адаптивный выбор частот основан на постоянном мониторинге уровня помех на всех доступных частотных каналах и исключении из последовательности перестройки тех каналов, на которых наблюдается превышение допустимого уровня помех. Информация о качестве каналов может собираться как на стороне приемника, так и на стороне передатчика, и обмениваться между ними через служебные сообщения. Адаптация мощности передатчика позволяет снижать энергопотребление в условиях хорошего качества связи и увеличивать мощность при ухудшении условий распространения радиоволн. Адаптация скорости передачи данных обеспечивает оптимальное использование доступной пропускной способности канала путем выбора между более скоростными, но менее помехоустойчивыми режимами модуляции и более медленными, но надежными режимами в зависимости от текущего отношения сигнал-шум.

Многопользовательский доступ в системах ППРЧ может быть организован несколькими способами, позволяющими нескольким парам передатчик-приемник одновременно работать в одной полосе частот без взаимных помех. Метод множественного доступа с кодовым разделением основан на использовании различных псевдослучайных последовательностей для разных пользователей, при этом последовательности выбираются таким образом, чтобы иметь низкую взаимную корреляцию, что минимизирует вероятность одновременного использования одной частоты несколькими передатчиками. Метод временного разделения предполагает согласованное планирование времени передачи различными пользователями таким образом, чтобы их сигналы не перекрывались во времени на одних и тех же частотах. Гибридные методы комбинируют кодовое и временное разделение для максимизации эффективности использования частотного ресурса и обеспечения возможности одновременной работы большого числа БПЛА в ограниченной зоне.

Влияние доплеровского сдвига частоты на работу систем ППРЧ становится значимым при высоких скоростях движения БПЛА относительно наземной станции. Доплеровский сдвиг приводит к изменению принимаемой частоты сигнала пропорционально скорости сближения или удаления и может составлять сотни герц или даже килогерцы в диапазоне гигагерц при скоростях движения порядка десятков метров в секунду. Для компенсации доплеровского сдвига в системах ППРЧ применяются различные методы, включая расширение полосы пропускания приемника для охвата возможного диапазона доплеровских сдвигов, адаптивную подстройку частоты на основе оценки скорости движения из GPS-данных или использование алгоритмов автоматической подстройки частоты, отслеживающих центральную частоту принимаемого сигнала.

Временная синхронизация в системах ППРЧ требует поддержания согласования между временными базами передатчика и приемника с точностью, соизмеримой с долей длительности скачка частоты. Накопление временной ошибки из-за нестабильности тактовых генераторов приводит к постепенному рассогласованию между частотами, на которых работают передатчик и приемник, и в конечном итоге к потере синхронизации. Для предотвращения этого применяются механизмы периодической ресинхронизации, при которых передатчик включает в определенные пакеты специальные синхронизирующие маркеры, позволяющие приемнику скорректировать свою временную базу. Качество временной синхронизации непосредственно влияет на надежность связи, так как даже небольшое рассогласование во времени может привести к тому, что приемник будет настроен на неправильную частоту в момент приема пакета.