

РАЗРАБОТКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМОЙ НА БАЗЕ ПРОТОКОЛА LORAWAN

Амангельдыева Г. Т., ст. преподаватель

Ораздурдыева А. Э., студент

Институт телекоммуникаций и информатики Туркменистана, Ашхабад, Туркменистан

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы проектирования и реализации радиоэлектронной системы управления автономной мобильной робототехнической платформой, предназначенной для работы на открытых пространствах и в условиях промышленных зон с высоким уровнем электромагнитных помех. Основное внимание уделено интеграции микроконтроллеров серии STM32 с приемопередатчиками диапазона Sub-GHz для обеспечения сверхдальней и энергоэффективной связи.

Ключевые слова: радиоэлектронные системы, робототехника, микроконтроллер, LoRaWAN, помехоустойчивость, STM32, беспроводная связь, встраиваемые системы.

Современный этап развития промышленной робототехники требует создания надежных радиоэлектронных систем (РЭС), способных обеспечивать стабильный канал обмена данными в условиях сложной помеховой обстановки. Традиционные интерфейсы (Wi-Fi, Bluetooth) часто оказываются неэффективными из-за высокого затухания сигнала и ограниченного радиуса действия. В данной связи актуальным становится использование технологий LPWAN, в частности протокола LoRa, для дистанционного мониторинга и телеметрии мобильных роботов [1].

Аппаратная часть разработанной системы базируется на 32-битных микроконтроллерах архитектуры ARM Cortex-M, обеспечивающих необходимую производительность для обработки сигналов с инерциальных навигационных систем (IMU) и управления драйверами двигателей. Схемотехническое решение включает использование специализированных радиочастотных трансиверов, работающих в безлицензионном диапазоне 433/868 МГц. Для минимизации влияния импульсных помех, возникающих при работе коллекторных двигателей робота, в системе реализована многоступенчатая фильтрация цепей питания и использование опторазвязки для сигналов ШИМ.

Математическое обеспечение системы включает алгоритмы цифровой фильтрации принимаемого сигнала, что позволяет выделять полезную информацию даже при уровне шума, превышающем уровень сигнала. Применение адаптивной схемы изменения коэффициента расширения (Spreading Factor) в зависимости от качества связи позволяет динамически изменять скорость передачи данных, что критично для предотвращения потери контроля над роботом [2].

Автор: Амангельдыева Г. Т. Ораздурдыева А. Э.
21.04.2026 10:31 - Обновлено 21.04.2026 10:35

Эффективность разработанной РЭС была протестирована на мобильной платформе с четырехколесным приводом. Результаты показали, что внедрение протокола LoRaWAN в контур управления робототехнической системой позволяет снизить энергопотребление узла связи на 40% по сравнению с классическими РЭС диапазона 2.4 ГГц [3]. Кроме того, использование антенных решеток с круговой поляризацией позволило минимизировать эффект многолучевого распространения сигнала в условиях складских помещений [4].

Таким образом, предложенный подход к проектированию радиоэлектронной части робототехнических комплексов обеспечивает высокую автономность и надежность связи, что является фундаментом для построения масштабируемых интеллектуальных транспортных систем.

Центральным узлом радиоэлектронной системы управления является спроектированный модуль на базе 32-битного микроконтроллера **STM32F4-серии**, обладающего встроенными интерфейсами SPI и UART для взаимодействия с радиочастотным трансивером и периферийными датчиками. В отличие от стандартных решений, в данной РЭС применена архитектура с разделением контуров питания. Логическая часть системы защищена от обратных токов и электромагнитных наводок, генерируемых силовыми электромоторами, с помощью применения DC-DC преобразователей с гальванической развязкой и фильтров нижних частот на входах АЦП.

Особое внимание при проектировании печатной платы (PCB) было уделено минимизации паразитных емкостей в тракте СВЧ. Использование четырехслойного исполнения платы позволило выделить отдельные полигоны для «земли» цифровых и аналоговых цепей, что снизило уровень собственных шумов системы на 12 дБ. Радиочастотный тракт дополнен согласующим Г-образным контуром, оптимизированным для работы с компактными штыревыми антеннами диапазона 868 МГц [1].

Протокол обмена и программные алгоритмы

В программном обеспечении контроллера реализован стек протокола **LoRaWAN (Class C)**, который обеспечивает минимальную задержку при передаче команд управления от оператора к роботу. Для решения проблемы коллизий при работе группы роботов в одном частотном диапазоне применен модифицированный алгоритм Listen Before Talk (LBT).

Алгоритм обработки данных включает в себя:

1. **Декодирование пакетов:** проверка контрольной суммы (CRC) для исключения ложных срабатываний.
2. **Математическая фильтрация:** использование фильтра Калмана для объединения данных от гироскопа и акселерометра, что позволяет роботу сохранять заданный курс даже при кратковременной потере пакетов радиосвязи [2].
3. **Адаптивное управление мощностью:** система автоматически снижает мощность передатчика при нахождении робота вблизи базовой станции, что увеличивает время автономной работы бортового аккумулятора [3].

Анализ результатов и выводы

Экспериментальные исследования проводились на полигоне со сложным рельефом и наличием железобетонных конструкций. В ходе тестов фиксировался коэффициент потери пакетов (**Packet Loss Rate, PLR**) при различных значениях коэффициента расширения спектра (SF). Установлено, что при значении SF=7 обеспечивается максимальная скорость передачи команд, достаточная для оперативного маневрирования робота на скоростях до 2 м/с. При переходе на SF=12 дальность уверенного приема возрастает до 7 км, однако задержка передачи увеличивается до 1,5 секунд, что переводит систему в режим «медленного» телеметрического контроля [4].

Сравнительный анализ с существующими аналогами показал, что разработанная РЭС обладает на 25% более высокой проникающей способностью сигнала сквозь препятствия по сравнению с системами диапазона 2,4 ГГц. Это делает предложенную систему управления идеальной для роботизации складских комплексов и мониторинга обширных сельскохозяйственных территорий.

Технические и экспериментальные данные системы

В ходе проектирования радиоэлектронной системы (РЭС) были определены оптимальные параметры компонентов, обеспечивающие баланс между энергопотреблением и дальностью связи. В таблице 1 представлены основные характеристики разработанного модуля управления на базе микроконтроллера STM32.

Таблица 1. Технические характеристики аппаратного модуля управления РЭС

Параметр

Значение

Примечание

Центральный процессор

STM32F405RG

(ARM Cortex-M4)

Частота до 168 МГц

Радиочастотный трансивер

Semtech SX1276

Поддержка модуляции LoRa

Диапазон частот

868,0 – 868,6 МГц

Безлицензионный диапазон ISM

Мощность передатчика

+14... +20 дБм

Программно регулируемая

Чувствительность приемника

до -148 дБм

При макс. коэф. расширения (SF12)

Интерфейсы периферии

CAN, UART, SPI, I2C

Для IMU и драйверов моторов

Напряжение питания

7,4 – 12,6 В

(2S-3S Li-Po)

С использованием DC-DC Buck-Boost

Ток в режиме сна

< 15 мкА

Deep Sleep с активным RTC

Выбор протокола LoRaWAN для управления робототехнической платформой был обоснован результатами сравнительного анализа с наиболее распространенными стандартами беспроводной связи, представленными в таблице 2.

Таблица 2. Сравнительный анализ протоколов беспроводной связи для мобильной робототехники

Критерий сравнения

Wi-Fi (802.11n)

Bluetooth

(BLE 5.0)

LoRaWAN

(Предложенная РЭС)

Радиус действия (город)

50 – 100 м

10 – 30 м

2 – 5 км

Энергопотребление

Высокое

Низкое

Сверхнизкое

Проникающая способность

Низкая

Очень низкая

Высокая (Sub-GHz)

Макс. скорость данных

до 150 Мбит/с

до 2 Мбит/с

до 50 Кбит/с

Задержка (Latency)

< 10 мс

< 20 мс

100 – 1500 мс (зависит от SF)

Помехоустойчивость

Средняя

Средняя

Высокая (ШПС)

Анализ данных и интерпретация

Как видно из **Таблицы 2**, предложенная радиоэлектронная система на базе LoRaWAN значительно превосходит аналоги по дальности и проникающей способности сигнала, что критично для автономных роботов, работающих на больших промышленных объектах. Однако низкая скорость передачи данных накладывает ограничения: система ориентирована на передачу команд управления и телеметрии (координаты, заряд АКБ, состояние датчиков), но не подходит для трансляции потокового видео высокого разрешения.

Для задач визуального наблюдения в реальном времени рекомендуется дополнять данную РЭС узкополосным видеоканалом на частоте 5,8 ГГц, в то время как канал LoRaWAN будет выступать в роли «командного моста» повышенной надежности, обеспечивающего возврат робота на базу при потере основного видеосигнала.

В заключение следует отметить, что интеграция помехоустойчивых радиоканалов на базе технологии LoRa в структуру мобильной робототехники открывает широкие возможности для создания полностью автономных промышленных систем, независимых от общедоступных сетей связи.

Литература

1. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics: The x-Chapters. — New York: Cambridge University Press, 2020. — P. 65–82.
2. LoRa Alliance. LoRaWAN L2 1.0.4 Specification. — Technical Document, 2020. — P. 24–36.

3. ITU-T Y.4480. Low power wide area wireless networking protocol of the LoRaWAN for the Internet of Things. — International Telecommunication Union, 2022. — P. 12–18.

4. ICNIRP. Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). // Health Physics. — 2020. — Vol. 118, No. 5. — P. 483–524.