

Сметана Никита Олеговичстудент 2-го курса, Институт информационных
технологий и систем связи**Smetana N.O.**

E-mail: smetananikita8@gmail.com

Шахтанов Сергей Валентиновичдоцент кафедры «Инфокоммуникационные
технологии системы связи»**Shakhtanov S.V.**

E-mail: r155p@bk.ru

Нижегородский государственный инженерно-
экономический университетNizhny Novgorod State University of
Engineering and EconomicsНижегородская обл., г. Княгинино,
ул. Октябрьская, д. 22А, Россия, 606340

Тел: +7 (83166) 4-15-50

ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ УПРАВЛЕНИЯ БПЛА ПО ТЕХНОЛОГИИ LORA**STAGES OF DEVELOPMENT OF UAV CONTROL USING LORA
TECHNOLOGY****Аннотация**

В статье рассматриваются ключевые этапы эволюции систем управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) с акцентом на технологию LORA (Long Range). Анализируется переход от простых радиокомандных систем к современным высокозащищённым комплексам с использованием LORA-модуляции, обеспечивающей устойчивую связь на больших расстояниях. Особое внимание уделяется этапу интеграции LORA с бортовыми автопилотами и наземными станциями управления, что позволило значительно увеличить дальность и помехозащищённость каналов телеметрии и команд. В результате исследования выделены пять этапов развития управления БПЛА на основе LORA: от появления технологии до роевых mesh-сетей. Установлено, что LORA обеспечивает устойчивую связь на дальности до 20–30 км при энергопотреблении 0,1–0,5 Вт. Основное ограничение – низкая скорость (до 27 кбит/с), исключающая видеотрафик, но достаточная для команд и телеметрии. Рассматриваются практические примеры применения LORA в гражданской и экспериментальной авиации, включая мониторинг территорий и доставку грузов.

Ключевые слова: LORA, передатчик, приёмник, сигнал, шум, антенна.

Annotation

The article examines the key stages in the evolution of unmanned aerial vehicle (UAV) control systems, with a focus on LORA (Long Range) technology. It analyzes the transition from simple radio-command systems to modern highly protected complexes using LORA modulation, which ensures reliable communication over long distances. Particular attention is paid to the stage of integrating LORA with onboard autopilots and ground control stations, which made it possible to significantly increase the range and interference resistance of telemetry and command channels. As a result of the study, five stages in the development of UAV control based on LORA are identified: from the emergence of the technology to swarm mesh networks. It is established that LORA provides reliable communication at ranges of up to 20–30 km with power consumption of 0.1–0.5 W. The main limitation is its low data rate (up to 27 kbit/s), which excludes video traffic but is sufficient for commands and telemetry. Practical examples of LORA application in civil and experimental aviation are considered, including territory monitoring and cargo delivery.

Keywords: LORA, transmitter, receiver, signal, noise, antenna.

Введение

Современные (БПЛА) стали неотъемлемой частью многих сфер деятельности – от мониторинга сельскохозяйственных угодий и геодезии до поисково-спасательных операций и военного дела. Ключевым фактором, определяющим эффективность применения дронов, является надёжная и дальнобойная система управления, способная обеспечивать устойчивый канал связи между оператором и аппаратом в условиях городской застройки, пересечённой местности и радиопомех. Традиционные радиоканалы (Wi-Fi, обычные радиочастоты) часто имеют ограничения по дальности и помехоустойчивости, что стимулирует поиск альтернативных технологий. Одним из перспективных решений стало использование технологии LORA-модуляции с расширенным спектром. В данной работе будут рассмотрены основные этапы развития систем управления БПЛА, интеграция в них технологии LORA, её преимущества.

Материалы и методы исследования

Этап 1. Появление технологии LORA (2012–2015). Разработка технологии LORA началась в 2012 году во французской компании Cysleo, которая ставила перед собой цель создать радиоканал с рекордной дальностью при минимальном энергопотреблении. В том же году Cysleo привлекла внимание американского производителя полупроводников Semtech Corporation, и компания была приобретена. Semtech продолжила развитие технологии, и в 2015 году представила первые готовые решения для рынка интернета вещей. Изначально технология задумывалась для городских систем мониторинга и сельского хозяйства, где требовалось собирать данные с тысяч удалённых датчиков.

Технология LORA представляет собой физический уровень модуляции с расширенным спектром на основе метода CSS, разработанный компанией Semtech. (рис.1). В отличие от частотной манипуляции (FSK), LORA модуляция изменяет частоту сигнала по линейному закону, создавая «чирп-импульсы», что позволяет декодировать сигналы на 20 дБ ниже уровня шума. Основные характеристики: низкое энергопотребление-высокая помехоустойчивость, дальность связи до 15-20 км на открытой местности. [1] Скорость передачи данных составляет от 0,3 до 27 кбит/с, что является компромиссом в пользу дальности. Определяющими параметрами в протоколе LORAWAN, построенном на этой модуляции, являются распространение (SF) и полоса пропускания(BW) [1, 2, 4] (рис.1).

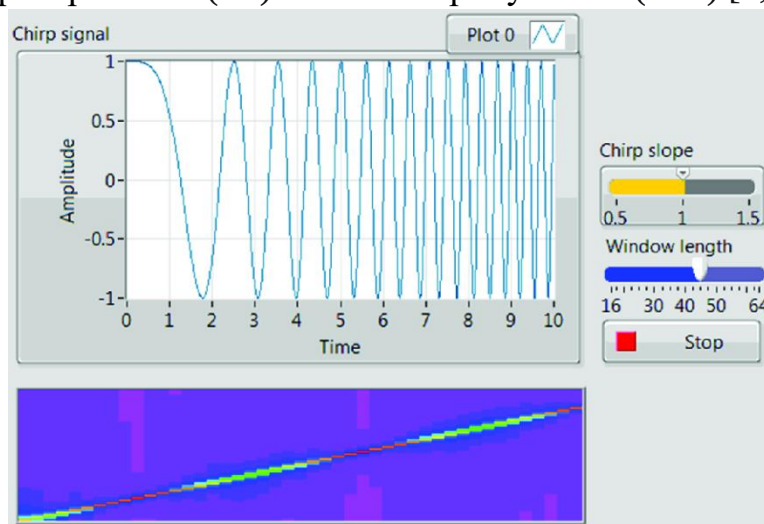


Рисунок 1 – CHIRP-сигнал

$$T = \frac{L}{V} \quad (1)$$

где: T – время передачи пакета (с);

L – длина пакета (бит);

V – скорость передачи (бит/с).

При скорости 1 кбит/с пакет в 100 байт (800 бит) будет передаваться 0,8 секунды. Формирование CHIRP – это процесс генерации колебания, частота которого линейно изменяется во времени. Такой сигнал лежит в основе CSS-модуляции, где каждый символ данных кодируется сдвигом начальной частоты чирпа, что обеспечивает высокую помехоустойчивость и дальность связи при низком отношении сигнал [1].

$$s(t) = A \times \cos(2\pi f_0 t + \pi \times \frac{B}{\tau} \times t^2 + \phi_0) \quad (2)$$

где: $s(t)$ - мгновенное значение CHIRP-сигнала;

A - амплитуда сигнала; f_0 - начальная частота (Гц);

B - ширина полосы частот (Гц);

τ - длительность чирпа (с);

B_τ - скорость изменения частоты (Гц/с);

ϕ_0 - начальная фаза.

CSS – это метод модуляции, который использует частотные свипы (chirp-сигналы) для передачи информации. Эти свипы могут изменяться линейно либо нелинейно в зависимости от конкретной реализации. LORA применяет именно этот метод, но CSS может использоваться и в других технологиях связи [1, 3].

Основой LORA является метод модуляции с расширенным спектром CSS. В отличие от классических методов, где информация кодируется амплитудой или частотой несущей, CSS использует линейное изменение частоты во времени - чирп-сигналы (рис. 2).

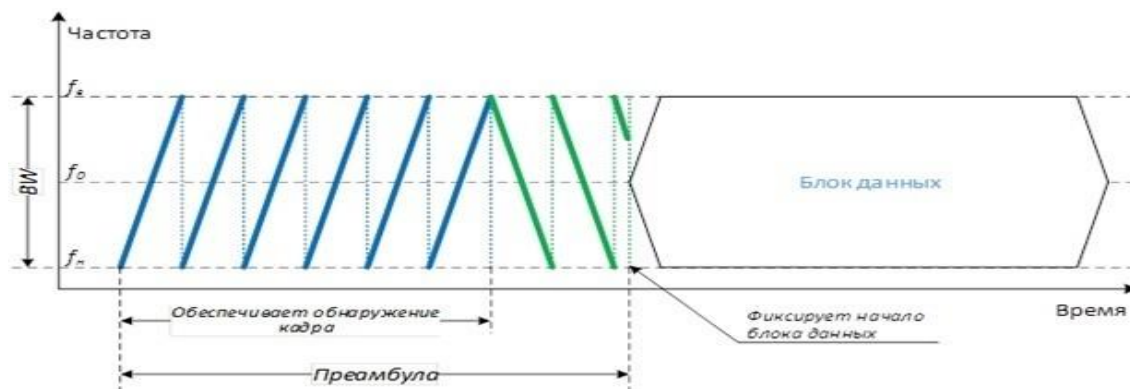


Рисунок 2 – Принцип работы метода LORA

где: BW – Полоса пропускания;

Каждый символ кодируется сдвигом начальной частоты чирпа, что позволяет приёмнику восстановить данные даже при низком отношении сигнал/шум. Именно это обеспечивает декодирование сигнала на 20 дБ ниже уровня шума.

Параметрами модуляции являются полоса пропускания и коэффициент расширения. Чем выше SF, тем больше энергия на бит и выше помехоустойчивость, но ниже скорость. Поэтому в LORA возможен гибкий выбор режима, от высокоскоростного, до дальнобойного. Широкая полоса и распределение информации по длине чирпа делают CSS устойчивым к узкополосным помехам и многолучевому распространению, что и определяет пригодность LORA для управления БПЛА на больших расстояниях.

Этап 2. Первые эксперименты с управлением БПЛА (2015-2017). Энтузиасты и исследователи начали использовать LORA как резервный или основной канал управления дронами. Полевые испытания показали, что LORA обеспечивает устойчивую связь с БПЛА на расстоянии 5-10 км, что значительно превышает возможности стандартных Wi-Fi и радиоканалов. Сигнал LORA лучше проникает через препятствия (лес, городские здания) благодаря широкополосной модуляции CSS. На этом этапе использовались стандартные LORA-модули, а управление было односторонним - только команды оператора [2, 4, 5].

$$R_{max} = R_0 \times \sqrt{\frac{P_{TX}}{P_{min}}} \quad (3)$$

где: R_{max} – максимальная дальность связи;

R_0 – дальность при эталонной мощности; P_{TX} - мощность передатчика;

$P_{\min}$ – чувствительность приёмника.

При увеличении мощности в 4 раза дальность растёт в 2 раза [2].

Этап 3. Интеграция с автопилотами и телеметрией (2017–2019). Технологию LORA начали интегрировать в популярные полётные контроллеры (Pixhawk, ArduPilot) и телеметрические радиомодемы. Появились двусторонние каналы связи: uplink (команды управления) и downlink (телеметрия: координаты, высота, статус полёта). Был разработан протокол MAVLink over LORA, позволяющий упаковывать телеметрию в LORA-пакеты. Появились первые коммерческие LORA-телеметрические системы с дальностью до 30 км в открытом поле [3, 4].

$$T_{\text{обн}} = \frac{N_{\text{пакетов}}}{f_{\text{LORA}}} \quad (4)$$

где: $T_{\text{обн}}$ – частота обновления телеметрии (с^{-1});

$N_{\text{пакетов}}$ – количество пакетов в секунду;

f_{LORA} – пропускная способность (бит/с).

При скорости 1 кбит/с и пакете 200 бит, телеметрия обновляется 5 раз в секунду [1, 3].

Этап 4. Применение в гражданских и промышленных БПЛА (2020–2023). Технология LORA стала активно использоваться в коммерческих и промышленных дронах, там где не нужна высокая частота обновления данных (передача видео через LORA невозможна из-за низкой скорости) (рис. 3). Основные области применения: мониторинг трубопроводов, ЛЭП, сельхозугодий; поисково-спасательные операции (дальняя связь с дроном в лесу или горах); доставка малых грузов. Появились гибридные системы: LORA - для управления и телеметрии, а видео - через 4G/LTE [2, 4, 5, 6, 7, 8].

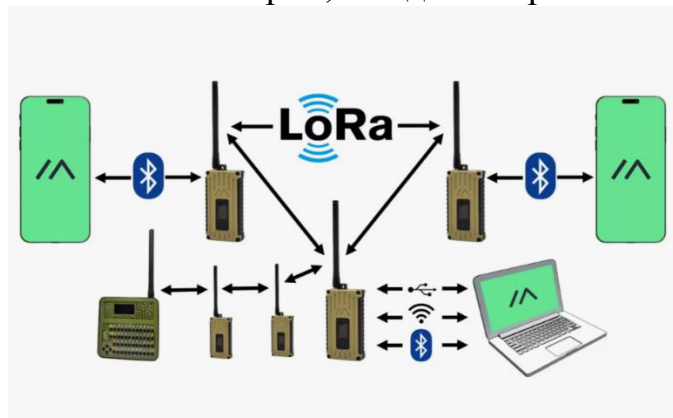


Рисунок 3 – Метод LORA

$$E = P \times t \quad (5)$$

где: E – энергопотребление бортового LORA - модуля ($\text{Вт} \cdot \text{ч}$);

P – мощность (0,1 - 0,5 Вт);

t – время работы (ч).

При мощности 0,1 Вт за 1 час полёта модуль потребляет 0,1 $\text{Вт} \cdot \text{ч}$, ничтожно мало по сравнению с двигателями дрона [1, 3, 5, 9].

Этап 5. Современное состояние и перспективы (2023 - настоящее время). Технология LORA продолжает развиваться в направлении роевого

управления БПЛА. Исследуются возможности LORA mesh-сетей, где дроны ретранслируют сигналы друг друга, образуя распределённую сеть и многократно увеличивая зону покрытия. Применяются адаптивные параметры SF/BW – динамическое изменение скорости и дальности в зависимости от удалённости дрона. Ведутся работы по объединению LORA с искусственным интеллектом для прогнозирования потери связи [5, 10].

$$N_{\text{ретранс}} = \frac{R_{\text{max}}}{D_{\text{узла}}} \quad (6)$$

где: $N_{\text{ретранс}}$ – количество необходимых ретрансляторов в роевой сети;

R_{max} – требуемая дальность (км);

$D_{\text{узла}}$ – дальность одного узла-ретранслятора (км).

При требуемой дальности 30 км и дальности одного дрона ретранслятора 5 км, нужно 6 узлов.

Помимо управления дронами, технология LORA широко применяется для автоматического снятия показаний с узлов учёта тепла, воды, газа и электричества. Благодаря низкому энергопотреблению и дальности до 15 - 20 км LORA-модули встраиваются в умные счётчики, которые регулярно отправляют данные на центральные серверы без участия человека. Это позволяет коммунальным службам отказаться от ручного обхода квартир, снизить затраты и оперативно выявлять утечки ресурсов. Такое решение уже внедрено в десятках городов России и Европы, причём здесь используются те же принципы CSS-модуляции, что и при управлении дронами, но с меньшей скоростью передачи данных [4, 5, 7].

Результаты исследования

Проведённый анализ подтвердил, что технология LORA эффективно решает проблему ограниченной дальности и помехоустойчивости традиционных радиоканалов управления БПЛА, обеспечивая устойчивую связь до 20 – 30 км в зависимости от условий. Выделенные пять этапов развития показывают эволюцию от одностороннего управления до интеграции с автопилотами, двусторонней телеметрии и современных LORA mesh-сетей для роевого применения. Установлено, что основным ограничением остаётся низкая скорость передачи данных (до 27 кбит/с), что делает технологию непригодной для видеотрансляций, но достаточной для команд и телеметрии. Универсальность LORA подтверждена её успешным внедрением в коммунальном хозяйстве для автоматического снятия показаний счётчиков, что доказывает зрелость и надёжность технологии.

Следует отдельно отметить, что выбор технологии LORA для управления БПЛА не является универсальным решением и должен рассматриваться в сравнении с альтернативными каналами связи. Так, для передачи видеопотока в реальном времени применяются аналоговые 5,8 ГГц каналы, Wi-Fi и сотовые сети 4G/LTE, обеспечивающие скорость от единиц до десятков Мбит/с. Однако эти технологии либо имеют малую дальность, либо зависят от наличия инфраструктуры базовых станций, что делает их неприменимыми в удалённой местности, лесах, горах и в условиях

радиоэлектронного противодействия. LORA выгодно отличается автономностью: для связи не требуются вышки сотовой связи, а дальность достигается за счёт узкополосной CSS-модуляции и низкой скорости передачи.

Важным преимуществом является и устойчивость к помехам. Благодаря расширению спектра и возможности декодировать сигнал при отношении сигнал/шум ниже нуля, LORA сохраняет работоспособность в условиях городской застройки, промышленных помех и при частичном подавлении канала. Это подтверждается полевыми испытаниями, в ходе которых устойчивая связь с БПЛА сохранялась на расстоянии 5-10 км в сложных условиях и до 20-30 км на открытой местности. Для сравнения: стандартные радиоканалы управления на частотах 2,4 ГГц в тех же условиях теряли связь уже на 1-3 км.

Отдельного внимания заслуживает энергоэффективность. Бортовой LORA-модуль потребляет от 0,1 до 0,5 Вт, что на порядки меньше мощности двигательной установки дрона. Это позволяет использовать технологию на малых и сверхлёгких аппаратах, где каждый грамм и каждый ватт энергии критичны.

В сочетании с низкой стоимостью модулей и открытостью протокола LoRaWAN делает LORA доступным решением, как для профессиональных, так и для любительских БПЛА.

Таким образом, LORA занимает свою нишу: она не заменяет высокоскоростные каналы, а дополняет их там, где требуются дальность, автономность и помехоустойчивость при передаче команд и телеметрии. Именно это сочетание качеств и обеспечило технологии широкое распространение – от управления дронами до автоматизированного учёта энергоресурсов.

Обсуждение результатов

Полученные данные позволяют объяснить, почему LORA закрепились именно в сегменте командной и телеметрической связи, а не в передаче видео. Решающую роль здесь играет физика CSS-модуляции: расширение спектра и линейное изменение частоты дают выигрыш в помехоустойчивости, но ограничивают скорость передачи. Именно этот компромисс, а не абсолютное превосходство технологии, определяет её место среди альтернативных каналов. Сравнение с Wi-Fi, 4G/LTE и аналоговыми 5,8 ГГц показывает, что LORA не конкурирует с ними напрямую, а закрывает те задачи, где инфраструктура связи отсутствует или ненадёжна. Показательно, что наибольший эффект достигается в гибридных схемах, где LORA отвечает за управление и телеметрию, а высокоскоростные каналы – за видеопоток. Выделенные этапы развития при этом демонстрируют не просто смену технологий, а постепенное усложнение требований к каналу связи: от односторонних команд к двустороннему обмену и роевым сетям. Это позволяет предположить, что дальнейшее развитие LORA будет связано не столько с ростом скорости, сколько с

адаптивностью параметров SF/BW и интеллектуальным управлением помеховой обстановкой.

Заключение

Технология LORA прошла путь от низового IoT-решения до полноценного канала управления БПЛА. Основные преимущества LORA - дальность (до 30 км), энергоэффективность (потребление 0,1–0,5 Вт) и помехоустойчивость. Главное ограничение – низкая скорость передачи данных (до 27 кбит/с), исключающая передачу видео. Перспективы развития связаны с роевым управлением, mesh-сетями и гибридными системами (LORA + 4G/LTE). Дальнейшие исследования направлены на адаптивные алгоритмы изменения параметров связи и интеграцию с искусственным интеллектом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гребешков А.Ю. Технологии беспроводной связи для интернета вещей: LoRa и LoRaWAN. - 1-е изд.. - Москва : Горячая линия-Телеком, 2018. - 312 С
2. Лопанцев В.И. Использование технологии LoRa в системах управления беспилотными летательными аппаратами // Использование технологии LoRa в системах управления БПЛА. - 2017. - № 6 С. 34–42.
3. Жмудь В.А., Лямин Н.А.. Разработка системы телеметрии для БПЛА на основе LoRa-модулей // Радиоэлектроника и связь. - 2019. - № 2 С. 22–29.
4. Фролов А.А., Лаврик А.С. Методы роевого управления БПЛА на основе децентрализованных сетей LoRa // Системы управления и информационные технологии. - 2023. - № 2 С. 27–34.
5. Кузнецов О.В. Применение LoRa в автоматизированных системах учёта энергоресурсов.. - 1-е изд.. - Москва : Энергия, 2021. - 144 С.
6. Шаханов С.В. Перестановочное декодирование не двоичных избыточных кодов. Вестник НГИЭИ. 2017. № 8 (75). С. 7-14.
7. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. Учебник для вузов.: Питер, 2019. 132с.
8. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети.: Питер, 2019. 186с.
9. Анпилогов В.А., Нгуен Дык Ань. Технологии LPWAN и возможность их адаптации для спутниковых сетей. Журнал IoT первая миля. Выпуск №6/2020. 10с.
10. Кумаритова Д.Л., Киричек Р.В. Обзор и сравнительный анализ технологий LPWAN сетей. Статья. СПбГУТ, Санкт-Петербург, 2018. 63с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сметана Никита Олегович – студент 3-го курса, ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет»,

г. Княгинино, Россия, E-mail: smetananikita8@gmail.com, ORCID: 0009-0004-6281-2757.

Шахтанов Сергей Валентинович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», г. Княгинино, Россия, E-mail: r155p@bk.ru, ORCID:0000-0001-8390-0351, SPIN-код: 1096-6507.