

**14. Zhou, Z.** Anti-Jamming Communication Using Imitation Learning / Z. Zhou, Y. Niu, B. Wan, W. Zhou // Entropy. – 2023. – Vol. 25, No. 11. – article 1547. – DOI: 10.3390/e25111547.

**15. Gavenski, N.** A Survey of Imitation Learning Methods, Environments and Metrics / N. Gavenski, F. Meneguzzi, M. Luck, O. Rodrigues // Proceedings of

the ACM on Measurement and Analysis of Computing Systems. – 2024. – Vol. 37, No. 4. – article 111. – P. 1-35. – DOI: 10.48550/arXiv.2404.19456.

**16. Gaspar, D.** A review on principles, performance and complexity of linear estimation and detection techniques for MIMO systems / D. Gaspar, L.L. Mendes, T.C. Pimenta // Frontiers in Communications

and Networks. – 2023. – Vol. 4. – article 968370. – DOI: 10.3389/frcmn.2023.968370.

**17. Alnaseri, O.** A Review on Deep Learning Autoencoder in the Design of Next-Generation Communication Systems / O. Alnaseri, L. Alzubaidi, Y. Himeur et al. // arXiv.org. – 2025. – arXiv: 2412.13843v2. – DOI: 10.48550/arXiv.2412.13843.

## Модель системы связи LoRa с каскадным мультиплексированием C-OChDM и анализ эффективности помехоустойчивого кодирования

**К.Ю. Рюмшин**, Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), профессор, д.т.н.; e86420@yandex.ru

**А.И. Саттарова**, МТУСИ, ассистент; ang.satt.97@gmail.com

**Д.С. Чиров**, МТУСИ, заведующий кафедрой, профессор, д.т.н.; d.s.chirov@mtuci.ru

**А.А. Фролов**, МТУСИ, доцент, к.т.н., a.a.frolov@mtuci.ru

**Ю.В. Рауткин**, 474 военное представительство Минобороны России, ведущий специалист, к.т.н.; e86420@yandex.ru

УДК 621.38

DOI: 10.34832/ELSV.2026.78.4.008

**Аннотация.** В статье представлена комплексная имитационная модель системы связи LoRa с каскадным мультиплексированием C-OChDM и проведен сравнительный анализ эффективности различных методов помехоустойчивого кодирования в условиях различных каналов передачи данных. Разработанная модель генератора LoRa-сигналов интегрирована с каскадным мультиплексированием C-OChDM, что позволило исследовать применение последовательностей де Брёйна для повышения эффективности мультиплексирования в приложениях интернета вещей (IoT).

Выполнен систематизированный анализ особенностей реализации физического уровня протокола LoRa и оценка энергетики абонентских радиолиний спутниковых IoT-систем.

**Ключевые слова:** LoRa, LoRaWAN, физический уровень, Chirp Spread Spectrum (CSS), линейно-частотная модуляция, коэффициент расширения спектра, помехоустойчивое кодирование, C-OChDM, спутниковый IoT, энергоэффективность, спектральная эффективность

**Для цитирования:** Рюмшин, К.Ю. Модель системы связи LoRa с каскадным мультиплексированием C-OChDM и анализ эффективности помехоустойчивого кодирования / К.Ю. Рюмшин, А.И. Саттарова, Д.С. Чиров и др. // Электросвязь. – 2026. – № 4. – С. 75-92.

### ВВЕДЕНИЕ

Современные беспроводные системы связи для интернета вещей сталкиваются с фундаментальной проблемой необходимости обеспечения дальней связи при ограниченной энергетике передатчиков. Технология LoRa, основанная на методе расширения спектра с линейно-частотной модуляцией (Chirp Spread Spectrum, CSS), показала высокую эффективность в решении данной задачи [1–5]. Однако её широкое внедрение, включая гибридные наземно-спутниковые системы, сталкивается с рядом проблем: закрытость спецификаций физического уровня, субоптимальная энергоэффективность по сравнению с передовыми схемами модуляции и ограниченная спектральная эффективность [1, 2, 4, 6–11].

Анализ современных научных исследований показывает, что основные подходы к улучшению характеристик LoRa сосредоточены в трех направлениях: оптимизация параметров расширения спектра [1], применение адаптивных алгоритмов управления мощностью [2] и использование комбинированных методов разделения каналов [3–5, 12]. Особый интерес представляет интеграция кодового разделения (CDM) с ортогональной линейно-частотной модуляцией (OChDM), которая может обеспечить дополнительный выигрыш в помехоустойчивости и спектральной эффективности [13, 14].

В данной работе представлен систематизированный обзор особенностей реализации физического