

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ГИБРИДНЫЙ ПРОТОКОЛ СВЯЗИ ДЛЯ РОЕВЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ

Горохов Д. Г.<sup>1</sup>, Железняк Е. В.<sup>2</sup>

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Лабковская Р. Я.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

<sup>2</sup>Московский авиационный институт  
harokhau.dg@gmail.com

### Введение

Роевые системы представляют собой перспективное направление в современной робототехнике и телекоммуникациях, обеспечивая распределенное выполнение задачи мониторинга, картографирования и координации. Ключевым ограничением автономности таких систем является энергетический ресурс каждой единицы, входящей в систему.

Традиционно, подсистема связи в роевых системах использует один из двух подходов: высокоскоростной протокол WiFi 802.11 или дальнобойный маломощный протокол LoRa [1, 2]. Существующие решения, в том числе гибридные, реализуют или энергоемкий, или фиксированный переходы, которые не учитывают энергетический ресурс и динамические условия радиоканала [3].

### Основная часть

Предлагаемый в данной работе протокол организует роевую систему как иерархическую сеть, где единицы формируют локальные кластеры с WiFi-связью внутри кластера и LoRa-связью между главами кластеров. Единица, организующая кластер, выбирается по критерию максимального остаточного заряда с учетом центральности позиции, а сами кластеры формируются методом взвешенного k-means с весами по энергии [4]. Переключение между протоколами осуществляется на основании трех параметров: уровень остаточной энергии узла, качество радиоканала RSSI (от англ. Receive Signal Strength Indicator) и SNR (от англ. Signal to Noise Ratio) и текущую топологическую связность роя. На основе этих параметров принимается взвешенное решение о переходе между WiFi и LoRa, что позволяет избежать ситуации, когда энергетически истощенный узел продолжает работать через WiFi-связь, ускоряя свой выход из строя.

Остаточная энергия узла представляет собой отношение текущего заряда к номинальной емкости аккумулятора. При снижении ниже верхнего порогового значения алгоритм начинает взвешивать переход на LoRa даже при наличии устойчивого WiFi-соединения, поскольку дальнейшая работа ускоряет исчерпание ресурса.

Деградация канала WiFi, то есть снижение RSSI ниже порога устойчивой связи или падение SNR, является самостоятельным основанием для переключения на LoRa, независимо от энергетического состояния узла. Это позволяет избежать безуспешного удержания WiFi-соединения, которое тратит энергию на повторные передачи.

Топологическая связность определяется числом соседних узлов, то есть единиц роевой системы, достижимых по WiFi-связи в текущий момент. При снижении этого числа ниже заданного минимума узел автоматически активирует LoRa-канал к главе кластера. Это гарантирует, что изолированная единица не выйдет из роевой системы даже при полном разрыве локального WiFi-сегмента.

Итоговое решение алгоритма представляет собой взвешенную сумму трех компонент, нормированную к единице. Пороговые значения и весовые коэффициенты определяются на этапе конфигурации протокола и могут быть адаптированы под конкретный тип платформы и сценарий применения. Переключение происходит плавно, чтобы избежать потерю пакетов в момент перехода.

### Выводы

Применение предложенного протокола предполагает достижение нескольких взаимосвязанных эффектов. Так, равномерное распределение нагрузки за счёт динамической кластеризации с энергетическими весами предотвращает досрочный выход из строя отдельных единиц, продлевая суммарное время работы системы как целого. Переход на LoRa в периоды низкой активности или удаления от единиц от кластера снижает среднее энергопотребление системы без принципиального ухудшения латентности координационных сообщений, поскольку их объем и частота ниже, чем у потоков полезных данных [5]. Многофакторный критерий переключения обеспечивает большую устойчивость топологии роя к внешним возмущениям по сравнению с пороговым переключением по расстоянию.

Протокол ориентирован на роевые системы, действующие в открытом пространстве на большой площади до нескольких квадратных километров. При таких условиях WiFi-связь между удаленными узлами нецелесообразна, а централизованное управление ограничено дальностью и требованиями к автономности. Протокол применим как к гомогенным роям, где все единицы имеют идентичные аппаратные характеристики, так и к гетерогенным конфигурациям, в которых не все единицы оснащены двумя радиомодулями.

Дальнейшее направление развития заключается в исследовании применимости протокола в условиях городской застройки, где многолучевое распространение существенно изменяет характеристики как WiFi-, так и LoRa-канала.

### Литература

1. Vacco, M., Barsocchi, P., Ferro, E., Gotta, A., & Ruggeri, M.: The digitisation of agriculture: A survey of research activities on smart farming. // *Array* 2019. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.array.2019.100009> (дата обращения: 10.02.2026)
2. Petäjäjärvi J., Mikhaylov K., Pettissalo M. et al: Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology // *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2017. Vol. 13, № 3. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/315119434\\_Performance\\_of\\_a\\_low-power\\_wide-area\\_network\\_based\\_on\\_LoRa\\_technology\\_Doppler\\_robustness\\_scalability\\_and\\_coverage](https://www.researchgate.net/publication/315119434_Performance_of_a_low-power_wide-area_network_based_on_LoRa_technology_Doppler_robustness_scalability_and_coverage) (дата обращения: 10.02.2026)
3. Arafat, M. Y., & Moh, S. (2019). Localization and clustering based on swarm intelligence in UAV networks for emergency communications. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(5), 8958–8976. <https://doi.org/10.1109/IJOT.2019.2925567>
4. Kuila, P., & Jana, P. K. (2014). Energy efficient clustering and routing algorithms for wireless sensor networks: Particle swarm optimization approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 33, 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2014.04.009>
5. Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., Nam, Y.-H., & Debbah, M. (2019). A tutorial on UAVs for wireless communications: Applications, challenges, and open problems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3), 2334–2360. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2902862>