

В направлении устойчивых сетей на основе воздушных базовых станций: обзор энергоэффективных протоколов маршрутизации

Дык Ту Нгуен, Т. З. Чан, А.С.А. Мутханна, А. Е. Кучерявый

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

nguen.dt@sut.ru, chan.tz@sut.ru, ammarexpress@gmail.com

Аннотация. Воздушные базовые станции всё более широко используются в различных современных приложениях благодаря их высокой маневренности и быстрой развертываемости. Однако маршрутизация данных в сети воздушных базовых станций представляет серьезную проблему из-за высокой подвижности узлов, постоянных изменений топологии и ограниченности доступных ресурсов. В данной работе представлен всеобъемлющий обзор существующих решений по энергоэффективной маршрутизации в сети воздушных базовых станций, проанализированы основные методы и возникающие вызовы, а также предложены перспективные направления для дальнейших исследований.

Ключевые слова: протокол маршрутизации, воздушная базовая станция, энергоэффективность

I. ВВЕДЕНИЕ

Воздушные базовые станции сегодня широко применяются в военных и гражданских целях [1], от задач наблюдения [2], поисково-спасательных операций до умного сельского хозяйства и автоматизированной доставки [3]. Их ключевым преимуществом является высокая маневренность и возможность доступа в опасные или труднодоступные зоны, куда человек не может или не должен проникать напрямую. Кроме того, относительно низкие эксплуатационные затраты и высокий уровень автоматизации способствуют масштабному распространению воздушных базовых станций.

Однако наибольшим препятствием в использовании воздушных базовых станций остаётся ограниченное энергоснабжение. Большинство коммерческих моделей используют литий-ионные или литий-полимерные аккумуляторы, которые обеспечивают сравнительно короткое время работы [4]. Значительную долю энергии потребляет не только двигатель, отвечающий за подъём и удержание высоты, но и бортовые вычислительные модули, обрабатывающие данные (например, обработку изображений, навигацию, автоматическое управление полётом), что требует существенных энергозатрат. Дополнительно, процессы передачи данных (поток HD-видео в реальном времени, связь с центром управления или между самими воздушными базовыми станциями) требуют высокоскоростного канала и стабильной мощности передатчика, что ещё сильнее увеличивает энергопотребление.

Ниже приведена статистика времени автономной работы различных типов воздушных базовых станций.

ТАБЛИЦА I. СРОК СЛУЖБЫ БАТАРЕИ ВОЗДУШНЫХ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ

Тип воздушной базовой станции	Среднее время полёта	Особенности
Промышленные воздушные базовые станции	Топ-класс: от 1 до 2 часов Средний класс: от 30 минут до 1 часа Малый размер: от 20 до 30 минут или меньше	Время работы от батареи зависит от размера и класса; топ-класс воздушных базовых станций обеспечивает наибольшую продолжительность полёта.
Потребительские воздушные базовые станции	От 20 до 50 минут	Расширенные функции и более высокая цена зачастую позволяют увеличить время полёта.
Профессиональные воздушные базовые станции	От 20 минут до нескольких часов	Время работы от батареи варьируется, особенно при использовании специализированных батарей.

II. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОТОКОЛОВ МАРШРУТИЗАЦИИ

В данном разделе предлагается классификация и анализ протоколов маршрутизации для роя воздушных базовых станций. Первоначально в таких сетях проводились эксперименты с протоколами, разработанными для MANET и VANET. Однако из-за описанных выше специфических особенностей роя воздушных базовых станций протоколы, изначально предназначенные для MANET и VANET, не смогли обеспечить достаточную эффективность маршрутизации на практике. В связи с этим были выдвинуты и разработаны специализированные решения, ориентированные именно на рой воздушных базовых станций.

Существующие протоколы маршрутизации для роя воздушных базовых станций, как правило, делятся на три основные категории, среди которых наиболее известны: Topology-based Routing Protocols – протоколы, основанные на топологических данных, Geographic/Position-based Routing Protocols – протоколы, использующие географическое или позиционное расположение узлов.

В рамках данных подходов информация о топологии сети и узлах используется для передачи пакетов. Протокол маршрутизации формирует подходящий

маршрут до начала передачи данных. Обычно методы маршрутизации:

- Статические протоколы маршрутизации оперируют фиксированными и неизменяемыми таблицами маршрутов, обычно предназначенными для систем со стабильной структурой, где изменения случаются редко и не требуют частых обновлений. Однако традиционные статические протоколы маршрутизации имеют крайне ограниченное применение в сетях воздушных базовых станций, поскольку не обеспечивают достаточной отказоустойчивости и не могут адаптироваться к динамическим условиям. Протокол Load Carry and Deliver Routing зачастую используется в централизованных архитектурах, где один центральный узел управляет маршрутизацией, что в сетях воздушных базовых станций приводит к перегрузкам и снижению эффективности при быстром изменении топологии. Протокол Multi-Level Hierarchical Routing (MLHR), нацеленный на решение задач масштабируемости в сетях воздушных базовых станций и мобильных платформах, также не способен оперативно реагировать на непрерывные изменения топологии из-за статической иерархической структуры. Кроме того, отсутствие механизмов динамического управления энергией делает статические решения непригодными для воздушных базовых станций с ограниченным ресурсом аккумулятора [5].
- Проактивные методы маршрутизации используют таблицы маршрутизации для хранения всех доступных маршрутов в сети. Информация в таблице маршрутизации каждой сети периодически обновляется и передается другим пользователям. Обновления таблицы маршрутизации происходят при изменениях в структуре сети. Таблица маршрутизации часто обновляется и распространяется по всей сети, но эта стратегия неэффективна в сетях бортовых базовых станций, где топология сети быстро меняется, что приводит к высокому потреблению полосы пропускания и высокому потреблению энергии. К наиболее популярным протоколам проактивной маршрутизации относятся оптимизированная маршрутизация на основе состояния канала (OLSR), которая использует многоточечные ретрансляторы (MPR) — набор узлов, выбранных для минимизации широковещательных пакетов в сети, и упорядоченный по месту назначения вектор расстояний (DSDV), который основан на алгоритме Беллмана-Форда и добавляет порядковые номера для поддержания согласованности маршрутизации и предотвращения петель [6], [7].
- Методы реактивной маршрутизации работают по требованию: они выполняют генерацию информации о маршрутизации по требованию только тогда, когда нет доступного маршрута между двумя узлами, запускают процесс обнаружения маршрута и только после этого начинают передачу данных. Данный подход,

реализованный в протоколах DSR (Dynamic Source Routing) [8] и AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) [9], позволяет экономить пропускную способность сети, поскольку таблицы маршрутов обновляются только при необходимости, однако повторные сеансы поиска маршрутов при изменении топологии продолжают существенно потреблять энергию, особенно в динамичной среде воздушных базовых станций.

- Гибридные протоколы маршрутизации сочетают принципы проактивных и реактивных подходов, стремясь нивелировать их слабые места: по сравнению с чисто проактивными схемами они снижают затраты на обслуживание сети, а относительно реактивных — сокращают задержки при поиске маршрутов. Наиболее известными примерами гибридных решений являются ZRP (Zone Routing Protocol) и TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm), которые лучше всего подходят для крупных сетей [10].

Протоколы географической/позиционной маршрутизации (Geographic/Position-based Routing Protocols): Данные протоколы используют географическое расположение (координаты) узлов для определения оптимального маршрута передачи данных, вместо статичных таблиц маршрутизации или сложной информации о связях, характерной для традиционных протоколов. Подобный подход особенно эффективен в динамичных роях воздушных базовых станций, но имеет существенное ограничение в виде требования о наличии точной геопозиционной информации, которая может быть недоступна в районах со слабым сигналом GPS или при наличии помех. Протоколы позиционной маршрутизации делятся на две основные категории: протоколы, основанные на одном пути (single-path), протоколы, использующие несколько путей (multi-path). Обе указанные категории могут дополнительно классифицироваться на сети с допуском задержек (DTN) и сети без допуска задержек (Non-DTN).

- Протоколы маршрутизации в сетях с допуском задержек (DTN): Подходы данного типа эффективно решают проблемы, связанные с частыми разрывами соединений в VANET, где путь к целевому узлу может часто теряться. Обычно для таких протоколов характерен метод store-carry-forward, при котором узел, не имеющий прямого маршрута к пункту назначения, временно сохраняет данные до появления подходящего звена. Хотя это решение существенно снижает нагрузку на сеть за счёт исключения дополнительных управляющих пакетов, оно вносит задержки в процесс передачи. При этом большие задержки делают подобные методы недостаточно эффективными для приложения реального времени, а длительное хранение пакетов требует дополнительной энергии и ресурсов памяти.
- Протоколы маршрутизации в сетях без допуска задержек (Non-DTN): Данные протоколы разработаны для сред с высокой степенью связности и относительно плотным размещением узлов. Однако при отсутствии гарантированного уровня подключённой их эффективность может

заметно снижаться. Как правило, в них применяется т.н. “жадная” (greedy) передача, при которой пакеты пересылаются на ближайший к пункту назначения узел []. Если отправитель не обнаруживает узла, более близкого к цели, чем он сам, процесс передачи может прерываться, и система должна запустить механизм восстановления, что связано с дополнительными затратами энергии. Эти методы демонстрируют высокую производительность в густонаселённых сетях за счёт низких накладных расходов, хорошей масштабируемости и небольших требований к памяти. В условиях же разреженных сетей либо при отсутствии ближайшего подходящего узла возникает необходимость в активации энергозатратных процедур восстановления маршрута.

III. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

На сегодняшний день существует множество исследований, направленных на снижение энергопотребления в протоколах маршрутизации сетей воздушных базовых станций, учитывая высокую динамичность подобных систем и ограниченные ресурсы бортового питания. Ниже приведены некоторые характерные подходы:

- Статья [11] предлагают многоцелевой протокол маршрутизации (MO OLSR) на основе традиционного OLSR для оптимизации энергопотребления в сетях базовых станций на базе воздушных судов. Метод оптимизации энергопотребления достигается путем улучшения процесса выбора узлов MPR (Multipoint Relay) путем одновременной интеграции нескольких важных показателей, включая оставшуюся энергию узла, нагрузку связи, использование буфера и стабильность соединения. В частности, индекс оценки энергии применяется для удаления узлов с уровнем энергии ниже заданного порогового значения, гарантируя, что в качестве MPR будут выбраны только узлы с высоким уровнем доступной энергии. Этот механизм не только помогает сократить количество ненужных пакетов управления, но и более равномерно распределяет энергетическую нагрузку по всей сети базовых станций. Результаты моделирования показывают, что по сравнению с исходным протоколом OLSR протокол MO OLSR обеспечивает снижение энергопотребления примерно на 20%, при этом значительно улучшая задержку и надежность связи, тем самым демонстрируя эффективность многоцелевого подхода в контексте высокодинамичных систем базовых станций на базе воздушных судов.
- В статье [12] авторы предлагают протокол EP OLSR – расширенную версию OLSR – для оптимизации энергопотребления в сетях базовых станций на воздушных судах. EP OLSR использует кросс-уровневую конструкцию для интеграции информации с физического, MAC- и сетевого уровней, что позволяет регулировать уровень мощности передачи в соответствии с условиями канала и расстоянием между базовыми станциями на борту воздушных судов. В то же время протокол улучшает процесс выбора узла

MPR, учитывая показатели остаточной энергии, нагрузки и стабильности соединения, что сокращает количество управляющих пакетов и экономит энергию. Результаты моделирования на OPNET показывают, что EP OLSR обеспечивает более высокую пропускную способность, меньшую задержку и значительно меньшее потребление энергии по сравнению с традиционным OLSR.

- Использование прогнозирования энергопотребления и методов машинного обучения. Помимо совершенствования традиционных схем маршрутизации, современные работы исследуют возможности предиктивного управления энергией и машинного обучения для оптимизации протоколов в сетях воздушных базовых станций. Такие решения опираются на данные о фактическом энергопотреблении, положении и траекториях перемещения узлов для прогнозирования состояния сети и оценки качества доступных маршрутов [13], [14]. Это позволяет выбирать пути передачи, минимизирующие совокупное энергопотребление и в то же время сохраняющие надёжность соединений. К числу рассматриваемых методов относятся алгоритмы обучения с подкреплением [15], [16], [17], [18], скрытые марковские модели, а также различные способы анализа данных, повышающие точность предсказания изменений в топологии сети. Несмотря на то, что подобные подходы на базе машинного обучения пока находятся на начальной стадии разработки и сталкиваются с проблемами вычислительной сложности и необходимости обширных обучающих выборок, они уже продемонстрировали высокий потенциал по снижению энергозатрат в динамичных условиях сети воздушных базовых станций.

IV. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

Одним из ключевых векторов развития является использование продвинутых методов машинного обучения (глубокое обучение с подкреплением, meta-learning) в сочетании с обработкой больших данных (Big Data). Такая интеграция позволит протоколам маршрутизации в высоко динамичных сетях воздушных базовых станций заранее прогнозировать состояние энергоресурсов и изменения в топологии. Особенно актуальны здесь концепции ройевого интеллекта (Swarm Intelligence), обеспечивающие самоорганизацию роя воздушных базовых станций, которые в реальном времени обмениваются сведениями об уровне заряда аккумуляторов, качестве каналов связи и сетевой нагрузке, поддерживая при этом устойчивое энергопотребление на большой территории.

В подобном контексте алгоритмы машинного и глубокого обучения, нацеленные на оптимизацию энергопотребления (включая компактные варианты сверхточных нейронных сетей, CNN), могут выполнять роли предсказания, поиска маршрутов и динамической настройки политик маршрутизации на основе оперативно собираемых данных. В частности, протокол мониторит текущее состояние аккумуляторов воздушных базовых станций, своевременно распределяя и «разделяя» нагрузку с узлов, ресурсы которых близки

к исчерпанию, на соседние узлы. Таким образом достигается баланс расхода энергии и увеличивается продолжительность работы сети. Такой подход одновременно снижает вычислительные и энергетические затраты на коммуникацию, повышая при этом качество обслуживания в приложениях с высокими требованиями к производительности и пропускной способности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] N. Mansoor, Md. I. Hossain, A. Rozario, M. Zareei, and A. R. Arreola, "A Fresh Look at Routing Protocols in Unmanned Aerial Vehicular Networks: A Survey," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 66289–66308, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3290871.
- [2] C.-X. Wang, J. Huang, H. Wang, X. Gao, X. You, and Y. Hao, "6G Wireless Channel Measurements and Models: Trends and Challenges," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 15, no. 4, pp. 22–32, Dec. 2020, doi: 10.1109/MVT.2020.3018436.
- [3] Y. Yamazaki, M. Tamaki, C. Premachandra, C. J. Perera, S. Sumathipala, and B. H. Sudantha, "Victim Detection Using UAV with On-board Voice Recognition System," in 2019 Third IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC), Feb. 2019, pp. 555–559. doi: 10.1109/IRC.2019.00114.
- [4] S. Jiao, G. Zhang, M. Zhou, and G. Li, "A Comprehensive Review of Research Hotspots on Battery Management Systems for UAVs," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 84636–84650, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3301989.
- [5] C.-M. Cheng, P.-H. Hsiao, H. T. Kung, and D. Vlah, "Maximizing Throughput of UAV-Relaying Networks with the Load-Carry-and-Deliver Paradigm," in 2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Mar. 2007, pp. 4417–4424. doi: 10.1109/WCNC.2007.805.
- [6] P. Jacquet, P. Muhlethaler, T. Clausen, A. Laouiti, A. Qayyum, and L. Viennot, "Optimized link state routing protocol for ad hoc networks," in *Proceedings. IEEE International Multi Topic Conference, 2001. IEEE INMIC 2001. Technology for the 21st Century*, Dec. 2001, pp. 62–68. doi: 10.1109/INMIC.2001.995315.
- [7] C. E. Perkins and P. Bhagwat, "Highly dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector routing (DSDV) for mobile computers," *ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 24, no. 4, pp. 234–244, Oct. 1994, doi: 10.1145/190809.190336.
- [8] D. B. Johnson, D. A. Maltz, and J. Broch, "DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks".
- [9] S. R. Das, C. E. Perkins, and E. M. Belding-Royer, "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," *Internet Engineering Task Force, Request for Comments RFC 3561*, Jul. 2003. doi: 10.17487/RFC3561.
- [10] L. Wang and S. Olariu, "A two-zone hybrid routing protocol for mobile ad hoc networks," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 15, no. 12, pp. 1105–1116, Dec. 2004, doi: 10.1109/TPDS.2004.73.
- [11] A. A. Ateya, A. Muthanna, I. Gudkova, Y. Gaidamaka, and A. D. Algarni, "Latency and energy-efficient multi-hop routing protocol for unmanned aerial vehicle networks," *Int. J. Distrib. Sens. Netw.*, vol. 15, no. 8, p. 155014771986639, Aug. 2019, doi: 10.1177/1550147719866392.
- [12] H. Nawaz and H. M. Ali, "Efficient Power and Routing in UAV Communication Networks," in 2019 IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD), Jakarta, Indonesia: IEEE, Jun. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICIRD47319.2019.9074617.
- [13] T. Zhou, F. Yan, F. Shen, W. Xia, and L. Shen, "A Geographic Location Prediction-based Routing Algorithm for Flying Ad Hoc Networks," in 2023 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), Dalian, China: IEEE, Aug. 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICCC57788.2023.10233502.
- [14] M. Gharib, F. Afghah, and E. S. Bentley, "LB-OPAR: Load balanced optimized predictive and adaptive routing for cooperative UAV networks," *Ad Hoc Netw.*, vol. 132, p. 102878, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.adhoc.2022.102878.
- [15] C. He, S. Liu, and S. Han, "A Fuzzy Logic Reinforcement Learning-Based Routing Algorithm For Flying Ad Hoc Networks," in 2020 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Big Island, HI, USA: IEEE, Feb. 2020, pp. 987–991. doi: 10.1109/ICNC47757.2020.9049705.
- [16] O. Aruna and A. Sharma, "An Adaptive-based Predicted Nodes Behavior Algorithm in Flying Ad Hoc Networks," in 2023 5th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT), Jan. 2023, pp. 592–598. doi: 10.1109/ICSSIT55814.2023.10060941.
- [17] Y. Ke et al., "Distributed Routing Optimization Algorithm for FANET Based on Multiagent Reinforcement Learning," *IEEE Sens. J.*, vol. 24, no. 15, pp. 24851–24864, Aug. 2024, doi: 10.1109/JSEN.2024.3415127.
- [18] C. Liu, Y. Wang, and Q. Wang, "PARouting: Prediction-supported adaptive routing protocol for FANETs with deep reinforcement learning," *Int. J. Intell. Netw.*, vol. 4, pp. 113–121, 2023, doi: 10.1016/j.ijin.2023.05.002.