УДК 004.728.5:621.398
https://doi.org/10.31854/2307-1303-2026-14-3-11-40
EDN: WGSWDG

Анализ протоколов маршрутизации OLSR и AODV для высокомобильных сетей воздушных базовых станций: экспериментальное исследование производительности в различных сценариях применения

Нгуен Д. Т., Филина Н. Р. ✉, Мутханна А. С. А., Кучерявый А. Е.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка задачи. *Стремительное развитие технологий воздушных базовых станций приводит к формированию ad-hoc сетей воздушных базовых станций, которые находят применение в сферах телекоммуникаций, мониторинга безопасности, аварийно-спасательных операций, управления чрезвычайными ситуациями, точного земледелия и транспортировки грузов. Однако трехмерная мобильность узлов и динамически изменяющаяся топология сети существенно усложняют разработку эффективных решений маршрутизации. Традиционные протоколы маршрутизации, разработанные для мобильных ad-hoc сетей (MANET), не оптимизированы для характеристик воздушной среды, что ограничивает их применимость в критически важных сценариях с жесткими требованиями к задержке, пропускной способности и надежности. Задача исследования заключается в сравнительной оценке производительности протоколов маршрутизации OLSR и AODV при изменении количества узлов, скорости и модели движения, а также размера области моделирования.* ***Цель работы:*** *анализ и моделирование протоколов OLSR и AODV в различных сценариях развертывания ad-hoc сетей воздушных базовых станций с последующей оценкой их эффективности и разработкой рекомендаций по выбору протокола в зависимости от условий развертывания сети.* ***Используемые методы:*** *исследование основано на моделировании сетевых сценариев развертывания воздушных базовых станций, анализе ключевых сетевых метрик (задержка, пропускная способность, коэффициент доставки пакетов и джиттер) и сравнительной оценке протоколов OLSR и AODV в условиях динамической топологии. Элементами* ***научной новизны*** *являются: комплексное сравнение реактивного и проактивного протоколов маршрутизации в контексте ad-hoc сетей воздушных базовых станций; учет трехмерной мобильности узлов и динамики топологии воздушной сети; разработка рекомендаций по выбору протокола с учетом условий развертывания сети и требований к качеству обслуживания.* ***Результаты*** *моделирования позволили выявить преимущества и ограничения протоколов OLSR и AODV в различных сценариях развертывания, а также сформулировать рекомендации по выбору протокола с учетом рассматриваемых показателей производительности и условий развертывания сети.* ***Теоретическая и практическая значимость:*** *полученные результаты расширяют представления о применимости протоколов маршрутизации в ad-hoc сетях воздушных базовых станций и могут быть использованы при проектировании телекоммуникационных систем на базе БПЛА, систем мониторинга и аварийно-спасательных платформ, требующих высокой надежности и быстрого реагирования.*

Библиографическая ссылка на статью:
Нгуен Д. Т., Филина Н. Р., Мутханна А. С. А., Кучерявый А. Е. Анализ протоколов маршрутизации OLSR и AODV для высокомобильных сетей воздушных базовых станций: экспериментальное исследование производительности в различных сценариях применения // Информационные технологии и телекоммуникации. 2026. Т. 14. № 3. С. 11–40. DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-3-11-40. EDN: WGSWDG

Reference for citation:
Nguyen D. T., Filina N., Muthanna A., Koucheryavy A. Analysis of OLSR and AODV Routing Protocols for Highly Mobile Aerial Base Station Networks: Experimental Performance Evaluation in Various Application Scenarios // Telecom IT. 2026. Vol. 14. Iss. 3. PP. 11–40. (in Russian). DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-3-11-40. EDN: WGSWDG

© Нгуен Д. Т., Филина Н. Р., Мутханна А. С. А., Кучерявый А. Е., 2026

Ключевые слова: *воздушные базовые станции, ad-hoc сети, маршрутизация, OLSR, AODV, беспилотные летательные аппараты, динамическая топология, низкая задержка, пропускная способность, надежность сети*

Введение

В контексте быстрого прогресса телекоммуникационных технологий воздушным базовым станциям уделяется все больше внимания в исследованиях, они находят широкое практическое применение. В отличие от традиционных способов связи, зависящих от наземной инфраструктуры, воздушные базовые станции обеспечивают возможность расширения телекоммуникационной сети в воздушное пространство, способствуя оптимизации зоны покрытия, снижению затрат на развертывание и гибкой адаптации к современным коммуникационным потребностям. Тем не менее создание телекоммуникационной инфраструктуры на основе воздушных базовых станций требует решения ряда проблем, особенно связанных с возможностями маршрутизации, обменом данными в реальном времени и обеспечением качества обслуживания.

В сочетании с прорывами в области электроники, беспроводной связи, искусственного интеллекта и аккумуляторных технологий воздушные базовые станции рассматриваются как одна из важнейших платформ для развития телекоммуникационной инфраструктуры нового поколения. Кроме того, конвергенция решений граничных вычислений [1], технологий 5G–6G и тенденций Интернета вещей позволяет воздушным базовым станциям выступать не только в роли устройств сбора информации, но и обрабатывать, передавать и даже предоставлять услуги подключения для других объектов [2].

В настоящее время воздушные базовые станции внедряются в следующих практических телекоммуникационных сценариях:

– временные мобильные вещательные станции: на массовых мероприятиях или в зонах чрезвычайных ситуаций воздушные базовые станции, оснащенные станциями gNodeB (5G) или eNodeB (4G), могут помочь увеличить емкость сети, временно расширить зону покрытия без необходимости строительства громоздкой наземной инфраструктуры [2];

– решения «последней мили»: в горных условиях или в районах с неразвитой инфраструктурой воздушные базовые станции выполняют функцию промежуточной связи между конечными точками доступа (пользовательским оборудованием) и наземными базовыми станциями, значительно улучшая качество соединения;

– мониторинг и сбор данных: благодаря возможности гибкого перемещения воздушные базовые станции могут непрерывно обновлять данные изображений, видео или информацию об окружающей среде для передачи в центр обработки, обслуживая городское управление (системы «умный город»), точное земледелие или мониторинг климатических изменений [3].

Гармоничное сочетание воздушных базовых станций и передовых телекоммуникационных технологий стимулировало цифровизацию многих экономических и социальных видов деятельности, способствуя повышению эффективности работы, снижению затрат и открытию новых бизнес-моделей.

В контексте появления новых телекоммуникационных технологий (телеприсутствие, виртуальная реальность, умная медицина и сети 5G / 6G) использование воздушных базовых станций как гибкого, экономичного и эффективного решения для мониторинга и экстренной поддержки становится все более актуальным [4]. Благодаря возможности непрерывной радиопередачи, обработки данных в реальном времени и высокой мобильности воздушные базовые станции могут быстро устанавливать «коммуникационные мосты» в районах с нарушенной или труднодоступной инфраструктурой. Таким образом, спасательные команды и командные центры могут обмениваться информацией, изображениями, «живым» видео высокого разрешения для отслеживания ситуации, локализации пострадавших и принятия своевременных мер. В частности, в таких сферах, как телемедицина, воздушные базовые станции не только поддерживают передачу критически важных данных, онлайн-консультации, но и могут транспортировать оборудование или медицинские образцы в изолированные районы, способствуя сокращению времени и повышению эффективности лечения. Кроме того, развертывание воздушных базовых станций не требует строительства сложной наземной инфраструктуры (такой как стационарные антенны или оптоволоконные кабели), что помогает экономить финансовые, человеческие и временны́е ресурсы по сравнению с традиционными решениями. Благодаря этому воздушные базовые станции играют важнейшую роль в системах интеллектуальных телекоммуникаций – поддерживая мониторинг чрезвычайных ситуаций, расширяя зону покрытия и создавая платформу для современных услуг, таких как телеприсутствие, виртуальная реальность или умная медицина в сценариях, требующих немедленности и высокой надежности.

Проблемы связи и маршрутизации в сетевой среде воздушных базовых станций

Системы воздушных базовых станций, хотя и обладают множеством прорывных возможностей в области телекоммуникаций, сталкиваются с рядом технических проблем – ограниченностью ресурсов узлов и сетей, повышенной мобильностью сетевых узлов, воздействием внешних факторов, – особенно когда требования к пропускной способности, задержке и надежности постоянно растут. Эти препятствия становятся более очевидными, когда возникает необходимость скоординированной работы воздушных базовых станций в трехмерном пространстве, при постоянном перемещении в котором они должны поддерживать стабильное соединение.

Высокая топологическая динамика и трехмерное пространство. Из-за специфики движения в воздухе с высокой скоростью и постоянно меняющейся высотой воздушные базовые станции часто создают нестабильные радиосвязи. Традиционные протоколы маршрутизации, разработанные для наземной среды MANET, не могут своевременно реагировать на внезапные разрывы связи, приводящие к нестабильности сети. Для решения этой проблемы требуется кастомизация используемых протоколов или разработка новых алгоритмов маршрутизации, способных эффективно адаптироваться к топологическим возмущениям.

DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-3-11-40
URL: https://www.sut.ru/doci/nauka/1AEA/ITT/2026_3/11-40.pdf

Ограничения по энергии и радиоресурсам. Помимо выполнения функции полета воздушные базовые станции должны поддерживать непрерывный обмен данными по радиоканалам с ограниченной пропускной способностью. Для оптимизации времени работы система вынуждена находить «точку равновесия» между эффективностью передачи данных и энергопотреблением. В то же время высокоскоростная передача информации (HD-видео или услуги реального времени) выставляет еще более строгие требования к использованию радиоресурсов.

Помехи и затухание канала передачи. Функционируя на большой высоте и в открытом пространстве, воздушные базовые станции легко подвергаются воздействию многих внешних факторов (погода, рельеф местности, препятствия, отражения волн и т. д.). Нестабильный канал передачи требует чрезвычайно гибких механизмов регулирования мощности, выбора схемы модуляции и кодирования, а также адаптации маршрутов. Без оптимизации явления затухания сигнала и помех серьезно снижают возможность поддержания соединения, что приводит к высокому уровню потери пакетов.

Требования к качеству обслуживания, низкой задержке и сетевой безопасности. Многие приложения воздушных базовых станций, особенно в области мониторинга и экстренной поддержки, требуют передачи данных с высокой надежностью и очень низкой задержкой. Протоколы маршрутизации, не настроенные для удовлетворения этих требований, могут привести к перегрузкам, превышению пороговых задержек или появлению уязвимостей безопасности.

На этом фоне исследование и оценка протоколов маршрутизации для сетей воздушных базовых станций имеют большое значение для определения подходящего решения с точки зрения скорости отклика, способности поддерживать соединение и эффективности использования ресурсов. В рамках данного исследования смоделированы и проанализированы два протокола – OLSR и AODV – при различных условиях работы, таких как скорость перемещения воздушных базовых станций, модель движения, количество узлов воздушных базовых станций в сети и размер операционной зоны. Путем измерения показателей пропускной способности, задержки, коэффициента доставки пакетов и джиттера (вариации задержки) предполагается выявить преимущества и ограничения каждого протокола и сформулировать рекомендации по его выбору для рассматриваемых условий работы сети. Полученные результаты будут способствовать выбору подходящей модели маршрутизации, эффективно отвечающей строгим требованиям к качеству обслуживания, надежности и гибкости для современной сетевой среды воздушных базовых станций.

Классификация протоколов маршрутизации в сетях воздушных базовых станций

В последние годы сети воздушных базовых станций привлекают повышенное внимание, однако из-за трехмерного пространства функционирования и высокой скорости перемещения летательных аппаратов поддержание стабильного канала связи является особенно проблематичным. Для решения этой задачи были предложены различные методы маршрутизации, фокусирующиеся на механизмах

гибкого поддержания и обновления информации о соединениях. В целом протоколы маршрутизации для сетей воздушных базовых станций можно разделить на пять основных групп: проактивные (Proactive) [5], реактивные (Reactive) [6], гибридные (Hybrid) [7], географические (Geographic) [8] и основанные на роевом интеллекте / обучении с подкреплением (Swarm Intelligence) [9].



Рис. 1. Классификация протоколов маршрутизации для воздушных базовых станций

Проактивные протоколы разработаны для поддержания готовых маршрутов ко всем узлам сети через процесс периодического обновления информации о состоянии соединений или таблиц маршрутизации. С этой характеристикой время установления маршрута в начале передачи данных сокращается, поскольку маршруты к цели уже доступны в таблице. В среде быстро движущихся воздушных базовых станций проактивные протоколы обычно эффективно работают благодаря способности быстро реагировать на небольшие изменения в топологии, одновременно обеспечивая общий обзор для более простого управления и мониторинга маршрутов. Тем не менее, когда воздушные базовые станции, как правило, постоянно перемещаются и топология быстро меняется, проактивные протоколы могут использовать значительную часть полосы пропускания и энергии для поддержания состояния маршрутов. Эти ограничения становятся особенно заметными при расширении масштаба сети. Яркими примерами проактивной группы протоколов являются OLSR (*аббр. от англ.* Optimized Link State Routing – оптимизированная маршрутизация с отслеживанием состояния линий связи), который реализует механизм MPR (*аббр. от англ.* Multi-Point Relay – многоточечная ретрансляция) для уменьшения количества широковещательных пакетов, или DSDV (*аббр. от англ.* Destination-Sequenced Distance Vector – проактивный протокол маршрутизации для беспроводных самоорганизующихся мобильных сетей, основанный на классическом алгоритме Беллмана – Форда) в сочетании с порядковыми номерами для обеспечения согласованности процесса маршрутизации [5, 10].

Реактивные протоколы в отличие от проактивной стратегии устанавливают маршруты только при необходимости передачи данных. Этот подход позволяет уменьшить объем обмениваемой информации, поскольку не требует постоянно поддерживать актуальность топологических данных. Для сетей воздуш-

ных базовых станций в условиях неравномерности сетевого трафика или в периоды без передачи данных механизм поиска маршрута «по требованию» (on-demand) оказывается более гибким, помогая экономить полосу пропускания и энергию. Однако очевидным недостатком является увеличение времени начальной инициализации маршрута, что может вызвать задержки при необходимости внезапной отправки пакетов. Кроме того, если скорость перемещения воздушных базовых станций слишком высока, механизм поиска постоянно активируется, приводя к перегрузке сети или повторению процесса установления соединения. В реактивной группе двумя широко используемыми протоколами являются AODV (*аббр. от англ*. Ad hoc On-demand Distance Vector – протокол маршрутизации по требованию на основе векторов расстояния для ad-hoc сетей) и DSR (*аббр. от англ*. Dynamic Source Routing – динамическая маршрутизация «от источника»): первый из которых использует порядковые номера для избежания петель в сети, а второй использует кэш маршрутов (route cache) – локальное хранилище ранее найденных маршрутов, позволяющее повторно использовать известные пути [6, 11].

Гибридные протоколы с разделением сети на зоны или кластеры были созданы, чтобы использовать сильные стороны как проактивного, так и реактивного подходов. В локальном масштабе протокол функционирует проактивно для быстрого реагирования при необходимости отправки пакетов. Напротив, между зонами или кластерами применяется реактивный метод для ограничения ненужного широковещательного распространения информации в больших масштабах. В среде сетей воздушных базовых станций этот подход помогает минимизировать нагрузку по обмену таблицами маршрутизации, одновременно обеспечивая время отклика в ближней зоне. Тем не менее поддержание границ зон и управление кластерами усложняется при постоянном перемещении воздушных базовых станций или увеличении масштаба сети. Типичным примером гибридной группы является ZRP (*аббр. от англ*. Zone Routing Protocol – протокол зональной маршрутизации), который исследовался для MANET и также предлагается для применения в сетях воздушных базовых станций [12].

С развитием технологий позиционирования, таких как GPS и высокоточные сенсорные системы, *маршрутизация на основе географического положения* рассматривается как перспективное решение для сетей воздушных базовых станций. Вместо всей информации о состоянии соединений узлы хранят только текущее положение и координаты цели для передачи данных по методу жадной пересылки (greedy forwarding). Этот подход значительно снижает затраты на поддержание таблиц маршрутизации, поскольку узлу нужно знать только ближайшее окружение, а не распознавать весь маршрут через множество сегментов. Однако географические протоколы все еще сталкиваются с трудностями, если данные о местоположении неточны или в трехмерной модели пространства появляются пустоты (void), скрывающие сигнал. Широко используется протокол GPSR (*аббр. от англ*. Greedy Perimeter Stateless Routing – маршрутизация по жадному периметру без учета состояния), сочетающий использование жадного алгоритма (greedy algorithm) и периметрального обхождения пустот для гибкой адаптации к различным сценариям сетей воздушных базовых станций [13, 14].

Помимо традиционных решений, применение *роевого интеллекта* (Swarm Intelligence) и *обучения с подкреплением* (Reinforcement Learning) открывает новые направления в маршрутизации сетей воздушных базовых станций. Вместо опоры только на таблицы маршрутизации узлы воздушных базовых станций могут обучаться на основе наблюдений за движением узлов и состоянием радиоканала, постепенно корректируя решения о передаче данных. Этот подход моделирует процесс эволюции стай насекомых или птиц, позволяя сетям воздушных базовых станций хорошо адаптироваться к внезапным изменениям в топологии и условиях передачи сигнала. Тем не менее вычислительная сложность и потребность в синхронизации информации между воздушными базовыми станциями могут порождать значительные затраты, особенно в условиях ограниченных ресурсов. Такие модели, как ACO (*аббр. от англ*. Ant Colony Optimization – оптимизация колонии муравьев) или Bee-inspired Routing (маршрутизация на основе поведения пчел), используют механизм виртуальных феромонов для «направления» передачи, в то время как Q-learning фокусируется на механизме вознаграждения – наказания за каждый выбор, стремясь к оптимизации целей по пропускной способности или задержке.

Механизм работы протокола OLSR

Протокол OLSR разработан на основе идеи протоколов состояния связи (link-state), но более оптимизирован благодаря использованию механизма MPR. Суть OLSR заключается в том, что каждый узел в сети регулярно обменивается маршрутной информацией и информацией о состоянии связи с соседними узлами, тем самым создавая глобальную таблицу маршрутизации без необходимости ожидания запроса на передачу данных. Благодаря этой «проактивной» характеристике, протокол может быстро реагировать при необходимости передачи пакетов, как в среде воздушных базовых станций, так и в обычных ad-hoc сетях. Важное отличие заключается в том, как OLSR выбирает и использует MPR для минимизации количества широковещательных пакетов. В процессе работы каждый узел выбирает среди своих симметричных одношаговых соседей набор ретрансляторов MPR, через которые достижимы все его симметричные строгие двухшаговые соседи, что позволяет сократить число повторных передач широковещательных сообщений. Алгоритм выбора MPR основан на критериях интенсивности связи и степени покрытия узлов, что значительно снижает пропускную способность, используемую в операциях по обмену маршрутной информацией.

Кроме того, OLSR определяет три основных типа управляющих сообщений: HELLO для идентификации и обновления соседних узлов, TC (*аббр. от англ*. Topology Control – контроль топологии) для объявления информации о выбранных MPR и MID (*аббр. от англ*. Multiple Interface Declaration – множественное объявление интерфейсов) для объявления адресов, если узел имеет несколько сетевых интерфейсов. Посредством использования этих пакетов OLSR постоянно обновляет и поддерживает таблицу маршрутизации, обеспечивая каждому узлу путь к любому узлу назначения в сети. В процессе маршрутизации парамет-

ры, такие как HELLO_INTERVAL и TC_INTERVAL, определяют периодичность отправки пакетов HELLO и TC, значительно влияя на точность информации о соединении и степень загрузки пропускной способности. Параметр WILLINGNESS позволяет указать «степень готовности» узла участвовать в пересылке трафика, тем самым влияя на способ выбора MPR, а также на структуру глобальной таблицы маршрутизации. Для приложений, требующих высокой стабильности, особенно в среде воздушных базовых станций, правильная настройка этих параметров может помочь OLSR сбалансировать уровень обновления состояния связи и степень загрузки пропускной способности. Разработки в области улучшения OLSR специально для сетей воздушных базовых станций сосредоточены на оптимизации механизма MPR при увеличении числа станций или при их движении с высокой скоростью, а также на гибкой настройке частоты отправки сообщений HELLO и TC в соответствии с условиями трехмерного полета и требованиями к надежности и пропускной способности. Они способствуют минимизации задержки и энергозатрат и повышают адаптивность сети воздушных базовых станций, постоянно меняющей свою структуру.

Механизм работы протокола AODV

Протокол AODV разработан с акцентом на оптимизацию использования пропускной способности и ресурсов в условиях высокой мобильности через механизм «реактивности». Когда исходный узел нуждается в отправке данных, но не знает маршрута к пункту назначения, сообщение RREQ (*аббр. от англ.* Route Request – запрос маршрута) широковещательно распространяется в сети; промежуточные узлы, если у них есть действительный маршрут, могут ответить источнику с помощью RREP (*аббр. от англ.* Route Reply – ответ на запрос маршрута). Чтобы избежать маршрутных петель и обеспечить выбор маршрута с высокой надежностью и точностью, AODV интегрирует порядковые номера для отметки времени обновления пути.

Процесс поддержания маршрута в AODV также обеспечивает стабильность в мобильной среде. При обнаружении разрыва соединения соответствующий узел отправляет уведомление RERR (*аббр. от англ.* Route Error – ошибка маршрутизации) заинтересованным узлам-источникам, позволяя им удалить или пометить как недействительный ошибочный маршрут. Во многих сценариях AODV применяет «локальное восстановление» (local repair) для активного установления новых маршрутов вокруг места разрыва, ограничивая время задержки по сравнению с повторной отправкой RREQ по всей сети. Важные параметры, такие как ACTIVE_ROUTE_TIMEOUT или ALLOWED_HELLO_LOSS, позволяют регулировать время поддержания маршрута и порог потери пакетов HELLO, помогая протоколу лучше адаптироваться к сценариям с частым перемещением воздушных базовых станций и высокими требованиями к пропускной способности и задержке. Благодаря этим улучшениям AODV становится оптимальным выбором во многих приложениях воздушных базовых станций, где производительность маршрутизации играет решающую роль в определении качества и надежности системы.

DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-3-11-40
URL: https://www.sut.ru/doci/nauka/1AEA/ITT/2026_3/11-40.pdf

Параметры оценки производительности

Для оценки производительности протоколов маршрутизации OLSR и AODV в среде сетей воздушных базовых станций в данном исследовании используются следующие основные параметры оценки.

Коэффициент доставки пакетов (PDR) – процентное соотношение между количеством успешно полученных пакетов в пункте назначения и общим количеством пакетов, отправленных из источника, – рассчитываемое по формуле:

$$PDR_{avg} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\left|P_{recv}^{i}\right|}{\left|P_{sent}^{i}\right|} \times 100\ \%,$$

где PDR_{avg} – средний коэффициент доставки пакетов; n – количество сеансов передачи данных; $\left|P_{sent}^{i}\right|$ – количество успешно полученных пакетов в сеансе i; $\left|P_{recv}^{i}\right|$ – общее количество отправленных пакетов в сеансе i.

PDR отражает уровень надежности и эффективности протокола маршрутизации в обеспечении передачи пакетов от источника к пункту назначения. Чем выше его значение, тем лучше производительность протокола. В сетевой среде воздушных базовых станций PDR является важнейшим параметром при оценке производительности протоколов маршрутизации из-за высокой мобильности и быстрых изменений топологии, которые увеличивают вероятность потери пакетов.

Средняя задержка между концами соединения (EED) – среднее время от момента создания пакета в источнике до его получения в пункте назначения, включая все задержки, вызванные процессом маршрутизации, буферизацией в очереди, обработкой на уровне контроля доступа к среде (MAC, *аббр. от англ.* Medium Access Control) и передачей, – рассчитывается по формуле:

$$EED_{avg} = \frac{\sum_{p_i \in P_{recv}}\left(T_{arr}(p_i) - T_{dep}(p_i)\right)}{|P_{recv}|},$$

где EED_{avg} – средняя задержка между концами соединения; P_{recv} – множество успешно полученных пакетов; $T_{arr}(p_i)$ – время прибытия пакета p_i в пункт назначения; $T_{dep}(p_i)$ – время отправления пакета p_i из исходного пункта; $|P_{recv}|$ – общее количество успешно полученных пакетов.

Средняя пропускная способность – средняя скорость успешной передачи данных в сети, измеряемая в битах данных, получаемых в секунду, – рассчитываемая по формуле:

$$Throughput_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left|P_{recv}^{i}\right| \times S}{T} \cdot \frac{8}{1000},$$

DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-3-11-40
URL: https://www.sut.ru/doci/nauka/1AEA/ITT/2026_3/11-40.pdf

где $Throughput_{avg}$ – средняя пропускная способность (Кбит/с); $\left|P_{recv}^{i}\right|$ – количество успешно полученных пакетов в сеансе; S – размер пакета (байт); T – фактическое время передачи данных (с); n – количество сеансов передачи данных.

Джиттер измеряет колебания задержки между последовательными пакетами и рассчитывается по формуле:

$$J_i = J_{i-1} + \frac{|D_i - D_{i-1}| - J_{i-1}}{16},$$

где J_i – значение джиттера в момент времени i; J_{i-1} – значение джиттера в момент времени $i-1$; D_i – задержка пакета i; D_{i-1} – задержка пакета $i-1$;

Коэффициент сглаживания $\alpha = 1/16$ используется для сглаживания оценки джиттера в соответствии со стандартом RFC 3550.

Оценка производительности протоколов маршрутизации для сетей воздушных базовых станций

Производительность сетей воздушных базовых станций определяется такими факторами, как протокол маршрутизации, скорость движения, плотность узлов и модель движения. В данном исследовании проводится оценка двух востребованных протоколов маршрутизации (OLSR и AODV) в различных сценариях для определения условий их эффективного применения в сетях воздушных базовых станций.

Использовался сетевой симулятор NS-3 (версия 3.34) для моделирования работы сетей воздушных базовых станций в четырех различных сценариях: анализ по количеству узлов, анализ по скорости движения, анализ по модели движения и анализ по плотности узлов. Общие параметры моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1. Общие параметры моделирования

Параметр	Значение
Стандарт Wi-Fi	IEEE 802.11g
Физический режим	ErpOfdm
Скорость передачи, Мбит/с	6
Мощность передачи, дБм	18
Приемная чувствительность, дБм	−85
Порог оценки занятости канала (CCA*), дБм	−90
Размер пакета, байт	512
Скорость передачи данных, кбит/с	128
Модель распространения	LogDistance (Exponent = 2,0)

*CCA (*аббр. от англ.* Clear Channel Assessment) – процедура оценки занятости радиоканала перед передачей.

DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-3-11-40
URL: https://www.sut.ru/doci/nauka/1AEA/ITT/2026_3/11-40.pdf

В проведенных экспериментах с моделями движения GaussMarkov, RandomWaypoint, RandomDirection и 3DRandomWalk положение каждого узла задается координатами $(x(t),\ y(t),\ z(t))$, причем высота $z(t)$ изменяется во времени в пределах от 0 до 100 м. Для сценариев в таблицах 2–4 область полета имеет размеры 800 × 800 × 100 м. В сценарии таблицы 5 изменяются горизонтальные размеры области, а диапазон высот сохраняется. Перемещение узлов изменяет расстояния между ними и условия установления радиосвязей, что определяет динамику топологии сети. Ее влияние на производительность оценивается по коэффициенту доставки пакетов, пропускной способности, задержке и джиттеру при изменении скорости и модели движения.

В интересах исследования была использована модель затухания LogDistance с безразмерным показателем затухания n = 2,0 (параметр Exponent в NS-3) для моделирования затухания сигнала в радиопередающей среде сетей воздушных базовых станций. Значение Exponent = 2,0 соответствует модели затухания в свободном пространстве (Free Space Path Loss), что подходит для условий распространения радиоволн воздушных базовых станций в открытом пространстве, где мало препятствий и сложных явлений отражения и преломления. LogDistance является распространенной моделью затухания в канале передачи, основанной на экспериментальном наблюдении того, что интенсивность сигнала уменьшается как логарифмическая функция расстояния, рассчитываемая по формуле:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10 \cdot n \cdot \lg\left(\frac{d}{d_0}\right),$$

где $PL(d)$ – ослабление сигнала (потери на пути) на расстоянии d; $PL(d_0)$ – ослабление сигнала на опорном расстоянии d_0; n – показатель затухания (экспонента), в данном моделировании принимается равным 2,0; d – расстояние между передатчиком и приемником.

Анализ производительности протоколов в зависимости от количества узлов

В этом моделировании анализируется производительность протоколов OLSR и AODV при изменении количества узлов воздушных базовых станций от 5 до 60; используется модель движения GaussMarkov со скоростью 10 м/с.

Таблица 2. Параметры моделирования в зависимости от количества узлов

Параметр	Значение
Количество узлов	5–60
Скорость, м/с	10
Модель движения	GaussMarkov
Область полета, м	800 × 800 × 100

DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-3-11-40
URL: https://www.sut.ru/doci/nauka/1AEA/ITT/2026_3/11-40.pdf

Первоначально было проведено сравнение производительности протоколов AODV и OLSR для сетей воздушных базовых станций с точки зрения коэффициента доставки пакетов для выбора подходящего сценария разведки. В модели сетей воздушных базовых станций узлы обычно расположены неплотно, что усложняет поддержание связи между ними. Поэтому производительность AODV и OLSR оценивалась путем постепенного увеличения количества узлов в процессе моделирования для выяснения влияние плотности узлов на работу сети.

Рисунок 2 иллюстрирует влияние количества воздушных базовых станций на коэффициент доставки пакетов для каждого протокола. Результаты показывают, что при низкой плотности узлов AODV достигает более высокого PDR. В сценарии разведки топология сети меняется быстро и часто, что позволяет реактивному протоколу AODV при необходимости оптимизировать поиск маршрута, тем самым поддерживая относительно высокий PDR при малых масштабах. Напротив, OLSR хранит таблицу маршрутизации для всех узлов, что приводит к бóльшим затратам на ее поддержание таблицы маршрутизации, снижая PDR в среде с малым количеством узлов.

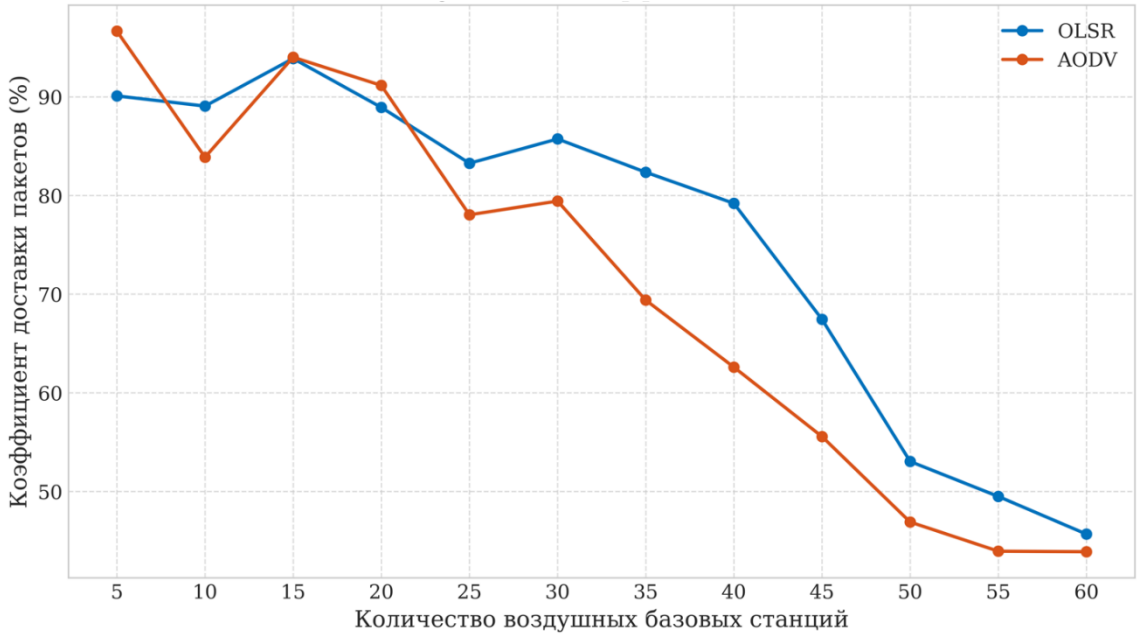


Рис. 2. Влияние количества воздушных базовых станций на коэффициент доставки пакетов

Также была проверена гипотеза о том, что коэффициент доставки пакетов для протоколов сетей воздушных базовых станций будет увеличиваться с ростом количества узлов. На практике и AODV, и OLSR показывают увеличение PDR до определенного максимума, а затем происходит его снижение. Например, AODV достигает PDR около 94 % при 15 узлах, после чего наблюдается снижение; аналогично OLSR достигает 93,87 % также при 15 узлах и снижается, начиная с 20 узлов. Это показывает, что оптимальная плотность узлов для обоих протоколов в рассматриваемой среде моделирования составляет около 15 узлов.

Что касается пропускной способности, на рисунке 3 показано, что для обоих протоколов она имеет тенденцию к росту с увеличением числа узлов до

DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-3-11-40
URL: https://www.sut.ru/doci/nauka/1AEA/ITT/2026_3/11-40.pdf

№ 3. 2026
ISSN 2307-1303

определенного порога перед снижением. OLSR достигает пиковой пропускной способности около 2575,86 Кбит/с при 40 узлах, в то время как AODV – примерно 1871,53 Кбит/с. Этот результат показывает, что при средней и высокой плотности узлов OLSR способен более эффективно обрабатывать данные.

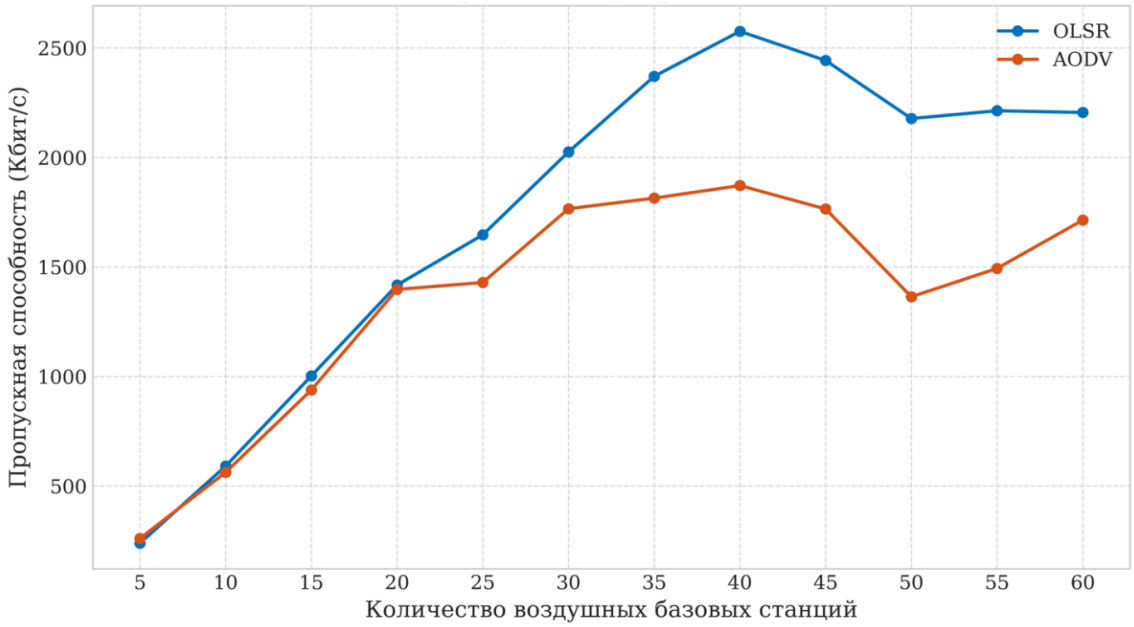


Рис. 3. Влияние количества воздушных базовых станций на пропускную способность

На рисунке 4 оба протокола демонстрируют заметное увеличение задержки при расширении сети. AODV демонстрирует более низкую задержку при малой плотности узлов, но она растет быстрее по сравнению с задержкой OLSR при большом количестве узлов. При 40 узлах OLSR регистрирует задержку около 77,39 мс, в то время как AODV достигает 171,82 мс. Это доказывает преимущество OLSR в условиях задержки в сети с большим количеством узлов.

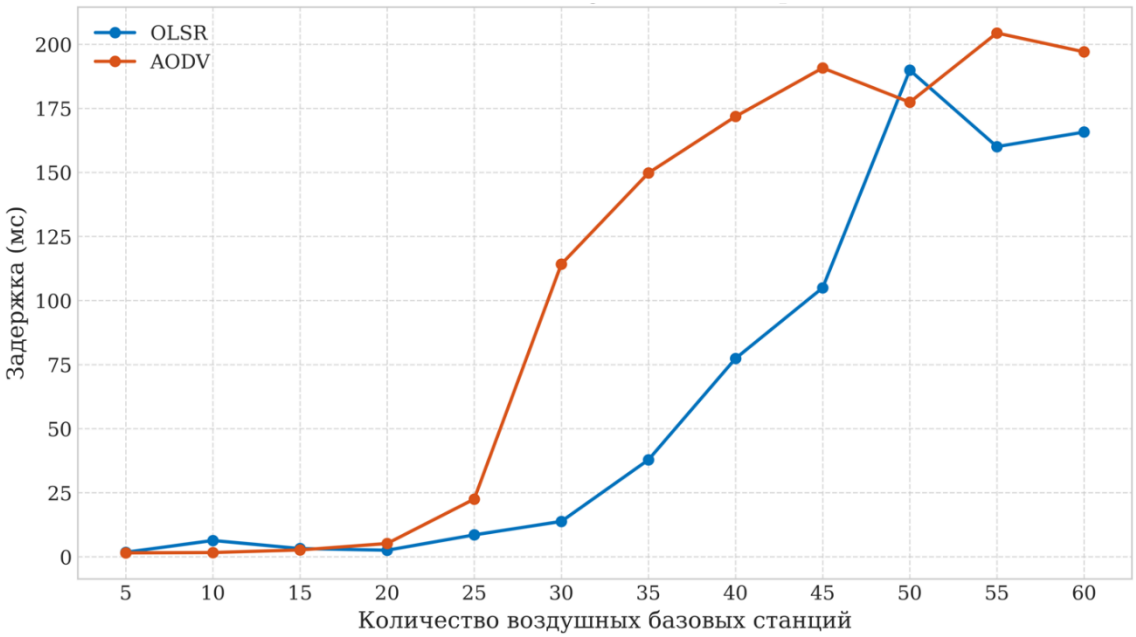


Рис. 4. Влияние количества воздушных базовых станций на задержку

DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-3-11-40
URL: https://www.sut.ru/doci/nauka/1AEA/ITT/2026_3/11-40.pdf

Наконец, на рисунке 5 значение джиттера также увеличивается пропорционально размеру сети, и AODV обычно имеет более высокий джиттер, чем OLSR. Причина состоит в «реактивной» природе AODV, который должен часто искать новые маршруты при постоянном изменении топологии.

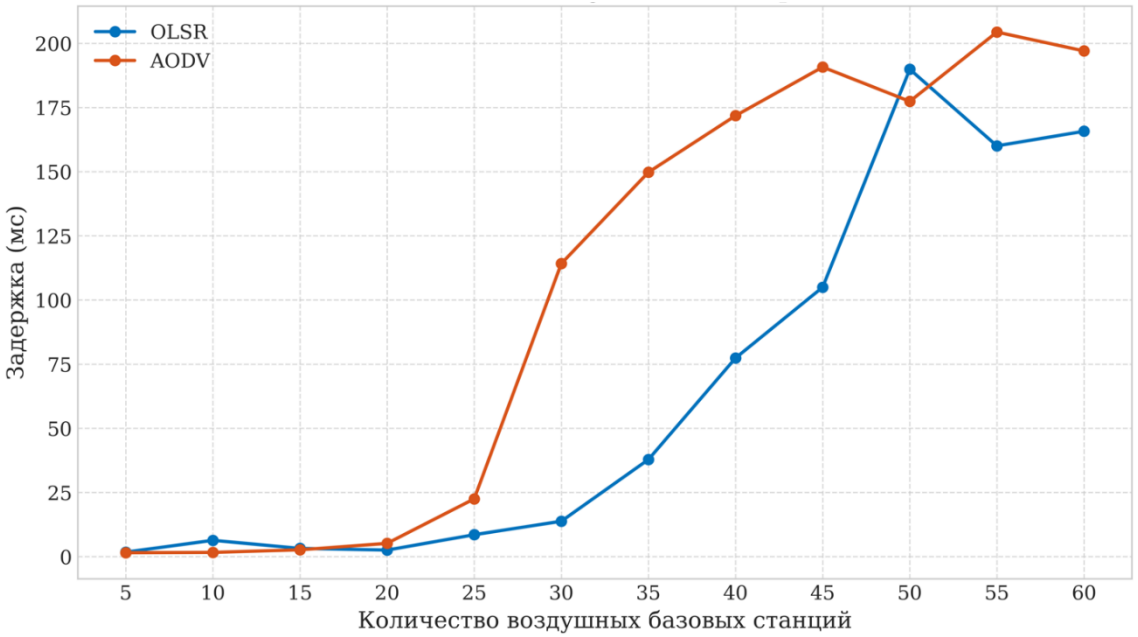


Рис. 4. Влияние количества воздушных базовых станций на задержку

Таким образом, в сценарии разведки с низкой плотностью узлов AODV оказывается более подходящим. В свою очередь, OLSR работает эффективнее при средней и высокой плотности узлов. Кроме того, коэффициент доставки пакетов протоколов сетей воздушных базовых станций не увеличивается постоянно с ростом количества узлов, а начинает снижаться после определенного порога из-за увеличения затрат на обмен маршрутной информацией.

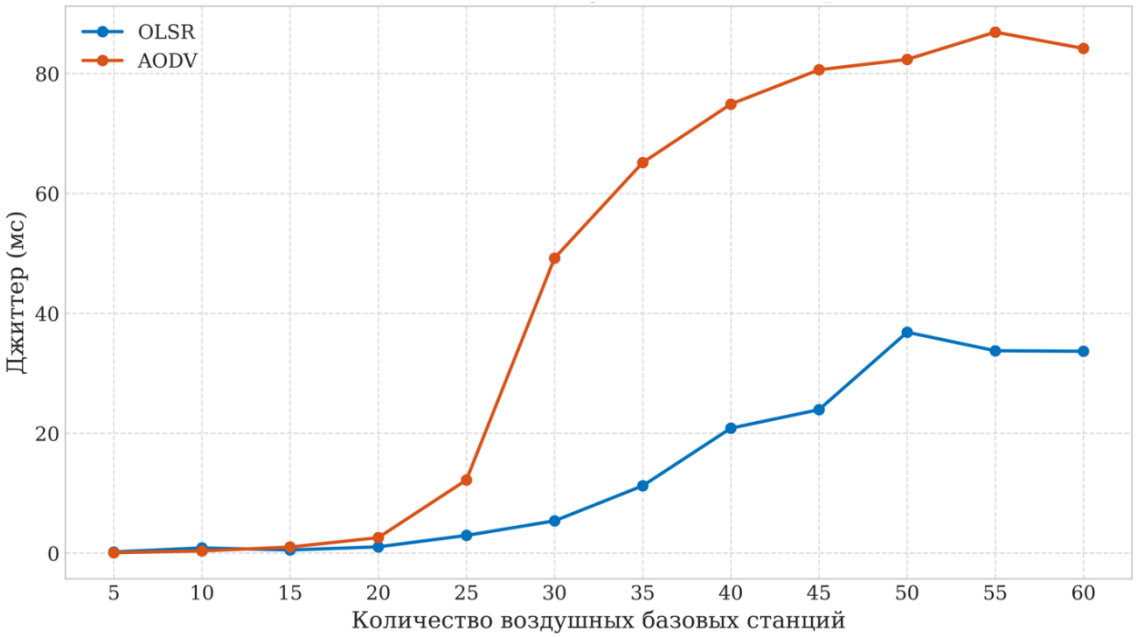


Рис. 5. Влияние количества воздушных базовых станций на джиттер

DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-3-11-40
URL: https://www.sut.ru/doci/nauka/1AEA/ITT/2026_3/11-40.pdf

Анализ производительности протоколов в зависимости от скорости воздушных базовых станций

В данном разделе оценивается влияние скорости перемещения узлов на производительность протоколов маршрутизации AODV и OLSR. В сетях воздушных базовых станций узлы перемещаются со средней или высокой скоростью, что приводит к быстрому и частому изменению структуры сети. Поэтому при проведении моделирования скорость узлов изменялась от 5 до 60 м/с, чтобы оценить способность протоколов адаптироваться к изменениям структуры сети.

Таблица 3. Параметры моделирования в зависимости от скорости узлов

Параметр	Значение
Количество узлов	20
Скорость, м/с	5–60
Модель движения	GaussMarkov
Область полета, м	800 × 800 × 100

Рисунок 6 показывает зависимость коэффициента доставки пакетов от скорости узлов. Можно заметить, что PDR OLSR постепенно снижается с увеличением скорости узлов, например с 91,18 % при скорости 5 м/с до 68,63 % при 60 м/с. Это показывает, что проактивный протокол OLSR испытывает трудности в поддержании актуальной таблицы маршрутизации при высоких скоростях узлов.

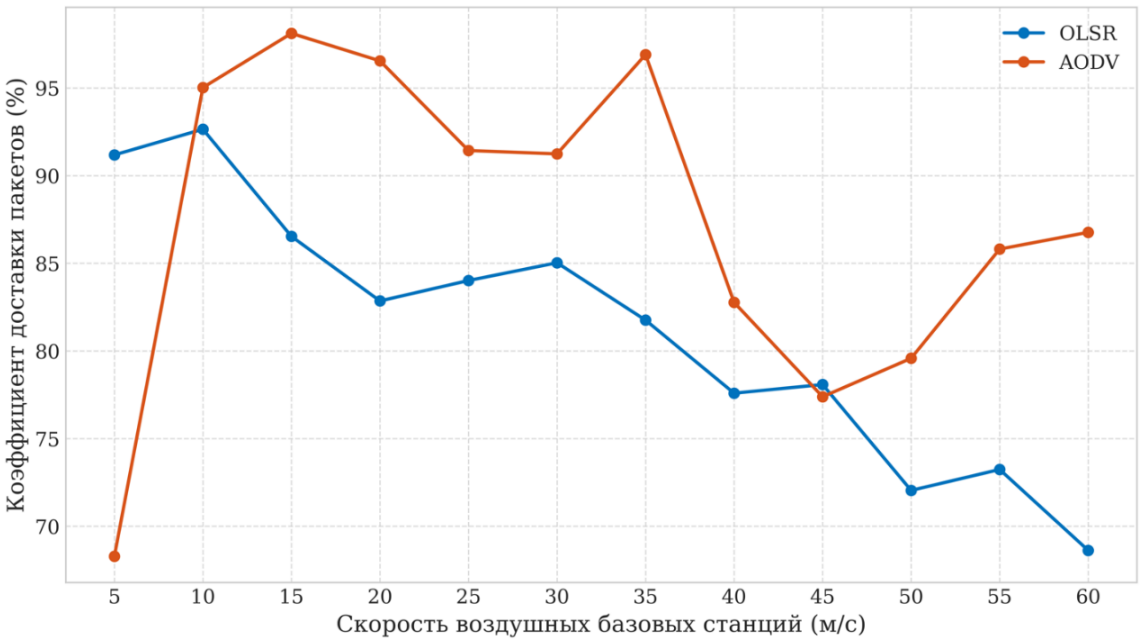


Рис. 6. Влияние скорости воздушных базовых станций на коэффициент доставки пакетов

Эксперимент также выявил проблему с очередями на стороне клиента. При высоких темпах генерации команд сервером задержки подтверждений приводят к буферизации на стороне клиента, увеличивая время отклика систе-

DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-3-11-40
URL: https://www.sut.ru/doci/nauka/1AEA/ITT/2026_3/11-40.pdf

мы, что в промышленных условиях может вызывать десинхронизацию производственных линий и аварийные остановки.

Напротив, AODV демонстрирует лучшую адаптивность к высоким скоростям узлов. PDR протокола AODV поддерживается на уровне выше 95 % при скоростях 15 и 20 м/с, и снижается только до ≈ 86,77 % при скорости 60 м/с. Это доказывает, что реактивный протокол AODV может эффективно устанавливать маршруты по требованию, даже когда топология сети быстро меняется.

Что касается пропускной способности, рисунок 7 демонстрирует, что AODV поддерживает этот параметр на более высоком уровне, чем OLSR при большинстве скоростей узлов. При скорости 20 м/с AODV достигает пропускной способности около 1465,91 Кбит/с, в то время как OLSR – только 1318,86 Кбит/с. Когда скорость увеличивается до 60 м/с, пропускная способность AODV снижается до 1298,48 Кбит/с, в то время как OLSR – до 1092,45 Кбит/с.

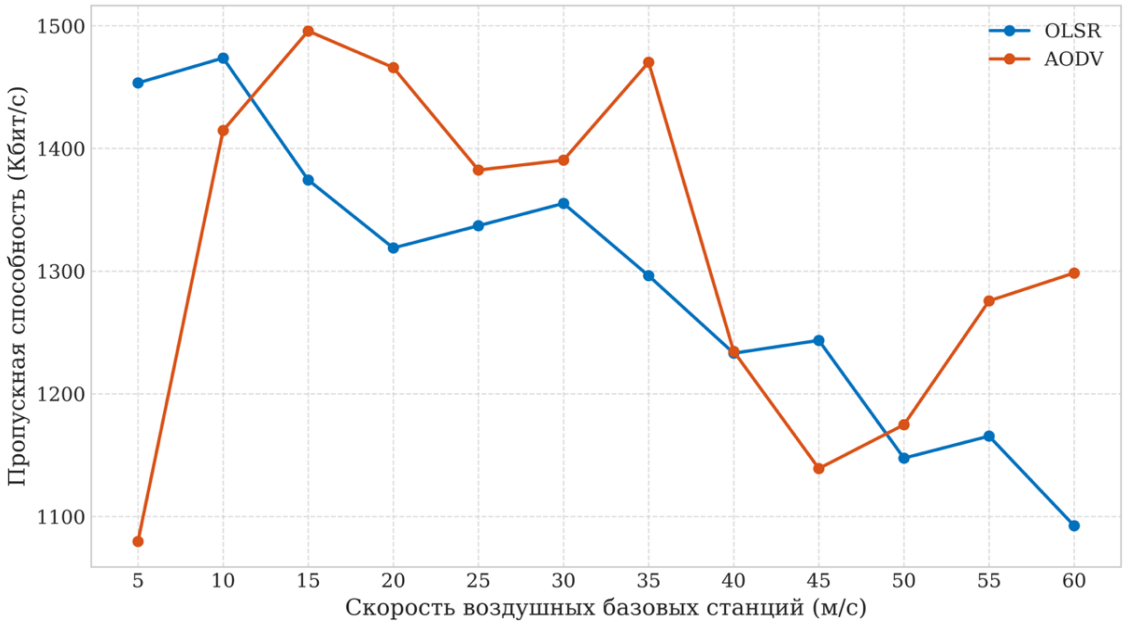


Рис. 7. Влияние скорости воздушных базовых станций на пропускную способность

Из рисунка 8 следует, что AODV имеет более высокую задержку, чем OLSR при большинстве скоростей. При скорости 20 м/с для AODV она составляет около 7,91 мс, в то время как для OLSR – 6,06 мс. Когда скорость увеличивается до 60 м/с, задержка для AODV возрастает до 10,35 мс, в то время как для OLSR – до 12,21 мс. Это показывает, что при высоких скоростях затраты на поддержание таблицы маршрутизации OLSR значительно возрастают, приводя к более высокой задержке.

Джиттер обоих протоколов увеличивается с ростом скорости узлов, как показано на рисунке 9, но AODV почти всегда демонстрирует более высокие значения, чем OLSR. При скорости 60 м/с джиттер AODV составляет около 7,00 мс, в то время как OLSR – 5,28 мс. В связи с реактивной природой AODV приходится чаще устанавливать новые маршруты в среде с постоянно меняющейся топологией.

DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-3-11-40
URL: https://www.sut.ru/doci/nauka/1AEA/ITT/2026_3/11-40.pdf

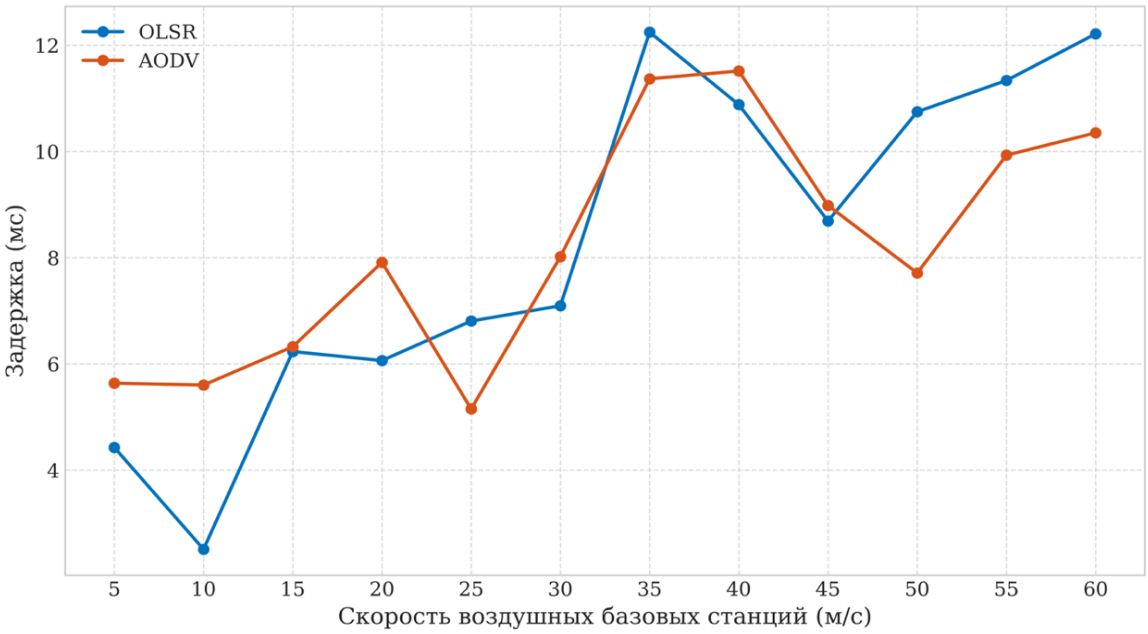


Рис. 8. Влияние скорости воздушных базовых станций на задержку

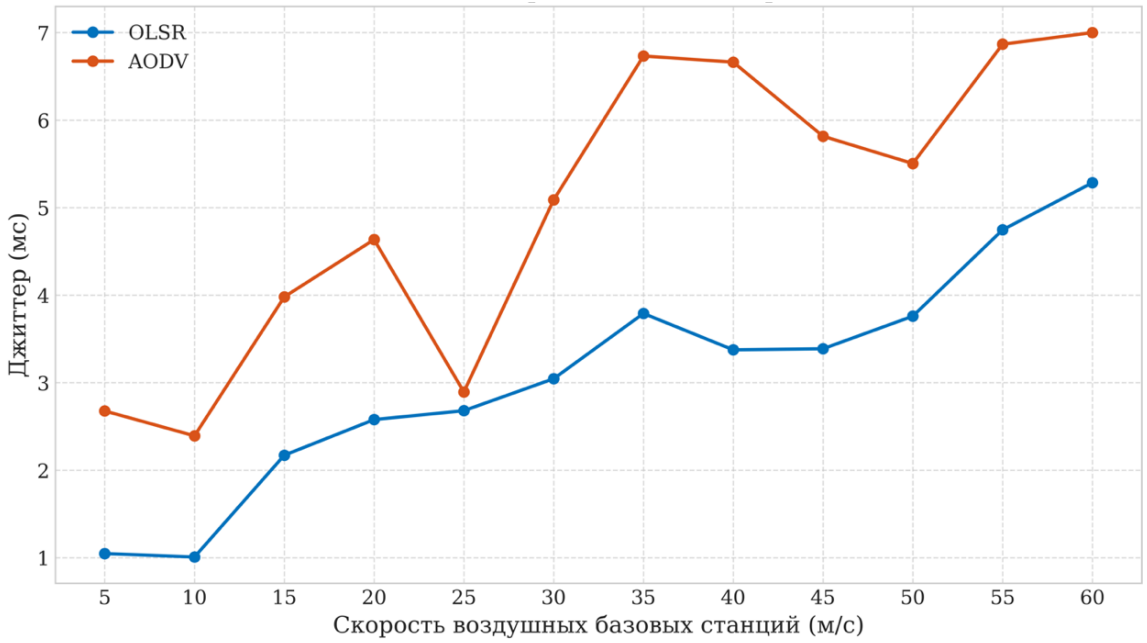


Рис. 9. Влияние скорости воздушных базовых станций на джиттер

Итак, протокол маршрутизации AODV демонстрирует лучшую адаптивность к высоким скоростям узлов в сетях воздушных базовых станций. PDR протокола AODV поддерживается на более высоком уровне, чем OLSR при увеличении скорости узлов, показывая, что первый лучше подходит для сценариев разведки с высокой мобильностью, однако имеет более высокую задержку и джиттер, что может влиять на чувствительные к задержке приложения реального времени.

DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-3-11-40
URL: https://www.sut.ru/doci/nauka/1AEA/ITT/2026_3/11-40.pdf

Анализ производительности протоколов в зависимости от модели движения

В данном сценарии моделирования анализировалась производительность протоколов OLSR и AODV с четырьмя различными моделями движения: GaussMarkov, RandomWaypoint, RandomDirection и RandomWalk3d. Количество узлов зафиксировано на уровне 20, а скорость движения составляет 25 м/с.

Таблица 4. Параметры моделирования в зависимости от модели движения

Параметр	Значение
Количество узлов	20
Скорость, м/с	25
Модель движения	GaussMarkov, RandomWaypoint, RandomDirection, RandomWalk3d
Область полета, м	800 × 800 × 100

На рисунке 10, полученном в результате моделирования видно, что PDR протокола OLSR колеблется от 66,05 до 93,39 % в зависимости от модели движения. Модель RandomWalk3d обеспечивает наивысший PDR для OLSR (93,39 %), за ней следуют RandomWaypoint (90,26 %) и GaussMarkov (79,12 %), а самый низкий показатель у RandomDirection (66,05 %). Для AODV значения PDR варьируются от 91,21 до 97,52 %, причем RandomWaypoint обеспечивает наивысшую производительность (97,52 %), за ней следуют RandomWalk3d (96,00 %), RandomDirection (91,21 %) и GaussMarkov (80,50 %).

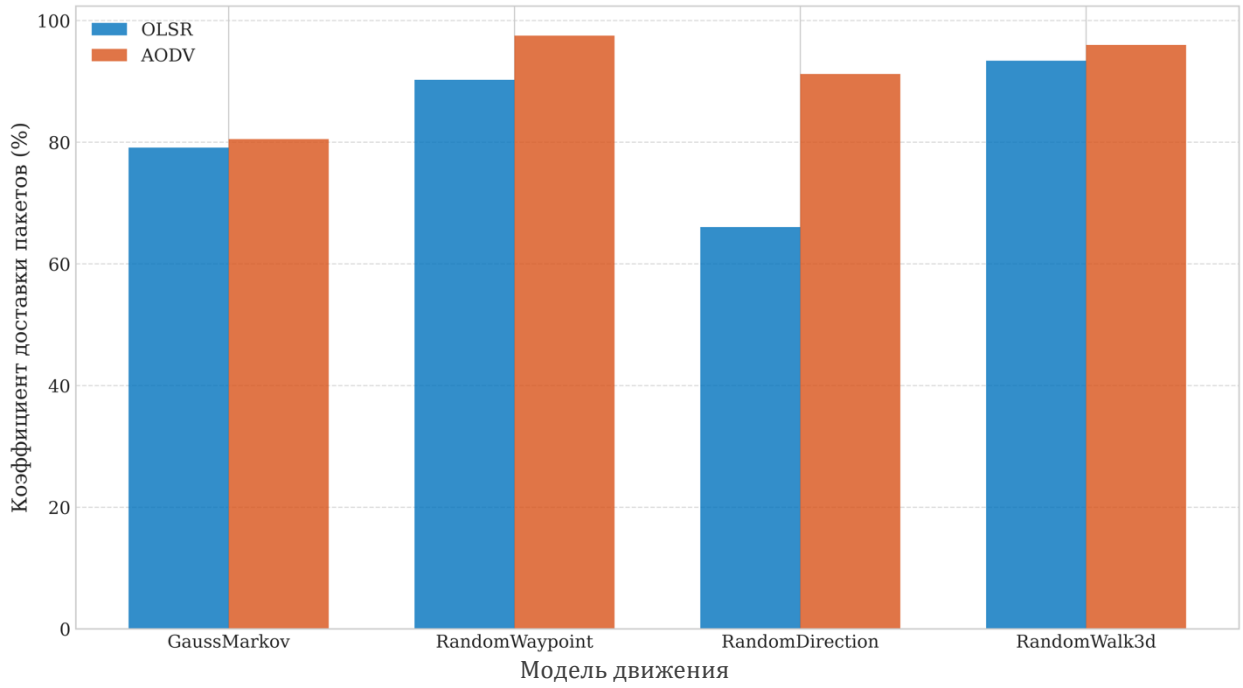


Рис. 10. Влияние модели движения на коэффициент доставки пакетов

Рисунок 11 демонстрирует, что оба протокола достигают наивысших значений пропускной способности с моделью RandomWaypoint (1435,17 и

DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-3-11-40
URL: https://www.sut.ru/doci/nauka/1AEA/ITT/2026_3/11-40.pdf

№ 3. 2026
ISSN 2307-1303

1548,92 Кбит/с соответственно). Модель RandomDirection дает самую низкую пропускную способность для OLSR (1052,12 Кбит/с), в то время как GaussMarkov – для AODV (1278,63 Кбит/с).

Задержка, как видно из рисунка 12, также значительно варьируется в зависимости от модели движения. AODV имеет наименьшую задержку с Random Walk3d (1,65 мс) и наибольшую – с RandomDirection (4,59 мс). OLSR имеет наименьшую задержку с RandomWalk3d (3,53 мс) и наибольшую – с Random Direction (17,40 мс).

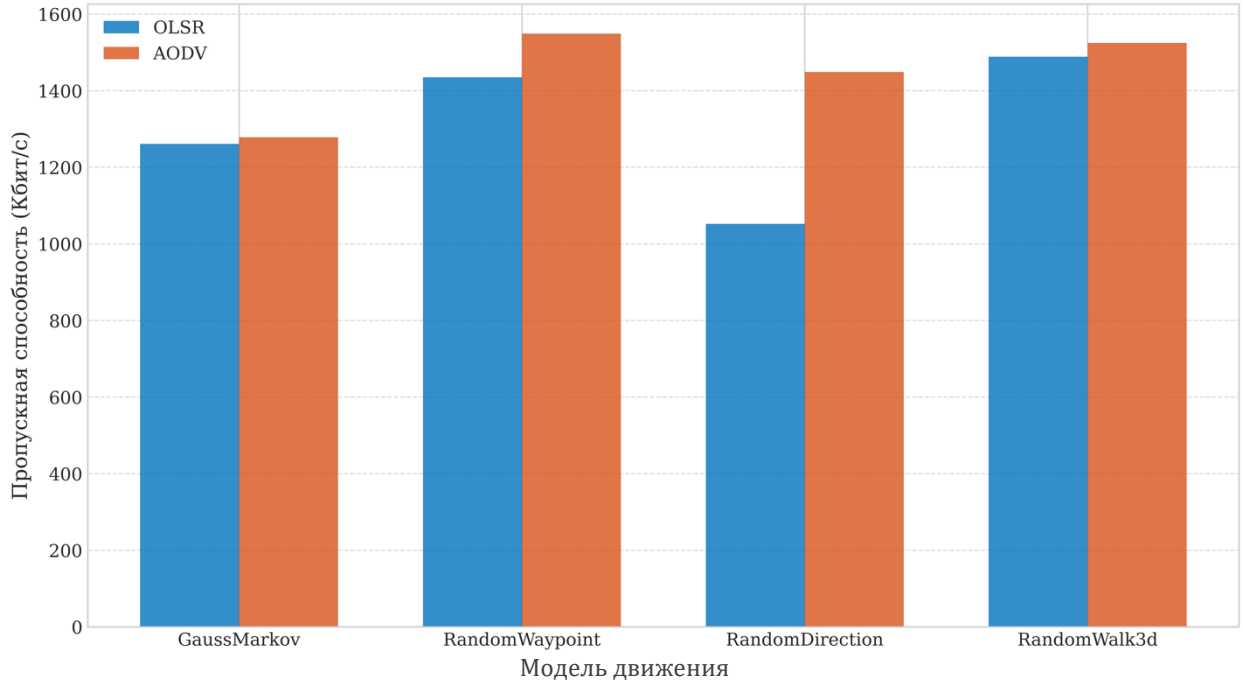


Рис. 11. Влияние модели движения на пропускную способность

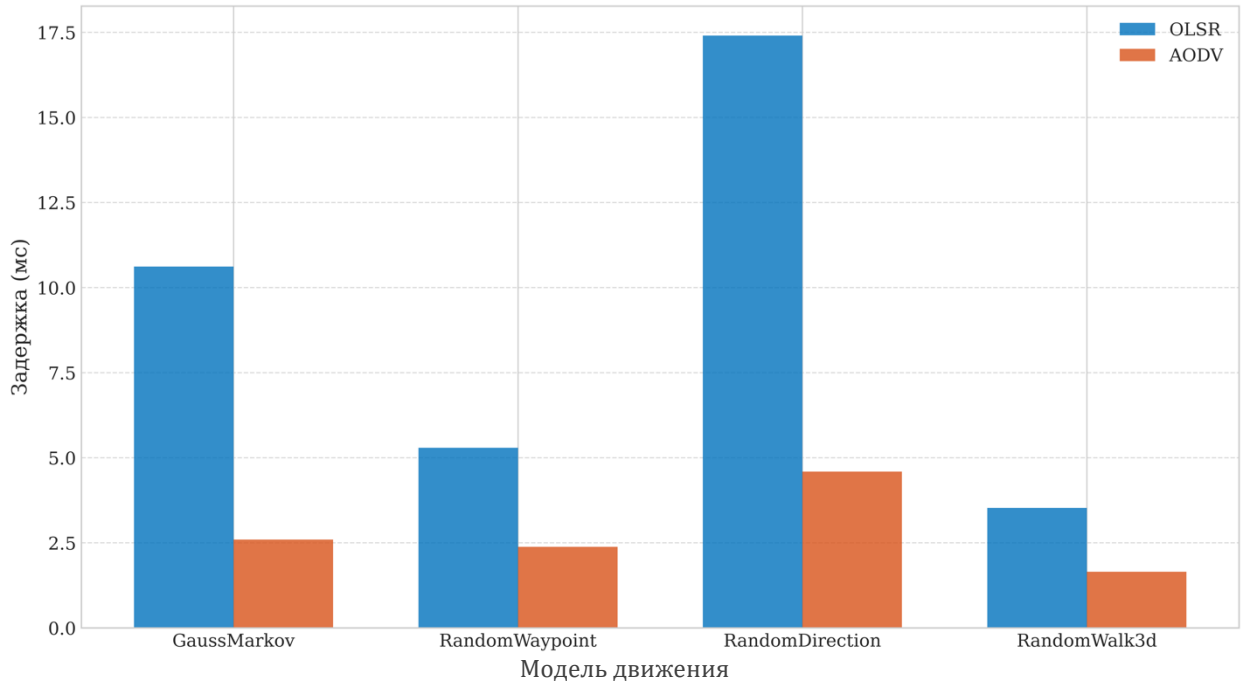


Рис. 12. Влияние модели движения на задержку

DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-3-11-40
URL: https://www.sut.ru/doci/nauka/1AEA/ITT/2026_3/11-40.pdf

На рисунке 13 представлены значения джиттера для рассматриваемых протоколов при различных моделях движения. OLSR демонстрирует значительно более высокий джиттер по сравнению с AODV при всех моделях движения. Наибольший джиттер OLSR зафиксирован при модели RandomDirection (~ 5,8 мс), наименьший – при RandomWalk3d (~ 0,97 мс). Для AODV значения джиттера остаются низкими во всех сценариях: максимум достигается при RandomDirection (~ 2,0 мс), минимум – при RandomWalk3d (~ 0,19 мс). Высокий джиттер OLSR при RandomDirection объясняется частым пересчетом таблиц маршрутизации в условиях резких и непредсказуемых смен направления движения узлов. Модель RandomWalk3d обеспечивает наиболее стабильную передачу для обоих протоколов благодаря более равномерному распределению узлов в трехмерном пространстве.

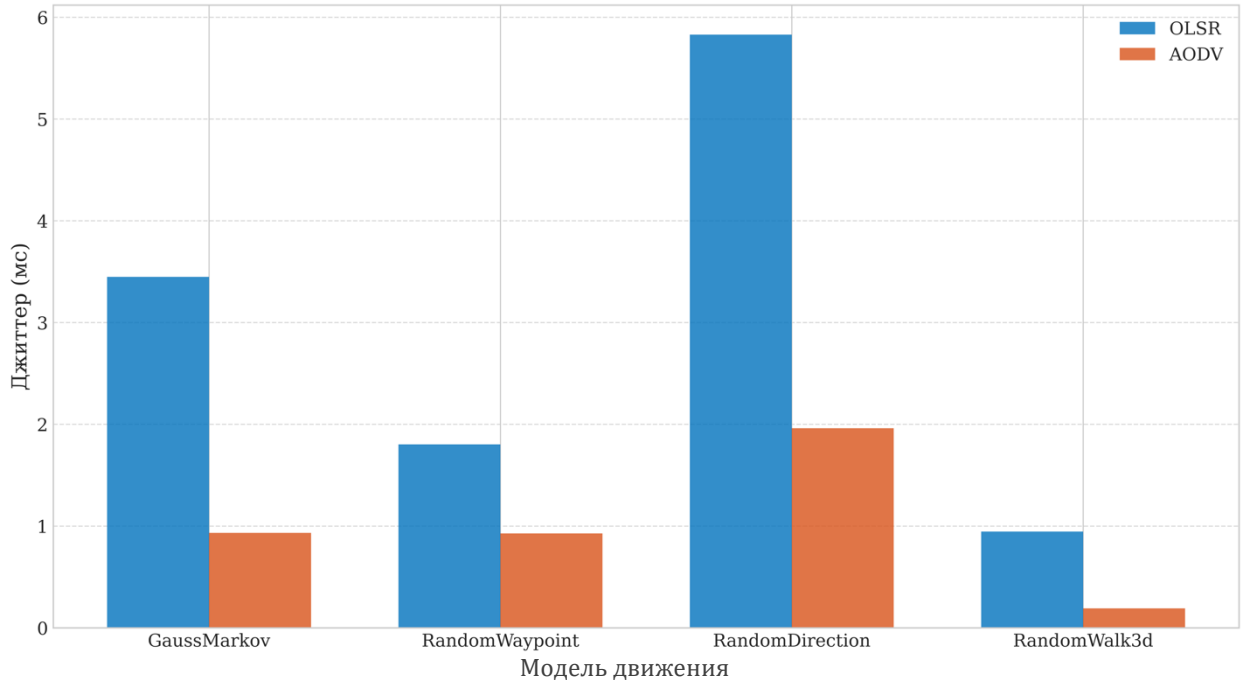


Рис. 13. Влияние модели движения на джиттер

Полученные результаты показывают, что модель движения оказывает значительное влияние на производительность протоколов маршрутизации в сетях воздушных базовых станций. Модели RandomWaypoint и RandomWalk3d обычно обеспечивают лучшую производительность как для OLSR, так и для AODV, в то время как RandomDirection создает более серьезные проблемы из-за частых и непредсказуемых изменений топологии сети.

Анализ производительности протоколов в зависимости от плотности узлов в сети

В данном сценарии моделирования анализируется производительность протоколов OLSR и AODV при изменении плотности сети с сохранением постоянного количества узлов (25), но с изменением размера области моделирования от 500 × 500 до 2000 × 2000 м. Плотность узлов на единицу горизонталь-

DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-3-11-40
URL: https://www.sut.ru/doci/nauka/1AEA/ITT/2026_3/11-40.pdf

ной площади рассчитывается как $\rho = 10^6 N/L^2$ (узлов/км²), где N = 25 – число узлов; L – длина стороны квадратной области моделирования (м); диапазон высот во всех вариантах одинаков. Увеличение размеров области при фиксированном числе узлов соответствует снижению плотности со 100 до 6,25 узла/км².

Таблица 5. Параметры моделирования в зависимости от размеров области

Параметр	Значение
Количество узлов	25
Скорость, м/с	10
Модель движения	GaussMarkov
Горизонтальные размеры области полета, м	500 × 500; 800 × 800; 1200 × 1200; 1600 × 1600; 2000 × 2000
Диапазон высот, м	0–100

На оси абсцисс рисунков 14–17 указана длина стороны области моделирования L в метрах. Значениям L = 500, 800, 1200, 1600 и 2000 м соответствуют площади 0,25; 0,64; 1,44; 2,56 и 4,00 км² соответственно.

На рисунке 14 видно, что коэффициент доставки пакетов в протоколах OLSR и AODV снижается при уменьшении плотности узлов. При наибольшей плотности (100 узлов/км²) PDR для OLSR достигает 99,18 %, а для AODV – 98,55 %. Однако при самом низком уровне плотности (6,25 узлов/км²) PDR для OLSR уменьшается до 51,24 %, а для AODV – до 37,73 %.

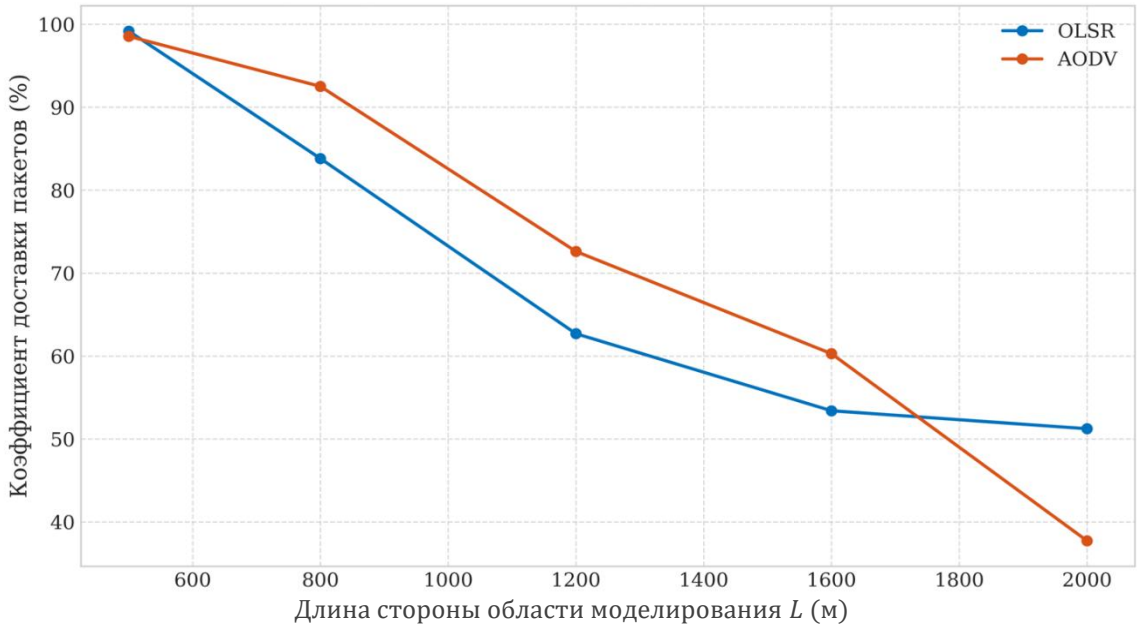


Рис. 14. Влияние размера области моделирования на коэффициент доставки пакетов

Пропускная способность также значительно падает при снижении плотности узлов, как видно на рисунке 15. Для OLSR максимальное значение составляет 1967,18 Кбит/с при 100 узлах/км² и уменьшается до 433,18 Кбит/с при 6,25 узлах/км². Аналогично, в AODV этот показатель достигает 1849,75 Кбит/с при максимальной плотности, а при низкой плотности снижается до 613,46 Кбит/с.

DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-3-11-40
URL: https://www.sut.ru/doci/nauka/1AEA/ITT/2026_3/11-40.pdf

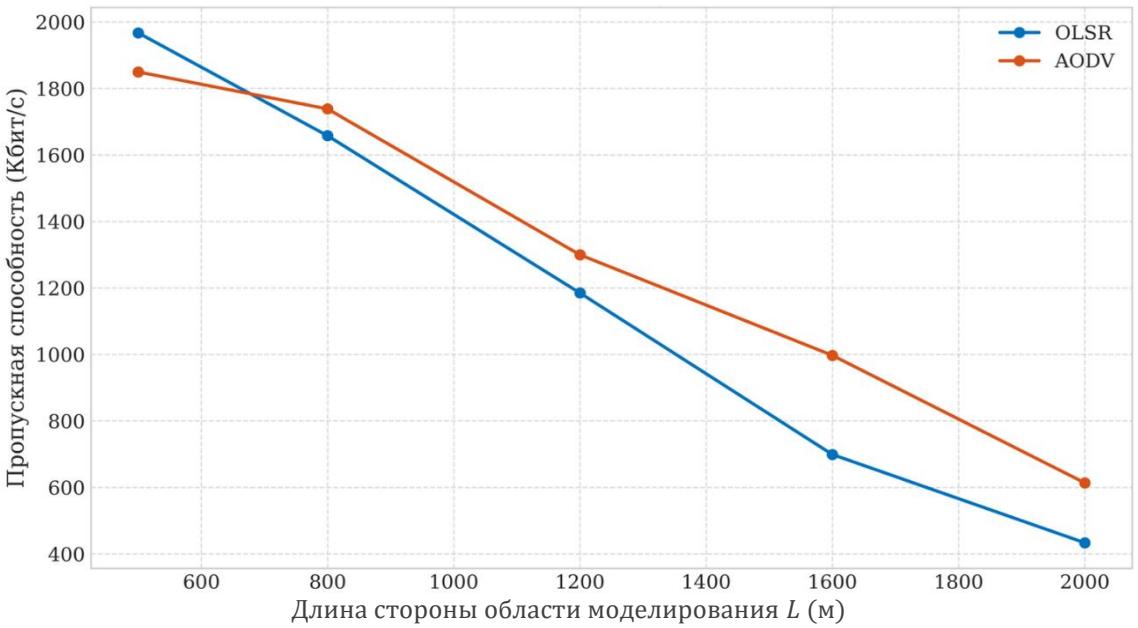


Рис. 15. Влияние размера области моделирования на пропускную способность

Что касается задержки, показательна отраженная на рисунке 16 тенденция: при снижении плотности узлов с высокого уровня до среднего задержка возрастает, но затем уменьшается при крайне низкой плотности. Для OLSR задержка увеличивается от 2,30 мс (при 100 узлах/км²) до 43,88 мс (при 9,77 узлах/км²), а затем снижается до 25,12 мс (при 6,25 узлах/км²). Похожий тренд наблюдается и для AODV: рост задержки от 14,59 мс (максимальная плотность) до 93,38 мс (9,77 узлов/км²) и дальнейшее снижение до 91,87 мс (6,25 узлов/км²).

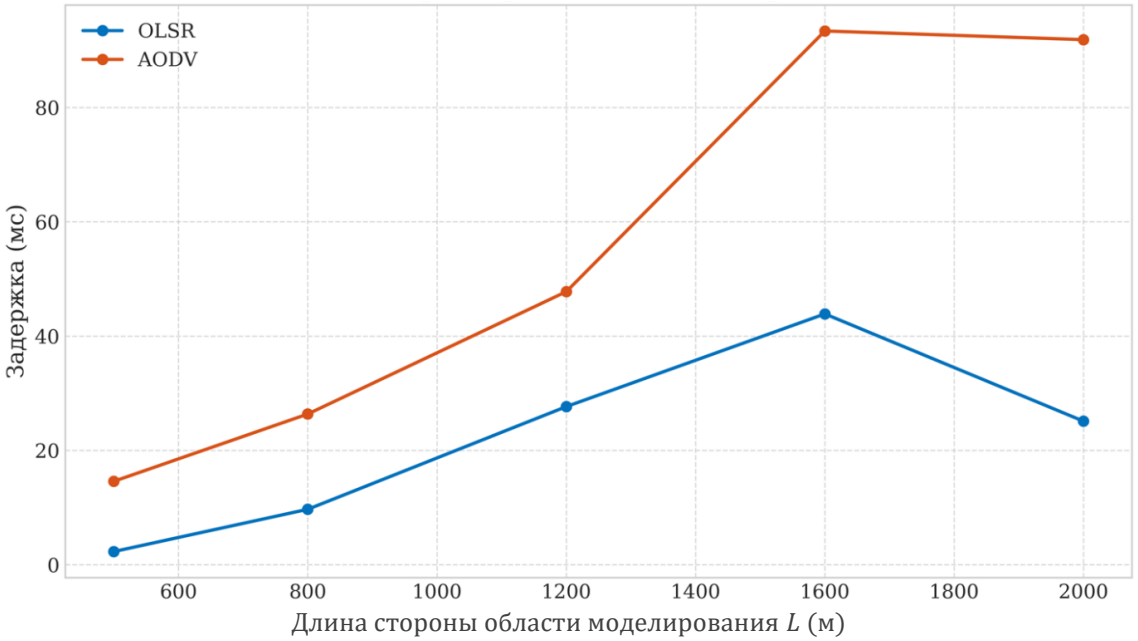


Рис. 16. Влияние размера области моделирования на задержку

Данный феномен можно объяснить спецификой протоколов маршрутизации. При высокой плотности узлы имеют множество альтернативных маршру-

DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-3-11-40
URL: https://www.sut.ru/doci/nauka/1AEA/ITT/2026_3/11-40.pdf

тов, что обеспечивает низкую задержку. Однако при снижении плотности число доступных путей уменьшается, и возникает необходимость чаще перестраивать маршруты, повышая задержку. При экстремально малой плотности многие пакеты вообще не доходят до адресата из-за отсутствия связности, и средняя задержка учитывает только успешно доставленные пакеты, обычно с коротким путем передачи.

На рисунке 17 показана зависимость джиттера от размера зоны моделирования. AODV демонстрирует существенно более высокий джиттер по сравнению с OLSR при всех уровнях плотности. Джиттер AODV увеличивается с ростом площади зоны от ~ 9,5 мс (500 × 500 м) до максимума ~ 20,6 мс (1600 × 1600 м), после чего снижается до ~13,4 мс (2000 × 2000 м). Аналогичная тенденция наблюдается у OLSR: джиттер возрастает от ~ 0,7 мс до пика ~ 10,4 мс (1600 × 1600 м), затем незначительно снижается до ~ 8,6 мс. Рост джиттера при снижении плотности узлов обусловлен увеличением нестабильности маршрутов и частыми процедурами их переустановления. Снижение джиттера при крайне низкой плотности (2000 × 2000 м) коррелирует с уменьшением числа успешно доставленных пакетов, для которых статистика формируется преимущественно по коротким устойчивым маршрутам.

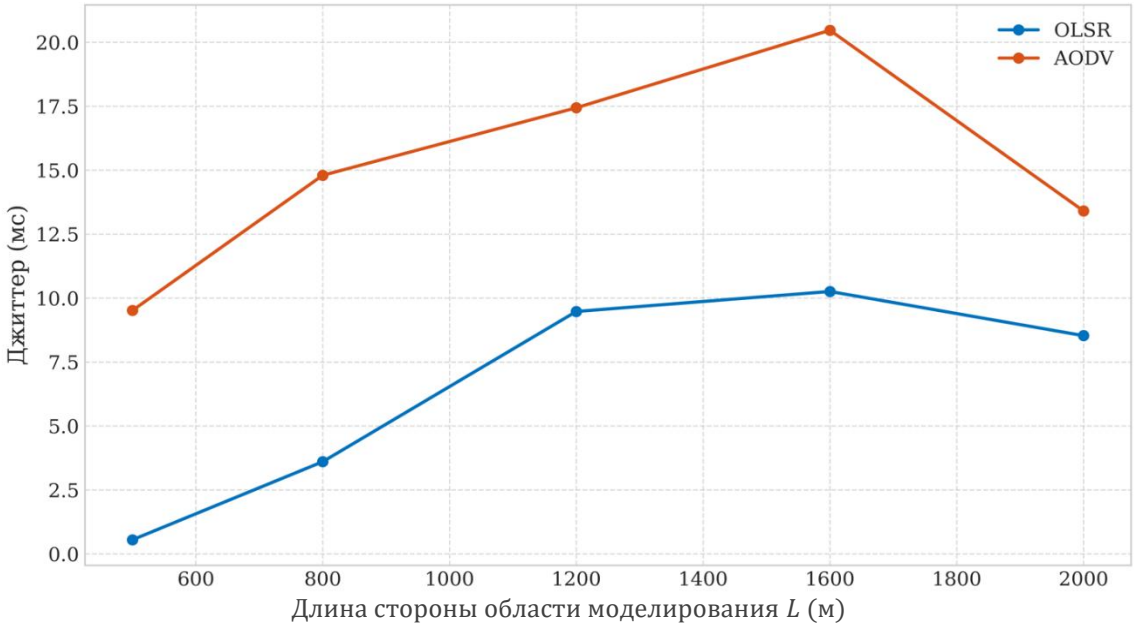


Рис. 17. Влияние размера области моделирования на джиттер

Сравнение протоколов OLSR и AODV показывает, что первый в целом демонстрирует лучшие результаты на большинстве уровней плотности, особенно в части PDR и задержки при низкой плотности. Это может быть связано с проактивным характером OLSR, позволяющим поддерживать более стабильную информацию о маршрутах даже в условиях слабой связности.

Плотность узлов существенно влияет на эффективность протоколов маршрутизации в сети воздушных базовых станций. При уменьшении плотности узлов PDR и пропускная способность значительно снижаются. OLSR оказывается более адаптированным к низкой плотности узлов по сравнению

DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-3-11-40
URL: https://www.sut.ru/doci/nauka/1AEA/ITT/2026_3/11-40.pdf

с AODV. В сценариях разведки на большой площади и ограниченном количестве воздушных базовых станций может потребоваться оптимизация размещения узлов или внедрение промежуточных ретрансляторов для поддержания требуемого уровня производительности сети.

Практическое применение

В результате комплексного анализа было обнаружено, что ни один из рассмотренных протоколов полностью не превосходит другой во всех ситуациях. Каждый из них имеет свои преимущества в зависимости от сценария развертывания. Выбор подходящего протокола должен основываться на специфике приложения, ожидаемом количестве развертываемых воздушных базовых станций, скорости движения и требованиях к качеству обслуживания. На основе проведенного моделирования предлагаются подходящие варианты применения OLSR и AODV в реальных сценариях воздушных базовых станций.

OLSR целесообразно использовать для решения следующих задач:

Мониторинг крупномасштабной инфраструктуры. При развертывании нескольких воздушных базовых станций для мониторинга линий электропередач, нефтепроводов или транспортных систем OLSR демонстрирует преимущество в обработке большого количества узлов с высокой производительностью. Способность поддерживать стабильную пропускную способность выше 1500 Кбит/с при плотности 25–40 узлов делает OLSR подходящим для передачи высококачественных изображений и видео в реальном времени.

Сети воздушных базовых станций со статической топологией или медленным движением. Для сценариев долгосрочного мониторинга, таких как наблюдение за окружающей средой, точное земледелие или исследование дикой природы, где воздушные базовые станции перемещаются с низкой скоростью (5–15 м/с) или летают по фиксированным траекториям, OLSR обеспечивает малую задержку и приемлемые затраты на пересылку маршрутной информации.

Развертывание в зонах концентрированного покрытия. OLSR максимально эффективен, когда воздушные базовые станции работают в районах с высокой плотностью узлов, таких как городские кварталы, места проведения крупных мероприятий или зоны концентрированных боевых действий. С PDR выше 99 % при плотности 100 узлов/км², OLSR обеспечивает надежный обмен данными между наземными и воздушными базовыми станциями.

3D-картография и пространственное моделирование. При развертывании воздушных базовых станций для создания 3D-моделей сооружений, сложного рельефа, OLSR с моделью движения RandomWalk3d обеспечивает высокий PDR (93,39 %) и низкую задержку (3,53 мс), что подходит для непрерывной передачи данных от датчиков.

AODV целесообразно использовать для решения следующих задач:

Разведывательные миссии и отслеживание движущихся целей. Способность поддерживать высокий PDR (выше 95 %) на скоростях до 35 м/с позволяет использовать AODV для быстрых разведывательных миссий, отслеживания

движущихся целей или поисково-спасательных операций, где воздушным базовым станциям необходимо быстро и гибко перемещаться.

Развертывание в обширных зонах с низкой плотностью узлов. В таких условиях AODV проявляет большую гибкость, особенно с моделью Random Waypoint (PDR = 97,52 %), что оправдывает его выбор для миссий по исследованию приграничных территорий, лесистых гор или островов.

Заключение

В данном исследовании была проведена комплексная оценка производительности двух протоколов маршрутизации (OLSR и AODV) в среде сетей воздушных базовых станций посредством четырех сценариев моделирования. Результаты показывают, что ни один из протоколов не обладает абсолютным превосходством, но имеет свои преимущества в зависимости от условий развертывания. OLSR демонстрирует высокую производительность в средах с высокой плотностью узлов и низкой скоростью, в то время как AODV более подходит для сценариев с высокой скоростью и сильно изменяющейся топологией.

На основе проведенного анализа сформулированы рекомендации по выбору протокола для рассматриваемых сценариев развертывания сети. Разработка улучшенных версий этих протоколов и гибридных решений относится к дальнейшим исследованиям. В частности, перспективными направлениями являются учет скорости, энергии и качества связи в процессе маршрутизации, а также применение обучения с подкреплением.

Направления предстоящих исследований будут сосредоточены на разработке и оценке таких решений путем более детального моделирования и практических испытаний. В частности, планируется:

– разработать и внедрить улучшенные версии OLSR и AODV на платформе NS-3, оценить их производительность по сравнению с оригинальными протоколами;

– расширить моделирование, включив более реалистичные факторы, такие как энергетические перебои, помехи в среде и ограничения видимости;

– изучить влияние протоколов шифрования и безопасности на производительность маршрутизации в сетях воздушных базовых станций;

– разработать аналитические модели на основе машинного обучения для прогнозирования производительности сети в сложных сценариях;

– протестировать архитектуру гибридной маршрутизации в реальных сценариях развертывания, таких как мониторинг стихийных бедствий и поддержка спасательных операций.

В результате дальнейших исследований планируется разработать оптимальные решения для маршрутизации в сетях воздушных базовых станций, что позволит более широко применять их во многих важных областях современной жизни.

DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-3-11-40
URL: https://www.sut.ru/doci/nauka/1AEA/ITT/2026_3/11-40.pdf

Литература

1. Ateya A. A., Bushelenkov S., Muthanna A., Paramonov A., Koucheryavy A., et al. Multipath Routing Scheme for Optimum Data Transmission in Dense Internet of Things // Mathematics. 2023. Vol. 11. Iss. 19. P. 4168. DOI: 10.3390/math11194168. EDN: ZQDDWQ

2. Кучерявый А. Е., Парамонов А. И., Маколкина М. А., Мутханна А. С. А., Выборнова А. И., et al. Трехмерные многослойные гетерогенные сверхплотные сети // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Т. 10. № 3. С. 1–12. DOI: 10.31854/2307-1303-2022-10-3-1-12. EDN: LHLYEM

3. Волков А. Н., Мутханна А. С. А., Кучерявый А. Е., Бородин А. С., Парамонов А. И. и др. Перспективные исследования сетей и услуг 2030 в лаборатории 6G MEGANETLAB СПбГУТ // Электросвязь. 2023. № 6. С. 5–14. DOI: 10.34832/ELSV.2023.43.6.001. EDN: CJSYLS

4. Дунайцев Р. А., Бородин А. С., Кучерявый А. Е. Интегрированная сеть космос – воздух – земля – море как основа сетей связи шестого поколения // Электросвязь. 2022. № 10. С. 5–8. DOI: 10.34832/ELSV2022.35.10.001. EDN: QCGIPI

5. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) // Internet Engineering Task Force / Ed. by T. H. Clausen, P. Jacquet. 2003. RFC 3626. DOI: 10.17487/RFC3626

6. Chakeres I. D., Belding-Royer E. M. AODV Routing Protocol Implementation Design // Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (CDCSW'04, 23–24 March 2004, Tokyo, Japan). 2004. PP. 698–703. DOI: 10.1109/ICDCSW.2004.1284108

7. Wang L., Olariu S. A Two-Zone Hybrid Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. 2004. Vol. 15. Iss. 12. PP. 1105–1116. DOI: 10.1109/TPDS.2004.73

8. Usman Q., Chughtai O., Nawaz N., Kaleem Z., Khaliq K. A., et al. A Reliable Link-adaptive Position-based Routing Protocol for Flying Ad Hoc Networks // Mobile Networks and Applications. 2021. Vol. 26. PP. 1801–1820. DOI: 10.1007/s11036-021-01758-w

9. Liu C., Wang Y., Wang Q. PARouting: Prediction-supported Adaptive Routing Protocol for FANETs with Deep Reinforcement Learning // International Journal of Intelligent Networks. 2023. Vol. 4. PP. 113–121. DOI: 10.1016/j.ijin.2023.05.002. EDN: MUOAWI

10. Perkins C. E., Bhagwat P. Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 1994. Vol. 24. Iss. 4. PP. 234–244. DOI: 10.1145/190809.190336

11. Johnson D. B., Maltz D. A., Broch J. DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks. 2001. URL: https://www.cse.iitb.ac.in/~mythili/teaching/cs653_spring2014/references/dsr.pdf (Accessed 30.04.2006).

12. Pearlman M. R., Haas Z. J. Determining the Optimal Configuration for the Zone Routing Protocol // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 1999. Vol. 17. Iss. 8. PP. 1395–1414. DOI: 10.1109/49.779922

13. Karp B., Kung H. T. GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks // Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'00, 6–11 August 2000, Boston, USA). 2000. PP. 243–254. DOI: 10.1145/345910.345953

14. Zhou J., Chen Y., Leong B., Sundaramoorthy P. S. Practical 3D Geographic Routing for Wireless Sensor Networks // Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'10, 3–5 November 2010, Zürich, Switzerland). 2010. PP. 337–350. DOI: 10.1145/1869983.1870016

Статья поступила 06 мая 2026 г.
Одобрена после рецензирования 23 июля 2026 г.
Принята к публикации 16 октября 2026 г.

Информация об авторах

Нгуен Дык Ту – аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: nguen.dt@sut.ru

Филина Надежда Романовна – аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: filina.nr@sut.ru

Мутханна Аммар Салех Али – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: muthanna.asa@sut.ru

Кучерявый Андрей Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: akouch@sut.ru

https://doi.org/10.31854/2307-1303-2026-14-3-11-40
EDN: WGSWDG

Analysis of OLSR and AODV Routing Protocols for Highly Mobile Aerial Base Station Networks: Experimental Performance Evaluation in Various Application Scenarios

D. T. Nguyen, N. Filina ✉, A. Muthanna, A. Koucheryavy

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Purpose. *The rapid development of aerial base station (ABS) technologies has led to the formation of aerial ad hoc networks, which are widely applied in telecommunications, security monitoring, disaster response operations, emergency management, precision agriculture, and cargo delivery. However, the three-dimensional mobility of nodes and the dynamically changing network topology significantly complicate the design of efficient routing solutions. Conventional routing protocols developed for mobile ad hoc networks (MANETs) are not optimized for the characteristics of the aerial environment, which limits their applicability in mission-critical scenarios with strict requirements for latency, throughput, and reliability. The objective is to compare the performance of OLSR and AODV while varying the number of nodes, node speed, mobility model, and simulation area size.* ***Methods.*** *The study is based on the simulation of aerial base station deployment scenarios, the analysis of key network performance metrics (latency, throughput, packet delivery ratio, and jitter), and a comparative evaluation of the OLSR and AODV protocols under dynamic topology conditions.* ***Novelty.*** *The scientific novelty of this work includes: a comprehensive comparison of reactive and proactive routing protocols in the context of aerial ad hoc networks; consideration of three-dimensional node mobility and aerial network topology dynamics; and the development of recommendations for protocol selection according to network deployment conditions and quality-of-service requirements.* ***Results.*** *The simulation results made it possible to identify the advantages and limitations of the OLSR and AODV protocols in different deployment scenarios, as well as to formulate recommendations for protocol selection based on the considered performance metrics and network deployment conditions.* ***Practical relevance.*** *The obtained results expand the understanding of the applicability of routing protocols in aerial ad hoc networks and can be used in the design of UAV-based telecommunication systems, monitoring systems, and disaster response platforms that require high reliability and rapid response capabilities.*

Key words: *aerial base stations, ad hoc networks, routing, OLSR, AODV, unmanned aerial vehicles, dynamic topology, low latency, throughput, network reliability*

References

1. Ateya A. A., Bushelenkov S., Muthanna A., Paramonov A., Koucheryavy A., et al. Multipath Routing Scheme for Optimum Data Transmission in Dense Internet of Things // Mathematics. 2023. Vol. 11. Iss. 19. P. 4168. DOI: 10.3390/math 11194168. EDN: ZQDDWQ

2. Koucheryavy A., Paramonov A., Makolkina A., Muthanna A. S. A., Vybornova A., et al. 3 Dimension Multilayer Heterogenous Ultra Dense Networks // Telecom IT. 2022. Vol. 10. Iss. 3. PP. 1–12. DOI: 10.31854/2307-1303-2022-10-3-1-12. EDN: LHLYEM

3. Volkov A. N., Muthanna A. S. A., Kucheryavy A. E., Borodin A. S., Paramonov A. I., et al. Perspective Research of Networks and Services 2030 in the

Laboratory 6G Meganetlab SPbSUT // Electrosvyaz. 2023. Iss. 6. PP. 5–14. DOI: 10.34832/ELSV.2023.43.6.001. EDN: CJSYLS

4. Dunaytsev R. A., Borodin A. S., Koucheryavy A. E. Space – Air – Ground – Sea Integrated Networking as a Basis for 6G Networks // Electrosvyaz. 2022. Iss. 10. PP. 5–8. DOI: 10.34832/ELSV2022.35.10.001. EDN: QCGIPI

5. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) // Internet Engineering Task Force / Ed. by T. H. Clausen, P. Jacquet. 2003. RFC 3626. DOI: 10.17487/RFC3626

6. Chakeres I. D., Belding-Royer E. M. AODV Routing Protocol Implementation Design // Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (CDCSW'04, 23–24 March 2004, Tokyo, Japan). 2004. PP. 698–703. DOI: 10.1109/ICDCSW.2004.1284108

7. Wang L., Olariu S. A Two-Zone Hybrid Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. 2004. Vol. 15. Iss. 12. PP. 1105–1116. DOI: 10.1109/TPDS.2004.73

8. Usman Q., Chughtai O., Nawaz N., Kaleem Z., Khaliq K. A., et al. A Reliable Link-adaptive Position-based Routing Protocol for Flying Ad Hoc Networks // Mobile Networks and Applications. 2021. Vol. 26. PP. 1801–1820. DOI: 10.1007/s11036-021-01758-w

9. Liu C., Wang Y., Wang Q. PARouting: Prediction-supported Adaptive Routing Protocol for FANETs with Deep Reinforcement Learning // International Journal of Intelligent Networks. 2023. Vol. 4. PP. 113–121. DOI: 10.1016/j.ijin.2023.05.002. EDN: MUOAWI

10. Perkins C. E., Bhagwat P. Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 1994. Vol. 24. Iss. 4. PP. 234–244. DOI: 10.1145/190809.190336

11. Johnson D. B., Maltz D. A., Broch J. DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks. 2001. URL: https://www.cse.iitb.ac.in/~mythili/teaching/cs653_spring2014/references/dsr.pdf (Accessed 30.04.2006).

12. Pearlman M. R., Haas Z. J. Determining the Optimal Configuration for the Zone Routing Protocol // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 1999. Vol. 17. Iss. 8. PP. 1395–1414. DOI: 10.1109/49.779922

13. Karp B., Kung H. T. GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks // Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'00, 6–11 August 2000, Boston, USA). 2000. PP. 243–254. DOI: 10.1145/345910.345953

14. Zhou J., Chen Y., Leong B., Sundaramoorthy P. S. Practical 3D Geographic Routing for Wireless Sensor Networks // Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'10, 3–5 November 2010, Zürich, Switzerland). 2010. PP. 337–350. DOI: 10.1145/1869983.1870016

Information about Authors

Nguyen Duc Tu – Postgraduate at the Department of Communication Networks and Data Transmission (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: nguen.dt@sut.ru

Filina Nadezhda – Postgraduate at the Department of Communication Networks and Data Transmission (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: filina.nr@sut.ru

Muthanna Ammar – Doctor of Sciences in Engineering Sciences, Professor at the Department of Communication Networks and Data Transmission (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications).
E-mail: muthanna.asa@sut.ru

Koucheryavy Andrey – Doctor of Sciences in Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Communication Networks and Data Transmission (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecom-munications). E-mail: akouch@sut.ru

DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-3-11-40
URL: https://www.sut.ru/doci/nauka/1AEA/ITT/2026_3/11-40.pdf