

УДК 004.057.4

Квасов Станислав Олегович¹, студент

Красиков Виктор Владимирович², студент

Научные руководители: Шоберг Анатолий Германович³, кандидат технических наук, доцент; Власов Владимир Николаевич⁴, старший преподаватель

^{1,2,3,4}ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет» г. Хабаровск, Хабаровский край

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАРШРУТИЗАЦИИ В СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ ПРОТОКОЛОВ AODV И LEACH ПРИ СБОРЕ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Аннотация: В данной статье представлен сравнительный анализ производительности двух протоколов маршрутизации для беспроводных сенсорных сетей – AODV (реактивный) и LEACH (иерархический). Исследование проведено на примере сети, состоящей из четырёх стационарных узлов и одной базовой станции, имитирующей систему сбора телеметрических данных с рассредоточенных объектов. Моделирование выполнялось в идеальных условиях распространения радиосигнала, что позволило выделить собственные характеристики протоколов без влияния внешних факторов. В качестве критериев сравнения использовались задержка доставки пакетов, коэффициент доставленных пакетов (Packet Delivery Ratio, PDR) и суммарное энергопотребление узлов. Показано, что LEACH обеспечивает более равномерное распределение энергозатрат и большую продолжительность жизни сети при периодической передаче данных, тогда как AODV демонстрирует меньшие задержки при редких событиях. На основе полученных данных сформулированы рекомендации по выбору протокола в зависимости от требований к системе мониторинга.

Annotation. This paper presents a comparative analysis of the performance of two routing protocols for wireless sensor networks – AODV (reactive) and LEACH (hierarchical). The study is carried out on the example of a network consisting of four stationary nodes and one base station, simulating a telemetry data collection system for distributed objects. The simulation was performed under ideal radio propagation conditions, which allowed the intrinsic characteristics of the protocols to be distinguished without external interference. Packet delivery delay, packet delivery ratio, and total node energy consumption were used as comparison criteria. It is shown that LEACH provides more uniform energy consumption and a longer network lifetime during periodic data transmission, while AODV demonstrates lower delays for rare events. Based on the obtained data, recommendations for protocol selection are formulated depending on the requirements of the monitoring system.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, протоколы маршрутизации, AODV, LEACH, имитационное моделирование, телеметрия, энергоэффективность, задержка доставки, мониторинг.

Keywords: wireless sensor networks, routing protocols, AODV, LEACH, simulation modeling, telemetry, energy efficiency, delivery delay, monitoring.

В настоящее время беспроводные сенсорные сети (БСС) находят широкое применение в системах мониторинга различных объектов. Такие сети состоят из множества автономных узлов, оснащённых датчиками, микроконтроллерами и радиомодулями, которые собирают информацию и передают её на базовую станцию для дальнейшей обработки. Одной из ключевых задач при проектировании БСС является выбор протокола маршрутизации, определяющего, каким образом данные будут доставляться от узлов-источников к получателю. От этого выбора зависят надёжность доставки, задержки передачи и энергопотребление узлов, что особенно критично для автономных сетей с ограниченным ресурсом питания [1, 2].

Среди множества существующих протоколов маршрутизации особое место занимают два класса: реактивные (on-demand) и иерархические (кластерные).

Типичным представителем первого является AODV, который строит маршруты только при необходимости отправки данных. Второй класс представлен протоколом LEACH, основанном на динамическом формировании кластеров и выборе головных узлов, агрегирующих данные и передающих их на базовую станцию [4, 5]. Оба протокола широко изучены, однако их сравнительная эффективность в сценариях мониторинга малых сетей с фиксированным расположением узлов остаётся недостаточно исследованной.

Целью данной работы является сравнительное исследование производительности протоколов AODV и LEACH в условиях, характерных для системы сбора телеметрических данных с четырёх стационарных объектов. Для исключения влияния внешних факторов моделирование проводится в идеальной среде.

AODV – реактивный протокол: маршруты строятся только при необходимости передачи, что снижает служебный трафик, но увеличивает задержку перед первой отправкой [5, 6].

LEACH – иерархический протокол: узлы объединяются в кластеры, головной узел агрегирует данные и передаёт на базовую станцию, экономя энергию ценой циклической реорганизации [4, 8].

Для сравнительного анализа выбрана конфигурация сети, предназначенной для сбора телеметрических данных. Сеть состоит из четырёх стационарных сенсорных узлов и одной базовой станции. Узлы генерируют пакеты фиксированного размера (28 байт, из которых 20 байт – длина сообщения и 8 байт – служебная информация) с периодичностью 1 пакет в секунду. Параметры модели: все узлы стационарны, координаты фиксированы; канальный уровень – IEEE 802.11 с моделью распространения сигнала в свободном пространстве (Free Space Path Loss), что позволяет исключить влияние внешних факторов; начальный запас энергии каждого узла – 100 Дж. Для LEACH в каждом раунде (продолжительностью 10 с) случайным образом выбирается один головной узел, который принимает данные от остальных трёх узлов, агрегирует их и отправляет

на базовую станцию. Для AODV используется стандартная реализация с параметрами по умолчанию [6].

Параметры радиомодулей заданы приближенными к характеристикам микроконтроллера ESP32, широко применяемого в устройствах Интернета вещей. Несущая частота составляет 2,4 ГГц, мощность передатчика – 20 дБм, чувствительность приёмника –85 дБм. Энергопотребление узлов смоделировано с учётом типовых режимов работы радиомодуля: в режиме передачи – 100 мВт, в режиме приёма – 10 мВт, в режиме ожидания и сна – 1–2 мВт. Данные значения соответствуют реальным аппаратным характеристикам ESP32 и позволяют адекватно оценить энергоэффективность протоколов маршрутизации.

Показатели эффективности: средняя задержка доставки пакета (end-to-end delay), коэффициент доставленных пакетов и суммарное энергопотребление сети. Эти метрики позволяют оценить пригодность протоколов для долговременного автономного мониторинга.

Имитационное моделирование выполнялось в специализированной среде дискретно-событийного моделирования, ориентированной на исследование сетей связи и распределённых систем. Использовались встроенные библиотеки, содержащие реализацию протоколов AODV и LEACH. Для AODV применялась стандартная модель с UDP-приложениями. Для LEACH использовались специализированные узлы с отключёнными стандартными приложениями, что позволяет протоколу самостоятельно управлять генерацией и агрегацией данных [3, 8]. На Рисунке 1 представлена схема топологии сети, показывающая расположение четырёх сенсорных узлов и базовой станции.

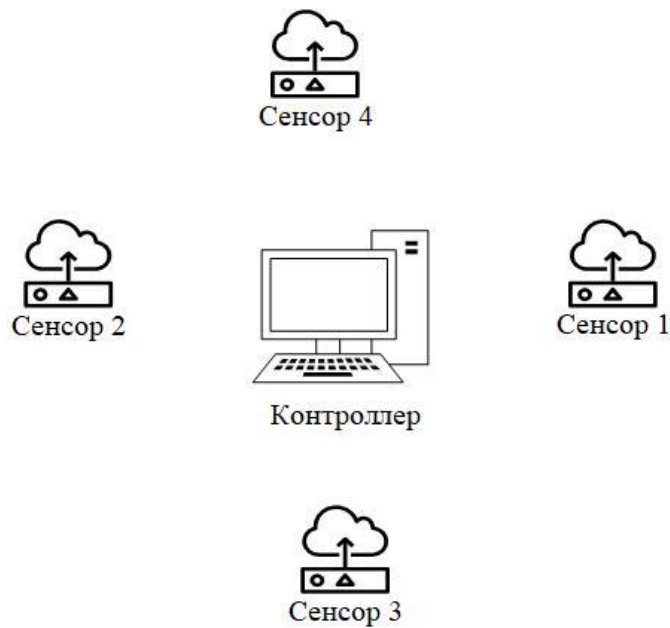


Рис. 1. Схема расположения базовой станции и четырёх сенсорных узлов

Моделирование проводилось в течение 3600 секунд (1 час). Начальный запас энергии каждого узла составлял 100 Дж.

Для протокола AODV все четыре сенсорных узла сгенерировали по 3600 пакетов (всего 14400). Все пакеты были успешно доставлены на базовую станцию – потери отсутствовали. Задержка доставки измерялась как время полного цикла (RTT) от отправки пакета узлом до получения подтверждения от базовой станции и составила 7,46 мс. Соответственно, односторонняя задержка (end-to-end) составляет ~3,73 мс. Стандартное отклонение не превышало 1,04 мс, что свидетельствует о высокой стабильности. Полученные значения согласуются с известными оценками для AODV в малых сетях [5, 6].

Для протокола LEACH в ходе моделирования было сгенерировано 168 пакетов, которые были агрегированы головными узлами и переданы на базовую станцию. Все 168 пакетов успешно доставлены – потерь также не зафиксировано. Средняя задержка доставки пакета для LEACH составила 1647,91 мс. Это значение обусловлено циклической реорганизацией кластеров (выбор головных узлов, TDMA-расписание) и является характерным для иерархических протоколов [4, 7].

Таблица 1 – Сравнение показателей доставки пакетов и задержек

Протокол	Сгенерировано пакетов	Доставлено пакетов	PDR, %	Средняя задержка, мс
AODV	14400	14400	100	3,73
LEACH	168	168	100	1647,91

Различие в количестве доставленных пакетов объясняется тем, что LEACH использует агрегацию данных: головной узел собирает пакеты от всех сенсоров за раунд (10 секунд) и отправляет на базовую станцию один агрегированный пакет. Благодаря этому количество переданных по сети пакетов в LEACH (168) значительно меньше, чем в AODV (14400), что отражает эффективность LEACH в сокращении сетевого трафика. AODV же передаёт каждый пакет индивидуально, без агрегации.

Энергопотребление оказалось более показательным. Для AODV после часа работы остаточная энергия контроллера составила 89,19 Дж (израсходовано 10,81 Дж), сенсорные узлы – в среднем 91,49 Дж (расход ~8,51 Дж на узел). Для LEACH контроллер израсходовал 7,10 Дж (остаток 92,90 Дж), сенсорные узлы – в среднем ~7,12 Дж (остаток 92,88 Дж). Таким образом, LEACH продемонстрировал более высокую энергоэффективность: расход энергии контроллера снизился на 3,7 Дж, а сенсорных узлов – на 1,4 Дж по сравнению с AODV.

Таблица 2 – Остаточная энергия узлов после 3600 с.

Протокол	Остаточная энергия узла, Дж	
	Контроллер	Сенсор (среднее значение между всеми узлами)
AODV	89,19	91,49
LEACH	92,90	92,88

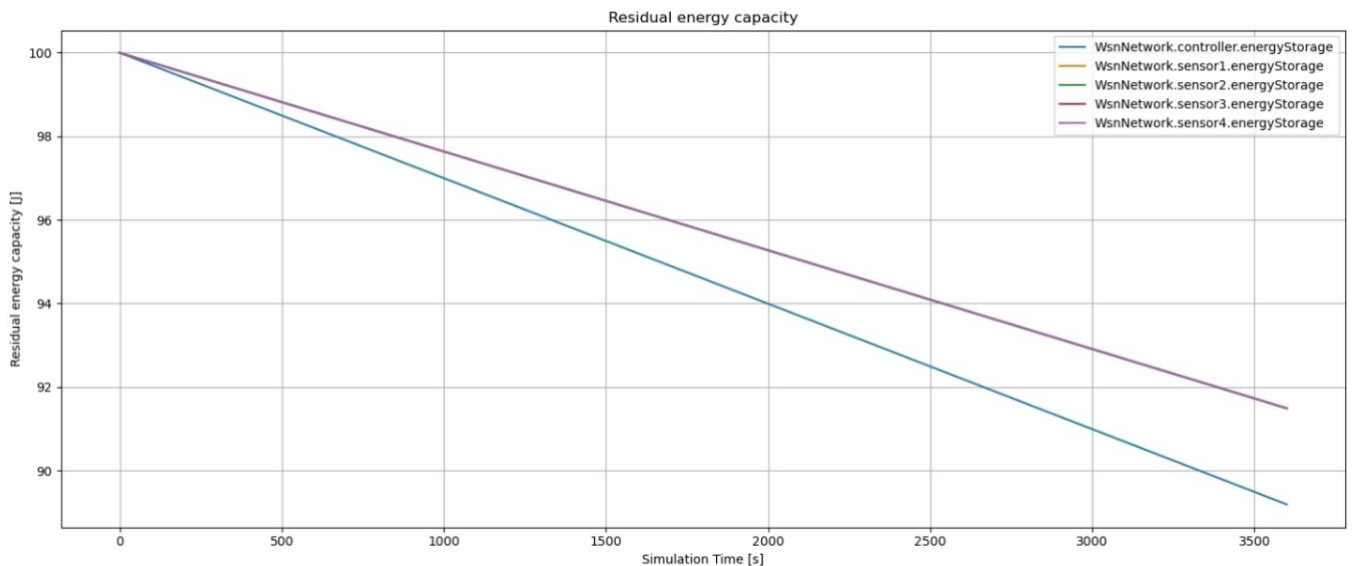


Рис. 2. График изменения остаточной энергии узлов во времени для AODV

Из рисунка 2 следует, что в AODV базовая станция расходует больше энергии, чем сенсорные узлы. Линии, соответствующие четырём сенсорным узлам, на графике практически совпадают, что указывает на одинаковый характер их энергопотребления.

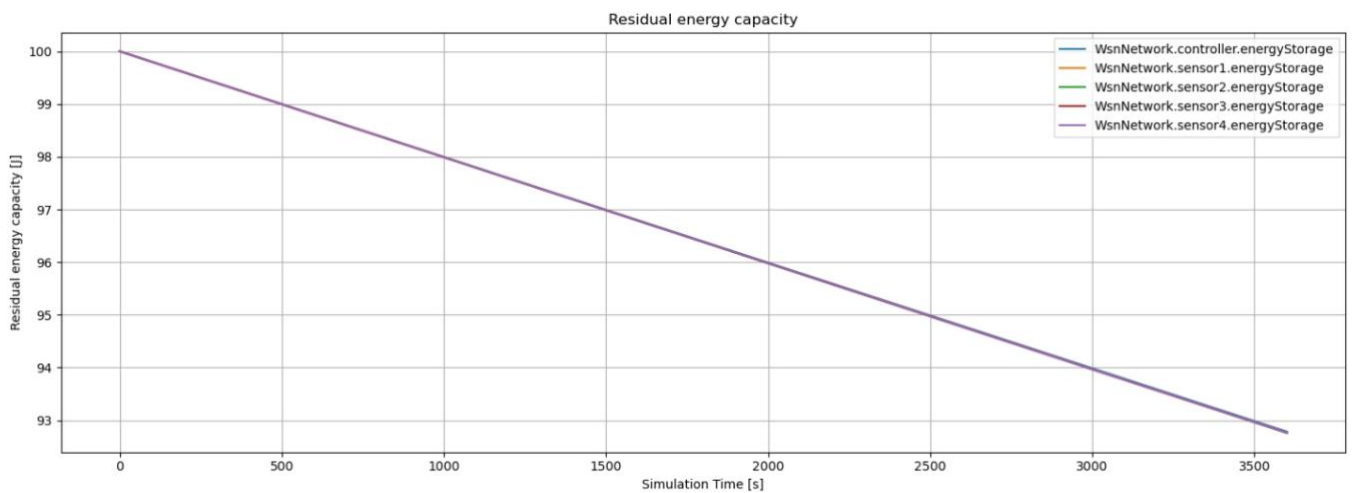


Рис. 3. График изменения остаточной энергии узлов во времени для LEACH

Рисунок 3 показывает, что в LEACH графики остаточной энергии всех узлов (контроллера и сенсоров) практически совпадают, что свидетельствует о равномерном распределении энергозатрат.

Линейный характер графиков остаточной энергии объясняется тем, что энергопотребление каждого узла складывается из постоянных мощностей в режимах передачи, приёма и ожидания. Поскольку нагрузка на сеть в ходе эксперимента была постоянной (1 пакет в секунду), расход энергии оказался практически линейным.

AODV гарантирует 100% доставку каждого отдельного пакета при низкой и стабильной односторонней задержке (менее 4 мс). Это свойство критически важно для систем, где требуется немедленная передача каждого сообщения (например, тревожных сигналов). Однако платой за это является более высокое энергопотребление, особенно для узлов, участвующих в активной маршрутизации [5, 6].

LEACH, напротив, ориентирован на энергосбережение. Благодаря агрегации данных и сокращению числа дальних передач, он существенно экономит ресурс батарей, что подтверждается меньшими значениями израсходованной энергии. Однако платой является высокая односторонняя задержка ($\approx 1,65$ с), обусловленная циклической реорганизацией кластеров и TDMA-расписанием. Для приложений, где допустима задержка в несколько секунд (например, регулярный мониторинг температуры, влажности), LEACH является более энергоэффективным выбором. Для систем реального времени, требующих мгновенной реакции, предпочтителен AODV [6, 8].

В результате имитационного моделирования проведён сравнительный анализ протоколов AODV и LEACH в беспроводной сенсорной сети из четырёх узлов.

1. AODV обеспечивает 100% доставку пакетов с односторонней задержкой 3,73 мс.
2. LEACH гарантирует доставку всех агрегированных пакетов при односторонней задержке 1647,91 мс.
3. LEACH более энергоэффективен: за час работы экономит на контроллере 3,7 Дж, на сенсорах – 1,4 Дж.

Рекомендации по выбору протокола:

1. AODV – для приложений, критичных к задержке (пожарная сигнализация, аварийные оповещения);
2. LEACH – для энергоограниченных сетей с периодической передачей данных, где допустимы задержки в несколько секунд.

Перспективы дальнейших исследований включают оценку работы протоколов при увеличении числа узлов, в условиях затухания сигнала, а также исследование гибридных схем маршрутизации, сочетающих преимущества реактивного и иерархического подходов.

Список литературы

1. Аль-Обайди, А. М. Ж. Локализация сенсорных узлов в беспроводных сенсорных сетях / А. М. Ж. Аль-Обайди, А. Н. Заливин, С. Л. Бабаринов // Экономика. Информатика. – 2024. – Т. 51, № 1. – С. 232–240. – DOI: 10.52575/2687-0932-2024-51-1-232-240.
2. Сабвалиев, А. Анализ задач построения беспроводных сенсорных сетей / А. Сабвалиев, А. Аскеров // Sciences of Europe. – 2024. – № 143. – С. 103-106. – DOI: 10.5281/zenodo.12540949.
3. Agnihotri, S. A survey and comparative analysis of the various routing protocols of Internet of Things / S. Agnihotri, K. R. Ramkumar // Journal of High Speed Networks. – 2025. – Vol. 31, No. 2. – P. 135-152. – DOI: 10.3233/JHS-222143.
4. Almutairi, A. F. Energy efficient modified TDMA schedule for reducing energy consumption in Wireless Sensor Networks / A. F. Almutairi, M. A. Al-Maitah, M. Z. A. Bhuiyan // Discover Applied Sciences. – 2026. – Vol. 8. – Article ID 345. – DOI: 10.1007/s42452-025-08055-1.
5. Daanoune, I. A comprehensive survey on LEACH-based clustering routing protocols in Wireless Sensor Networks / I. Daanoune, B. Abdennaceur,

- A. Ballouk // Ad Hoc Networks. – 2021. – Vol. 114. – Article ID 102409. – DOI: 10.1016/j.adhoc.2020.102409.
6. Dongare, S. Routing Strategies in Wireless Sensor Networks: A Relative Analysis / S. Dongare, S. Kurekar, P. Chitte, N. Sathawane, S. Turkane // Journal of Information Systems Engineering and Management. – 2025. – Vol. 10, No. 4. – P. 1-12. – e-ISSN 2468-4376.
7. Omar, H. Energy-driven K-means-based LEACH routing protocol for enhanced lifetime in wireless sensor networks / H. Omar, A. M. Abbas, M. E. El-Sharkawy // Scientific Reports. – 2026. – Vol. 16. – Article ID 1962. – DOI: 10.1038/s41598-025-32141-4.
8. Wang, T. Research on LEACH Protocol Based on Dynamic Clustering and Routing Optimization / T. Wang, X. Qu, H. Cui // Sensors. – 2026. – Vol. 26, No. 1. – Article ID 199. – DOI: 10.3390/s26010199.