

УДК 004.057.4

Казак Ю.С., аспірант

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОТОКОЛОВ МАРШРУТИЗАЦИИ В СЕТИ AD-HOC**Kazak Y.S. Energy-Efficient Routing Protocols in the Ad-hoc network.**

The distributed nature and dynamic topology of Ad-hoc Networks introduces very special requirements in routing protocols that should be met. The most important feature of a routing protocol, in order to be efficient for Ad-hoc Networks, is the energy consumption and the extension of the network's lifetime. In this paper, energy efficient routing protocols are classified into four main classes: Network Structure, Communication Model, Topology Based and Reliable Routing. Then, an analytical survey on energy efficient routing protocols for Ad-hoc Networks is provided. In this paper, we have discussed the routing protocols, its classifications, advantage and disadvantages of the routing protocols and taxonomy of energy efficient routing protocols in Mobile Ad hoc network. This comparison reveals the important design issues that need to be taken into consideration while designing and evaluating network protocol.

Keywords: Ad-hoc Networks; routing protocols; energy efficiency.

Казак Ю.С. Енергоефективність протоколів маршрутизації в мережі Ad-hoc.

Споживання енергії безпроводовими вузлами є найважливішою проблемою для проектування безпроводових однорангових мереж, оскільки безпроводові вузли зазвичай мають обмежену енергетичну ємність. В останні роки для Ad-hoc мереж було запропоновано багато енергозберігаючих протоколів маршрутизації. У даній роботі енергоефективні протоколи маршрутизації класифікуються за чотирма параметрами: структура мережі, модель зв'язку, топологія і надійність маршрутизації. Представлену класифікацію можна враховувати при проектуванні та оцінці протоколів.

Ключові слова: Ad-hoc мережі; протоколи маршрутизації; енергоефективність

Казак Ю.С. Энергоэффективность протоколов маршрутизации в сети Ad-hoc.

Потребление энергии беспроводными узлами является важнейшей проблемой для проектирования беспроводных одноранговых сетей, поскольку беспроводные узлы обычно имеют ограниченную энергетическую емкость. В последние годы для Ad-hoc сетей были предложены многие энергосберегающие протоколы маршрутизации. В данной работе энергоэффективные протоколы маршрутизации классифицируются по четырем характеристикам: структура сети, модель связи, топология и надежная маршрутизация. Представленную классификацию можно учитывать при проектировании и оценке протоколов.

Ключевые слова: Ad-hoc сети; протоколы маршрутизации; энергоэффективность.

Введение

В последнее время активное развитие получили самоорганизующиеся сети, основным преимуществом которых является возможность установления соединения между терминалами повсюду и в любой момент времени без помощи фиксированной, а на практике часто жестко определенной, централизованной сетевой инфраструктуры.

Мобильные самоорганизующиеся сети – одно из наиболее перспективных направлений развития информационно-коммуникационных сетей. Однако необходимо отметить и проблемы, непосредственно следующие из самого определения самоорганизующихся мобильных сетей: мобильность узлов ведет к дополнительному повышению динамичности топологии сети, так как к возможности обрыва связи из-за помех или включения/выключения узла добавляется вероятность его перемещения; запас источников питания мобильных узлов может быть ограничен, в связи с чем при проектировании аппаратных средств и протоколов необходимо учитывать еще и энергопотребление.

Энергосберегающая конструкция в самоорганизующихся сетях более важна и сложна, чем в других беспроводных сетях. Во-первых, из-за отсутствия инфраструктуры мобильные узлы в сети Ad-hoc должны действовать как маршрутизаторы и участвовать в процессе пересылки пакетов. Поэтому нагрузка трафика в этих сетях больше, чем в других беспроводных сетях с фиксированными точками доступа или базовыми станциями, и, следовательно, Ad-hoc сети имеют больше энергопотребления. Во-вторых,

энергосберегающий режим должен учитывать различные критерии производительности сети. Например, протоколы маршрутизации обычно пытаются найти кратчайший путь от источников до пунктов назначения. Поэтому простые решения, которые учитывают ограничения мощности, могут привести к серьезному снижению производительности.

Анализ литературных данных

В последние годы были предложены различные энергосберегающие протоколы маршрутизации [1-2]. Эти протоколы имеют уникальные атрибуты и используют различные механизмы восстановления при потреблении энергии.

Jinhua Zhu и Xin Wang [3] предложили энергосберегающую схему маршрутизации, называемую PEER, для повышения производительности протокола маршрутизации во время обнаружения маршрута и в сценариях мобильности. Результаты моделирования показали, что протокол PEER уменьшает накладные расходы на обнаружение пути и задержку до 2/3, а потребление энергии передачи – до 50 %.

В [4] предложен надежный и энергоэффективный многопутевой протокол маршрутизации – REER. Свою основную цель при разработке данного протокола авторы видели в предсказании лучшего следующего перехода путем фазы проектирования пути с помощью остаточной энергии, доступного размера буфера узла и отношения сигнала к шуму.

Авторами работы [5] предложен многопутевой протокол маршрутизации на основе качества обслуживания (протокол GMCAR) с предотвращением перегрузки на основе решетки, который основан главным образом на гарантированной сквозной задержке. Протокол делит область зондирования на решетки, каждая из которых состоит из сенсорных узлов и одного главного узла. Главные узлы помогают в сборе данных от неглавных узлов в той же решетке. Главный узел может совершать передачу собранных данных на другие главные узлы для достижения приемного узла. Протокол поддерживает предотвращение перегрузки, если перегруженные участки свободны для передачи, когда происходит перегрузка. Протокол GMCAR увеличивает энергоэффективность и срок службы сети, повышая пропускную способность сети и сводя к минимуму задержки.

В [6] представлен обзор протоколов маршрутизации, который ориентирован на потребление энергии на основе аппаратных компонентов узла. Авторы разделяют сенсорный узел на четыре основных компонента: сенсорную подсистему, включающую в себя один или несколько датчиков для сбора данных, подсистему обработки, включающую в себя микроконтроллер и память для локальной обработки данных, радиоподсистему для беспроводной передачи данных и блок питания.

В [7] представлены вопросы проектирования беспроводной сенсорной сети (Wireless sensor networks, WSN) и классификация протоколов маршрутизации. Кроме того, протоколы маршрутизации представлены на основе их характеристик и механизмов работы, которые они используют, чтобы продлить срок службы сети.

В работе [8] представлено краткое введение в задачи маршрутизации и некоторые проблемы проектирования в самоорганизующихся сетях. Помимо этого, представлен сравнительный анализ различных протоколов маршрутизации наряду с наиболее энергосберегающим протоколом (LEACH) и некоторыми из улучшенных версий этого протокола. А в работе [13] авторы представили различные иерархические протоколы маршрутизации, полученные из преобразования протокола LEACH. Также в работе освещены проблемы и недостатки LEACH, проведено сравнительное исследование особенностей и проблем производительности всех иерархических протоколов.

Цель и задачи исследования

На основе исследования публикаций касательно маршрутизации в самоорганизующихся сетях [5-13], в данной статье выявлено, что для обеспечения энергоэффективности протоколов маршрутизации в Ad-hoc сетях необходимо учитывать следующие показатели: масштабируемость, мобильность, метрика маршрута, надежность и поддержка QoS.

Цель данной статьи заключается в сравнительной характеристике протоколов маршрутизации в самоорганизующихся сетях с точки зрения выявленных показателей, обеспечивающих энергоэффективность, а именно: масштабируемость, мобильность, метрика маршрута, надежность и поддержка QoS.

1. Классификация протоколов маршрутизации с низким энергопотреблением

В результате исследований существующих протоколов маршрутизации в Ad-hoc сетях [9-13] в данной работе выполнена классификация по четырем характеристикам, таким как: структура сети, модель связи, топология и надежность маршрутизации (рис. 1).

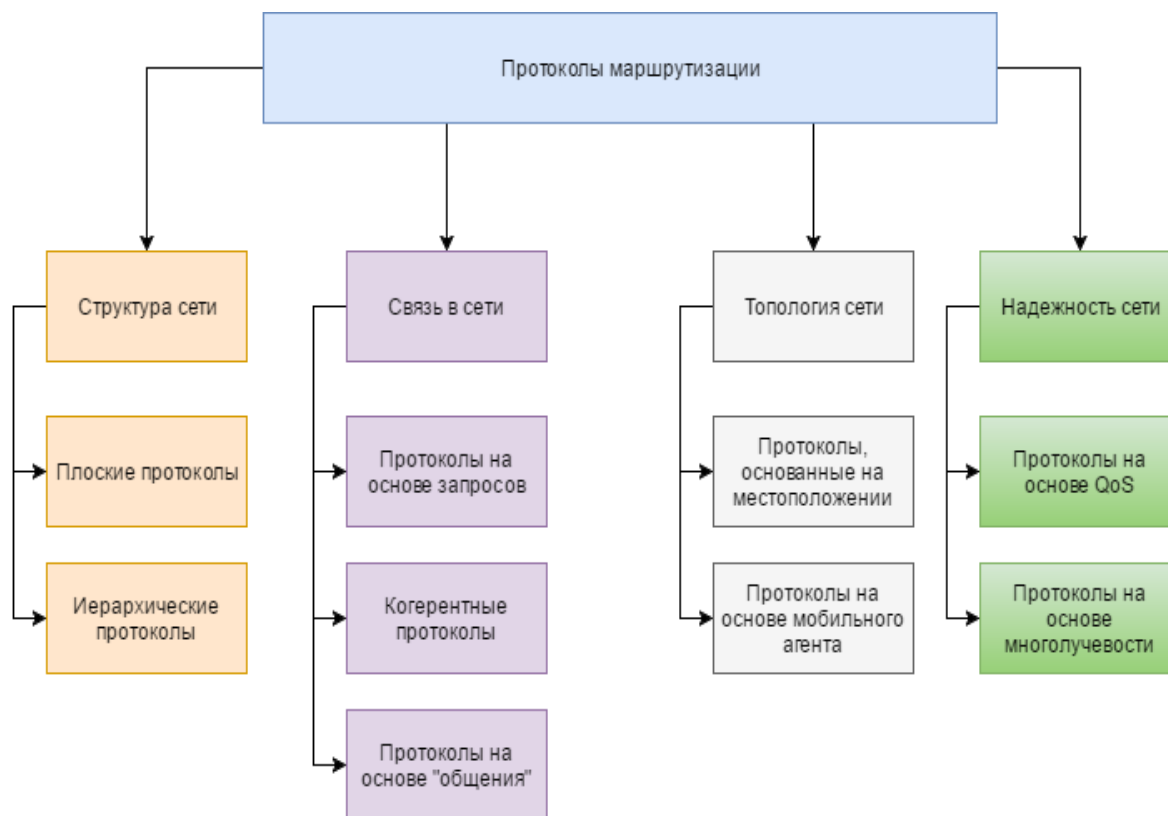


Рис. 1. Классификация энергоэффективных протоколов маршрутизации

Структура сети

Структура сети может быть классифицирована в соответствии с единообразием узлов. Основным атрибутом протоколов маршрутизации, относящихся к этому классу, является способ подключения узлов и маршрутизация информации на основе архитектуры сети. Это касается двух типов развертывания узлов, узлов с одинаковым уровнем соединения и узлов с разными иерархиями. Поэтому протоколы этого класса могут быть классифицированы следующим образом:

1. Протоколы с плоской структурой сети (табл. 1): все узлы в сети играют одну и ту же роль. Плоская сетевая архитектура имеет ряд преимуществ, включая минимальные расходы для поддержания инфраструктуры между коммуникационными узлами.

В таб. 1 представлено сравнение протоколов маршрутизации с плоской структурой сети. Протоколы TBRPD, TORA, Gossiping, E-TORA и ZRP являются эффективными в случае перемещения узлов. Протоколы TBRPF, RR и ZRP действительно надежны, главным образом из-за того, что они используют периодические hello-сообщения для обнаружения активных узлов в сети. Протоколы E-TORA и ZRP не используют метрику кратчайшего пути, в отличие от других протоколов, но они используют метрику лучшего маршрута, основанного на энергии узлов. TORA, Gossiping, RR и E-TORA являются более масштабируемыми, чем другие протоколы этой структуры.

Таблица 1. Протоколы маршрутизации с плоской структурой сети

Протоколы маршрутизации	Преимущества	Недостатки	Масштабируемость	Мобильность	Надежность	Используемая метрика	QoS
RR	Протокол способен обрабатывать собой узла, снижая скорость доставки пакетов линейно с числом отказавших	Протокол может доставлять дублированные сообщения на один и тот же узел	Хорошая	Очень ограниченная	Хорошая	Кратчайший путь	Нет
WRP	Протокол устраняет ситуации с циклами и обеспечивает более быструю сходимость маршрута.	Протокол не подходит для высокодинамичной, а также для очень большой беспроводной	Ограниченная	Ограниченная	Очень низкая	Кратчайший путь	Нет
TBRPF	Периодические обновления топологии отправляются менее часто, чем в других протоколах этой категории	Протокол не подходит для сетей с низкой мобильностью	Ограниченная	Хорошая	Хорошая	Кратчайший путь	Нет
TORA	Протокол минимизирует расходы на связь, поддерживает несколько маршрутов и многоадресную	Протокол не включает многоадресную передачу в качестве основной операции	Хорошая	Хорошая	Низкая	Кратчайший путь	Нет
Gossiping	Протокол избегает проблем имплозии и запрашивает лишь небольшую часть структуры сети	Распространение сообщений на все узлы в сети занимает много времени	Хорошая	Хорошая	Хорошая	Случайная	Нет
Flooding	Протокол является простым и надежным	Протокол может рассылать дублированные сообщения на один и тот же узел	Ограниченная	Низкая	Хорошая	Кратчайший путь	Нет
E-TORA	Протокол сводит к минимуму потребление энергии и приводит к балансу потребления энергии узлами	Протокол не включает многоадресную передачу в качестве основной операции	Хорошая	Хорошая	Низкая	Лучший маршрут	Нет
ZRP	Протокол обеспечивает низкий трафик маршрутизации	Протокол поддается чрезмерным задержкам	Ограниченная	Хорошая	Хорошая	Лучший маршрут	Нет

2. Протоколы с иерархической структурой сети (табл. 2): в этом классе протоколов сетевые узлы организованы в кластеры, в которых, например, узел с более высокой остаточной энергией принимает главную роль в кластере. Руководитель кластера отвечает за координацию действий внутри кластера и пересылку информации между кластерами. Кластеризация может снизить потребление энергии и продлить срок службы сети. Протоколы имеют высокий коэффициент доставки сообщений и масштабируемость сети, а также могут сбалансировать потребление энергии. Узлы вокруг базовой станции или главного узла кластера будут истощать свои источники энергии быстрее, чем другие узлы.

В табл. 2 представлено сравнение протоколов маршрутизации с иерархической структурой сети. Протоколы: LEACH, LEACH-C, PEGASIS, TEEN&APTEEN, VGA, MIMO, GBDD, NHRPA, SHPER и DHAC являются более надежными, чем другие протоколы этой структуры. Протоколы PEGASIS, VGA, GBDD, ELCH и TTDD используют метрику выбора маршрутной экономии для получения энергоэффективности узлов. LEACH, LEACH-C, PEGASIS, TEEN&APTEEN, VGA, MIMO, GBDD, NHRPA, SHPER и DHAC являются более масштабируемыми, чем другие протоколы этой структуры.

Таблица 2. Протоколы маршрутизации с иерархической структурой сети

Протоколы маршрутизации	Преимущества	Недостатки	Масштабируемость	Мобильность	Надежность	Используемая метрика	QoS
LEACH	Низкоэнергетический, одноранговый, распределенный протокол	Протокол не применим к сетям, развернутым в больших регионах, и динамическая кластеризация приводит к дополнительным расходам	Хорошая	Фиксированная базовая станция	-	Кратчайший путь	Нет
LEACH-C	Энергия для передачи данных меньше, чем в LEACH	Дополнительные расходы	Хорошая	Фиксированная базовая станция	Хорошая	Лучший маршрут	Нет

Связь в сети

Модель связи, адаптированная в протоколе маршрутизации, связана с тем, как выполняется основная работа протокола, чтобы маршрутизировать пакеты в сети. Протоколы этого класса могут предоставлять большее количество данных для заданного количества энергии. Основная проблема данного класса заключается в том, что она не имеет высокого коэффициента доставки данных, отправляемых адресату. Таким образом, не

гарантируется доставка данных. Поэтому протоколы этого класса могут быть классифицированы следующим образом:

1. Протоколы на основе запросов (табл. 3): узлы-адресаты распространяют запрос для получения данных (задачи обнаружения), а узел, имеющий эти данные, отправляет данные, которые соответствуют запросу, обратно на узел, который, в свою очередь, инициирует запрос.

Продолжение табл.2

Протоколы маршрутизации	Преимущества	Недостатки	Масштабируемость	Мобильность	Надежность	Используемая метрика	QoS
PEGASIS	Расстояние передачи для большей части узлов уменьшается	Не рассматривается положение базовой станции относительно энергии узлов, когда один из узлов выбран в качестве главного узла	Хорошая	Фиксированная базовая станция	Хорошая	Выбор маршрута экономии	Нет
TEEN & APTEEN	Протокол хорошо работает в таких условиях, как резкие изменения чувствительных свойств, таких как температура	Большое потребление энергии и дополнительные расходы в случае большой сети	Хорошая	Фиксированная базовая станция	Ограниченная	Лучший маршрут	Нет
VGA	Протокол может обеспечить энергоэффективность и максимизацию срока службы сети	Проблема оптимального выбора локальных узлов в качестве главного узла	Хорошая	Нет	Хорошая	Выбор маршрута экономии	Нет
TTDD	Протокол может использоваться для множества мобильных узлов в области стационарных сенсорных узлов	Исходный узел создает виртуальную грид-структуру точек распространения для предоставления данных мобильным приемникам	Низкая	Нет	Хорошая	Выбор маршрута экономии	Нет
BCDCP	Протокол обеспечивает низкое потребление энергии	Усиление производительности уменьшается по мере того, как область поля маршрута датчика становится маленькой	Ограниченная	Нет	Ограниченная	Лучший маршрут	Нет
ММО	Протокол обеспечивает энергосбережение и поддерживает уровень QoS	Использование протокола может привести к субоптимальным результатам системы	Хорошая	Нет	Ограниченная	Биты данных, собранные несколькими исходными узлами, будут передаваться удаленному приемнику несколькими пересылками	Нет
HPAR	Протокол учитывает как мощность передачи, так и минимальную мощность батареи узла на пути. Кроме того, он использует зоны, чтобы обслуживать большое количество узлов	Обнаружение оценки мощности может привести к непроизводительным издержкам в сети	Низкая	Нет	Хорошая	Сначала он выбирает кратчайший путь, а затем пытается оптимизировать его на основе общего потребления энергии	Нет
GBDD	Это обеспечивает непрерывную передачу данных от исходных узлов к приемнику	Он потребляет больше энергии, когда скорость очень высока	Хорошая	Ограниченная	Хорошая	Если присутствует допустимая сетка, приемник обнаруживает ближайший угловой узел	Нет
ELCH	Протокол может минимизировать энергию передачи, а сеть может быть более сбалансированной с точки зрения энергоэффективности	Если количество членов каждого кластера среды превышает определенную величину, это негативно скажется на работе сети	Ограниченная	Фиксированная базовая станция	Хорошая	Он выбирает в узле с максимальной оставшейся мощностью	Нет
NHRPA	Протокол обеспечивает низкое потребление энергии	Задержка пакетов	Хорошая	Фиксированная базовая станция	Хорошая	Лучший маршрут	Нет
SHPER	Протокол обеспечивает энергетический баланс сети	Протокол не поддерживает мобильность	Хорошая	Фиксированная базовая станция	Хорошая	Лучший маршрут	Нет
DHAC	Протокол обеспечивает более длительный срок службы сети	Производительность хуже чем в других протоколах	Хорошая	Нет	Ограниченная	Лучший маршрут	Нет

Таблица 3. Протоколы маршрутизации на основе запросов

Протоколы маршрутизации	Преимущества	Недостатки	Масштабируемость	Мобильность	Надежность	Используемая метрика
Directed Diffusion	Протокол продлевает срок службы сети	Протокол не может использоваться для непрерывной доставки данных или приложений	Хорошая	Ограниченная	Низкая	Лучший маршрут
COUGAR	Протокол обеспечивает энергоэффективность, когда генерируемые данные огромны	Большие расходы, сложность синхронизации при вычислении сетевых данных	Ограниченная	Нет	Низкая	Лучший маршрут
ACQUIRE	Протокол идеально подходит для одноразовых и сложных запросов для ответов, которые могут предоставляться многими	Лавинная рассылка пакетов	Ограниченная	Ограниченная	Низкая	Кратчайший путь

В табл. 3 представлено сравнение протоколов маршрутизации на основе запросов. Протоколы DD и COUGAR могут поддерживать ограниченную мобильность узлов и выбирают путь с меньшим потреблением энергии, тогда как ACQUIRE выбирает кратчайший путь, чтобы минимизировать потребление энергии. Протокол DD более масштабируемый, чем COUGAR и ACQUIRE.

2. Протоколы на основе согласования (табл. 4): используют переговоры с метаданными для сокращения избыточности передач в сети.

Таблица 4. Протоколы маршрутизации на основе согласования

Протоколы маршрутизации	Преимущества	Недостатки	Масштабируемость	Мобильность	Надежность	Используемая метрика	QoS
SPIN-PP	Простота, избегание имплозии и минимальная стоимость запуска	Протокол не гарантирует доставку данных и потребляет ненужную мощность	Хорошая	Да	Хорошая	Каждый узел отправляет данные своим соседям ближайшим соседям	Нет
SPIN-EC	Когда энергия приближается к нижнему пороговому значению, протокол приспосабливается за счет снижения своего участия	Протокол не мешает узлам получать сообщения, такие как ADV или REQ, когда энергия ниже порогового значения	Хорошая	Да	Хорошая	Каждый узел отправляет данные своим соседям ближайшим соседям	Нет
SPIN-BC	Протокол лучше, чем SPIN-PP для широкополосных сетей, так как использует связи «один ко многим»	Протокол должен ждать некоторое время перед отправкой сообщения REQ	Хорошая	Да	Хорошая	Каждый узел отправляет данные своим соседям ближайшим соседям	Нет
SPIN-RL	Протокол распространяет данные через широкополосную передачу даже в тех случаях, когда сеть теряет пакеты или связь является асимметричной	Большое времяпотребление	Хорошая	Да	Хорошая	Каждый узел отправляет данные своим соседям ближайшим соседям	Нет

В табл. 4 представлено сравнение схем маршрутизации на основе согласования. Протоколы SPIN-PP, SPIN-EC, SPIN-BC и SPIN-RL поддерживают мобильность узлов. Следует отметить, что все эти протоколы взаимодействуют со своими соседями только в том случае, если у них есть данные для отправки, сводя к минимуму затраты энергии на периодические сообщения. Протоколы SPIN-PP, SPIN-EC, SPIN-BC и SPIN-RL являются масштабируемыми и надежными и их производительность не зависит от размера сети.

3. Когерентные и некогерентные протоколы (табл. 5): при последовательной маршрутизации данные пересылаются узлом после минимальной обработки. В некогерентной маршрутизации обработка данных происходит на узлах, которые локально обрабатывают необработанные данные до их отправки другим узлам для дальнейшей обработки.

Таблица 5. Когерентные и некогерентные протоколы маршрутизации

Протоколы маршрутизации	Преимущества	Недостатки	Масштабируемость	Мобильность	Надежность	Используемая метрика	QoS
SWE	Протокол создает связующее дерево с минимальным переходом	Это сложный протокол	Хорошая	Нет	Низкая	Лучший маршрут	Нет
MWE	Каждый датчик в сети имеет набор путей с минимальной энергией для каждого узла-источника	Длительная задержка и низкая масштабируемость	Низкая	Нет	Низкая	Кратчайший путь	Нет

В табл. 5 приведено сравнение когерентных и некогерентных протоколов маршрутизации. Протокол SWE является более масштабируемым, чем MWE, который вычисляет набор маршрутов с минимальной энергией для каждого узла.

Протоколы, основанные на топологии сети

Протоколы на основе топологии используют принцип, согласно которому каждый узел в сети поддерживает информацию о топологии. Протоколы этого класса могут быть классифицированы следующим образом:

1. Протоколы на основе мобильного агента (табл. 6): протоколы мобильных агентов используются для маршрутизации данных из области, к которой осуществляется опрос, к месту назначения. Протоколы мобильных агентов могут обеспечить сети дополнительную гибкость, а также новые возможности, которые основаны на вычислительной модели клиент-сервер.

Таблица 6. Протоколы маршрутизации на основе мобильного агента

Протоколы маршрутизации	Преимущества	Недостатки	Масштабируемость	Мобильность	Надежность	Используемая метрика	QoS
MPR	Протокол может потреблять меньше энергии при большом количестве узлов сети	Высокая задержка	Ограниченная	Хорошая	Хорошая	Пути, которые минимизируют общее энергопотребление	Нет
IEMF/IEMA	Этот протокол направлен на оптимизацию оставшегося маршрута до определенной степени	Протокол не поддается масштабированию при большом количестве узлов-источников, которые необходимо посетить	Ограниченная	Хорошая	Хорошая	Пути, которые минимизируют общее энергопотребление	Нет

В табл. 6 представлено сравнение протоколов маршрутизации на основе мобильного агента. В этой таблице выявлено, что протокол IEMF/IEMA имеет ограниченную масштабируемость, а его производительность снижается по мере увеличения числа узлов. Протокол MPR потребляет меньше энергии по мере увеличения количества узлов в сети.

2. Протоколы на основе местоположения (табл. 7): используют информацию о местоположении, чтобы ретранслировать полученные данные только в определенные места. Протоколы этого класса могут находить путь от источника до пункта назначения и минимизировать потребление энергии сенсорными узлами. Они имеют ограниченную масштабируемость тогда, когда узлы мобильны. Также узел должен знать или узнавать местоположения других узлов.

Таблица 7. Протоколы маршрутизации на основе местоположения

Протоколы маршрутизации	Преимущества	Недостатки	Масштабируемость	Мобильность	Надежность	Используемая метрика	QoS
DREAM	Эффективная передача пакетов данных	Трата пропускной способности сети	Ограниченная	Хорошая	Ограниченная	Пути, которые минимизируют общее энергопотребление	Нет
GEM	Протокол позволяет эффективно маршрутизировать сообщения по сети, в то время как каждому узлу нужно только знать метки своих соседей	Протокол перегружает узлы, находящиеся на низком уровне дерева	Хорошая	Ограниченная	Хорошая	Кратчайший путь	Нет
IGF	Надежная производительность, распределение рабочей нагрузки	Протокол зависит от последних местных таблиц маршрутов соседей	Ограниченная	Хорошая	Хорошая	Лучший маршрут	Нет
SELAR	Протокол выбирает узел с самым высоким уровнем энергии, чтобы обеспечить равномерное рассеяние энергии	Протокол плохо работает в случае, если сеть постоянно меняет узлы	Ограниченная	Ограниченная	Хорошая	Маршрут, на котором узлы имеют самую высокую мощность	Нет
GDSTR	Протокол находит кратчайшие маршруты и генерирует низкий трафик обслуживания	Накладные расходы на сеть	Ограниченная	Нет	Хорошая	Кратчайший путь	Нет
MERR	Протокол равномерно распределяет потребление энергии датчиков к сетевым датчикам	Протокол расходует энергию в случае, если узлы находятся рядом друг с другом	Ограниченная	Низкая	Хорошая	Пути, которые минимизируют общее энергопотребление	Нет
OGF	Протокол демонстрирует превосходную производительность с точки зрения энергопотребления, масштабируемости и обработки пустот	Протокол зависит от последних местных таблиц маршрутов соседей	Хорошая	Ограниченная	Хорошая	Лучший маршрут	Нет
PAGER-M	Протокол обеспечивает высокий коэффициент доставки, низкие затраты на маршрутизацию и низкое потребление энергии	Протокол маршрутизации, основанный на местоположении	Хорошая	Хорошая	Хорошая	Самый короткий путь с использованием жадного алгоритма	Нет
HGR	Протокол сочетает стратегию на основе расстояния и направления в гибкой манере	Протокол не гарантирует задержку	Хорошая	Хорошая	Хорошая	Пути, которые минимизируют общую мощность	Нет
GEAR	Протокол пытается сбалансировать потребление энергии и тем самым увеличивает время жизни сети	Обмен периодической таблицы	Ограниченная	Хорошая	Ограниченная	Лучший маршрут	Нет

В табл. 7 представлено сравнение протоколов маршрутизации на основе местоположения. Протоколы DREAM, IGF, PAGER-M и HGR могут поддерживать мобильность узлов, и могут поддерживать потребление энергии узлами на низких уровнях. Протоколы GEM и GDSTR пытаются минимизировать энергопотребление узлов путем выбора кратчайшего пути для маршрутизации информации. Протоколы GEM, IGF, MERR, OGF и HGR, не используют периодические hello-сообщения, чтобы минимизировать потребление энергии. Протоколы GEM, OGF, PAGER-M и HGR более масштабируемы, чем другие протоколы этого класса.

Протоколы маршрутизации, основанные на надежности сети

Протоколы, относящиеся к этому классу, более устойчивы к ошибкам маршрутизации с помощью балансировки нагрузки маршрутов или же путем удовлетворения определенных показателей QoS, таких как задержка, потребление энергии и пропускная способность. Узлы сети могут пострадать от энергетических расходов на поддержание таблиц маршрутизации и показателей QoS на каждом сенсорном узле. Протоколы классифицируются следующим образом:

1. Протоколы на основе множественности путей (табл. 8): они обеспечивают балансировку нагрузки и более устойчивы к ошибкам маршрутизации.

Таблица 8. Протоколы маршрутизации на основе множественности путей

Протоколы маршрутизации	Преимущества	Недостатки	Масштабируемость	Мобильность	Надежность	Используемая метрика	QoS
ROAM	Протокол может информировать маршрутизаторы, когда адресат недоступен, и запрещает маршрутизаторам отправлять ненужные поисковые пакеты	Протокол должен отправлять сообщения Hello для поддержания активных узлов	Ограниченная	Ограниченная	Ограниченная	Любой путь	Нет
LMR	Информационная метка может уменьшить задержку установки маршрутизации и задержку резервного копирования	У протокола могут быть затрачены ненужные расходы, на поиск возможных альтернативных путей	Хорошая	Хорошая	Хорошая	Любой путь	Нет
GRAB	Протокол опирается на коллективные усилия нескольких узлов для доставки данных	Протокол может привести к непроизводительным расходам за счет отправки избыточных данных	Хорошая	Хорошая	Хорошая	Набор непересекающихся путей, которые удовлетворяют требованию QoS	Нет
HMRP	Масштабируемость, простота и долгий срок службы системы	Протокол передает пакет построения сети	Хорошая	Низкая	Ограниченная	Любой путь	Нет
GBMPR	Простота и низкий уровень помех	Могут возникать проблемы со стыковкой путей	Ограниченная	Низкая	Ограниченная	Лучший маршрут	Нет
DGR	Этот протокол очень интересное решение проблемы потокового видео в реальном времени	Протокол оптимизирован только для видео-трафика	Высокая	Нет	Высокая	Пути с прямыми соседями	Нет
DCF	Протокол обеспечивает компромисс между многопутевым сближением и многопутевым распространением	Протокол выбирает один исходный узел в качестве источника на одну передачу	Высокая	Высокая	Хорошая	Лучший маршрут	Нет
RPL	Низкое потребление энергии	Протокол поддерживает только одноадресный трафик	Хорошая	Хорошая	Хорошая	Кратчайший путь	Нет

В табл. 8 представлено сравнение протоколов маршрутизации на основе множественных путей. Как показано в таблице 8, протоколы LMR, HMRP, DGR и DCF не используют периодические hello-сообщения, чтобы минимизировать потребление энергии. Протокол DGR не поддерживает мобильность узлов, а протоколы ROAM, HMRP и GBMPR лучше работают в случае, если узлы не мобильны. Протоколы LMR, GRAB, HMRP, DGR, DCF и RPL являются более масштабируемыми, чем другие протоколы этого класса.

2. Протоколы на основе QoS (табл. 9): сеть должна балансировать между потреблением энергии и качеством данных. Всякий раз, когда приемник запрашивает данные от зондов в сети, передача должна соответствовать определенному уровню качества.

Таблица 9. Протоколы маршрутизации на основе QoS

Протоколы маршрутизации	Преимущества	Недостатки	Масштабируемость	Мобильность	Надежность	Используемая метрика	QoS
SAR	Низкое энергопотребление. Протокол поддерживает несколько путей к месту назначения	Большие расходы на поддержание таблиц и состояний на каждом узле, особенно когда число узлов огромно	Ограниченная	Нет	Низкая	Путь, который минимизирует средневзвешенную метрику QoS в течение всего срока службы сети	Да
SPEED	Протокол хорошо работает с точки зрения сквозной задержки и коэффициента пропуска	Протокол плохо работает при сильной нагрузке	Ограниченная	Нет	Низкая	Путь, который является недетерминированным	Да
MMSPEED	Протокол может обеспечивать дифференциацию QoS в областях надежности и своевременности и значительно улучшает эффективную пропускную способность сенсорной сети	В сетях с высокой нагрузкой протокол не может удовлетворять требованиям к задержке	Ограниченная	Нет	Низкая	Путь, который является недетерминированным	Да
MGR	Протокол минимизирует потребление энергии и удовлетворяет ограничениям средней задержки	Протокол рассматривает гарантированную задержку, как цель с высшим приоритетом	Хорошая	Хорошая	Низкая	Путь, который минимизирует задержку	Да

В табл. 9 представлено сравнение протоколов маршрутизации на основе QoS. Протоколы SAR, SPEED и MMSPEED могут обеспечить энергосберегающую маршрутизацию с гарантированным качеством обслуживания, учитывая, что узлы не мобильны. Протокол MGR более масштабируемый, чем другие протоколы, поскольку он использует мобильность узлов.

Выводы

В данной работе выделены важнейшие показатели протоколов маршрутизации в Ad-hoc сетях такие как масштабируемость, мобильность, метрика маршрута, надежность и поддержка QoS. Помимо этого, в результате исследований существующих протоколов маршрутизации в Ad-hoc сетях выявлено, что протоколы маршрутизации можно классифицировать по четырем характеристикам и разделить на четыре класса: структура сети, модель связи, топология и надежность маршрутизации. В соответствии с этими показателями в работе выполнена классификация протоколов маршрутизации. Протоколы маршрутизации, относящиеся к первому классу, классифицированы как протоколы с плоской структурой или протоколы с иерархической структурой сети. Протоколы маршрутизации, относящиеся ко второму классу, классифицированы как основанные на запросе, когерентные и некогерентные, основанные на согласовании. Протоколы маршрутизации, относящиеся к третьему классу, классифицированы как основанные на местоположении или мобильные агенты. Протоколы маршрутизации, относящиеся к четвертому классу, классифицированы как основанные на QoS или на основе множественности путей. Полученные таблицы позволят проектировщикам сетей использовать те протоколы, которые соответствуют критериям маршрутизации в Ad-hoc сетях.

Список используемой литературы

1. M. C. Aye and A. M. Aung, "Energy Efficient Multipath Routing for Mobile Ad Hoc Networks", International Journal of Information Technology, Modeling and Computing, Vol. 2, No. 3, pp. 11-18, 2014.
2. V. N. Talooki, H. marques, and J. Rodriguez, "Energy efficient dynamic MANET on-demand (E2DYMO) routing protocol", IEEE conference of Mobile and Multimedia Networks, pp. 1-5, 2013.
3. Shilpa jain and Sourabh jain, "Energy Efficient Maximum Lifetime Ad-Hoc Routing (EEMLAR)", international Journal of Computer Networks and Wireless Communications, Vol.2, Issue 4, pp. 450-455, 2012.
4. Yahya B., Ben-Othman J. REER: Robust and Energy Efficient Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks. Global Telecommunications Conference. 2009. P. 1–7.

5. Banimelhem O., Khasawneh D. GMCAR: Grid based multipath with congestion avoidance routing protocol in wireless sensor network. Ad Hoc Networks, 2012, vol. 10 (7), pp. 1346–1361.
6. G. Anastasi, M. Conti, M. Francesco, A. Passarella, “Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: A survey,” Ad Hoc Networks, 2009, Vol. 7, Issue 3, pp. 537-568.
7. R. V. Biradar, V. C. Patil, S. R. Sawant, R. R. Mudholkar, “Classification and Comparison of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks,” Special Issue on Ubiquitous Computing Security Systems, 2009, Vol. 4, Issue 2, pp. 704-711.
8. A. Braman and Umapathi G.R, “A Comparative Study on Advances in LEACH Routing Protocol for Wireless Sensor Networks: A survey,” International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering (IJARCCE), vol. 3, issue 2, pp. 5683-5690, February 2014.
9. S. R. Inamdar and R. M. Yadahalli, "Paradigm Shift in Routing Approaches for High Speed MANET Applications," European Journal of Engineering Research and Science, vol. 2, 2017.
10. C. Nallusamy, A. Sabari and V. Karthick, “Energy Aware and Bandwidth Optimized AODV Routing for Efficient Traffic Control in Mobile AD HOC Networks”, Middle-East Journal of Scientific Research 24 , ISSN 1990-9233 , 2016, pp. 53-58
11. M. Chen, L. Yang, T. Kwon, L. Zhou, M. Jo, “Itinerary Planning for Energy-efficient Agent Communication in Wireless Sensor Networks,” IEEE Trans. Veh. Technol., 2011, Vol. 60, Issue 7, pp. 1-8.
12. Jiang, D., Ying, X., Han, Y. et al. Wireless Pers Commun (2016) 86: 901. doi:10.1007/s11277-015-2961-6; “Collaborative Multi-hop Routing in Cognitive Wireless Networks”; January 2016, Volume 86, Issue 2, pp. 901– 923
13. Lan Bing., li, Bingbing., li, Xiang.; “Energy efficient routing protocol of wireless sensor network”, paper published in “COMPUTER MODELLING & NEW TECHNOLOGIES 2014 18(12B) 580-584”, Xidian University, Shanxi, Xi'an, 710071, China.

Автори статті

Козак Юлія Сергіївна - аспірантка кафедри комп'ютерної інженерії, Одеської національної академії харчових технологій. Телефон: +38 063 119 36 40, E-mail: flyger11@bigmir.net

Author of the article

Kazak Yuliya Sergeevna – post-graduate student of the Computer Engineering department, Odesa National Academy of Food Technologies, Tel. +38 063 119 36 40, E-mail: flyger11@bigmir.net

Дата надходження в редакцію: 24.04.2017 р.

Рецензент: д.т.н., проф. В.В. Вишнівський