

УДК 681.3.

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/112/14>

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ МАРШРУТИЗАЦИЙ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ СЕТЕЙ

©*Абдыраева Н. Р.*, ORCID: 0000-0001-2345-6789, SPIN-код: 1576-7528, канд. техн. наук,
Ошский технологический университет, г. Ош, Кыргызстан, nabdyraeva80@mail.ru

©*Каюмов У.*, Ошский технологический университет,
г. Ош, Кыргызстан, Ulan.kayumov.88@mail.ru

©*Доценко А. А.*, Ошский технологический университет,
г. Ош, Кыргызстан, Alexandrdocenka97@gmail.com

ANALYSIS OF ROUTING FEATURES OF SELF-ORGANIZING NETWORKS

©*Abdyraeva N.*, ORCID: 0000-0001-2345-6789, SPIN-code: 1576-7528, Ph.D.,
Osh Technological University, Osh, Kyrgyzstan, nabdyraeva80@mail.ru

©*Kayumov U.*, Osh Technological University, Osh, Kyrgyzstan, Ulan.kayumov.88@mail.ru

©*Dotsenko A.*, Osh Technological University, Osh, Kyrgyzstan, Alexandrdocenka97@gmail.com

Аннотация. Выполнен обзор и анализ текущего состояния и перспектив развития самоорганизующихся сетей. Особое внимание уделено характеристикам протоколов маршрутизации в самоорганизующихся сетях. Рассмотрены задачи, которые решаются в процессе самоконфигурации, самооптимизации и самовосстановления коммуникационных сетей. Проведено сравнение различных технологий доступа по максимально доступной пропускной способности, таких как IEEE 802.15.1 (Bluetooth), IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.15.4 (ZigBee) и других. В результате анализа выявлены основные проблемы маршрутизации в самоорганизующихся сетях, требующие решения.

Abstract. Overview and analysis of the current state and development prospects of self-organizing networks. Particular attention is paid to the characteristics of routing protocols in self-organizing networks. The problems that are solved in the process of self-configuration, self-optimization and self-healing of communication networks are considered. A comparison of various access technologies by the maximum available bandwidth, such as IEEE 802.15.1 (Bluetooth), IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.15.4 (ZigBee) and others, is carried out. As a result of the analysis, the main routing problems in self-organizing networks that require solutions are identified.

Ключевые слова: самоорганизующиеся сети, маршрутизация, беспроводные сети, управление сетью.

Keywords: self-organizing networks, routing, wireless networks, network management.

В настоящее время фиксируется рост числа мобильных устройств, которое превысит 10 миллиардов. В этой связи беспроводные технологии, основанные на принципах самоорганизации, становятся особенно актуальными для создания сетей. Под самоорганизацией подразумевается процесс упорядочивания элементов одного уровня в системе благодаря внутренним факторам, без необходимости внешнего специфического

воздействия [2]. Таким образом, самоорганизующиеся сети — это сети, которые не нуждаются в какой-либо дополнительной инфраструктуре, помимо самих узлов [3]. В таких сетях отсутствует единый центр управления узлами, и после подключения узла к сети осуществляется его автоматическая настройка. В данном случае все узлы выполняют функции управления сетью. Использование самоорганизующихся сетей предоставляет возможность передачи данных на большие расстояния без увеличения мощности передатчика и необходимости в заранее установленной инфраструктуре. Кроме того, такая сеть устойчива к изменениям в топологии и отличается простотой и высокой скоростью развертывания [4, 5].

На сегодняшний день самоорганизующиеся сети можно классифицировать на Mesh (ячеистые), ad-hoc сети и беспроводные сенсорные сети (WSN) и другие [5, 6]. Для создания таких сетей могут быть использованы уже существующие мобильные устройства. Для организации самоорганизующейся сети чаще всего применяются протоколы Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee, а для маршрутизации — AODV, SAODV, ZRP, OLSR, LAR. Таким образом, самоорганизующиеся сети представляют собой сети, которые не нуждаются в дополнительной инфраструктуре, кроме самих узлов. В таких сетях отсутствует единый центр управления, и после подключения узла к сети происходит его автоматическая настройка. В этом контексте все узлы берут на себя функции управления сетью.

Применение самоорганизующихся сетей позволяет передавать данные на большие расстояния без увеличения мощности передатчика и необходимости в заранее установленной инфраструктуре. Кроме того, такая сеть устойчива к изменениям в топологии и отличается простотой и высокой скоростью развертывания. На сегодняшний день самоорганизующиеся сети можно классифицировать на Mesh (ячеистые), ad-hoc сети и беспроводные сенсорные сети (WSN) и другие. Для создания таких сетей могут быть использованы уже существующие мобильные устройства. Для организации самоорганизующейся сети чаще всего применяются протоколы Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee, а для маршрутизации — AODV, SAODV, ZRP, OLSR, LAR. В связи с этим перспективными представляются исследования и разработка новых подходов к созданию самоорганизующихся сетей. Самоорганизующаяся система функционирует без явного управления со стороны внешней среды, рассеивание энергии в неустойчивых состояниях при отсутствии внешних возмущений, переходы системы в определенные стабильные состояния и так далее. В настоящее время известно множество способов применения методов самоорганизации в беспроводных сетях; достаточно подробно изучены протоколы маршрутизации на основе самоорганизации мультиагентных систем в сетях MANET (Mobile Ad hoc Networks). В связи с динамическими изменениями набора сетевых узлов и топологии традиционные методы маршрутизации плохо применимы, так как изменяющаяся топология требует постоянного обновления данных в таблицах маршрутизации. Самоорганизующуюся сеть Self-Organizing Network (SON) можно определить как адаптивную и автономную сеть, которая является масштабируемой, стабильной и достаточно гибкой для достижения желаемых целей. Понятие SON в мобильных сетях можно разделить на 3 основные категории: самоконфигурация (Self-Configuration), самооптимизация (Self-Optimisation) и самовосстановление (Self-Healing), которые обычно обозначаются совместно как функции Self-x [1].

Поскольку любая сеть не может быть абсолютно совершенной, могут возникнуть неожиданные отказы и сбои, и в сотовых сетях это не исключение. При возникновении неполадок или сбоев по разным причинам активируются механизмы самовосстановления. Эти механизмы должны уметь не только выявлять себя, но и анализировать их, а также запускать соответствующие процессы для ограничения неполадок, чтобы сеть могла

вернуться к нормальной работе. В сотовых сетях самовосстановление отвечает за выявление неполадок, их классификацию неисправностей и управление компенсацией неисправностей. Существующему методу самооптимизации сотовых сетей не хватает гибкости и адаптивности, чтобы стать реальными решениями для сетей LTE и 5G [7]. Хотя операторы сотовой связи собирают большое количество данных, включая сетевые измерения, связи по контролю и управлению, а также информацию от пользователей, современные методы настройки и оптимизации сети остаются довольно примитивными. Очевидно, что для полного использования уже имеющихся данных и предоставления гибких и адаптируемых решений для сетей необходимо использовать более интеллектуальные подходы. В SON применяются методы машинного обучения (ML) для анализа различных данных, собираемых операторами.

Процесс формирования топологий самоорганизующихся сетей и их особенности.

Ячеистые сети являются наиболее часто встречающимся типом самоорганизующихся сетей. Они часто создаются с использованием технологий беспроводного доступа, таких как Wi-Fi и Bluetooth. Одной из отличительных характеристик ячеистых сетей является их структура радиосети, состоящая из взаимосвязанных узлов, образующих ячеистую сеть. Кроме того, эти сети содержат беспроводные маршрутизаторы, которые создают беспроводную магистраль и зону обслуживания для абонентов и абонентов мобильной/стационарной связи, которые могут подключиться к одному из маршрутизаторов в пределах их зоны видимости. Структура этих ячеистых сетей представляет собой звезду со случайным расположением опорных узлов [3, 4].

Самоорганизующиеся ad-hoc сети — это беспроводные сети, в которых абоненты случайным образом переключаются между собой без необходимости использования базовых станций или опорных узлов и полагаются на децентрализованное управление. Структура такой сети предопределена случайным расположением узлов. Однако в мобильных ad-hoc сетях (MANET) основными отличительными характеристиками являются динамический характер топологии сети и случайное соединение узлов. Беспроводные сенсорные сети в основном используются в качестве сетей телеметрии. Эти сети состоят из малогабаритных сенсорных узлов, их основная функция - сбор, анализ и отправка телеметрических данных по радиоканалу[1].

Следует отметить, что независимо от типа самоорганизующейся сети и ее назначения, такие сети часто характеризуются динамически изменяющейся топологией сети, ограниченными характеристиками узлов, такими как мощность передатчика, заряд батареи и другие параметры. Самоорганизующиеся сети обладают различными размерами, различной мощностью передачи и мобильностью, ограниченной безопасностью и другими факторами [3]. Следовательно, при развертывании этих сетей крайне важно учитывать влияние этих особенностей на каждом этапе их построения.

Разработка самоорганизующихся сетей предполагает ключевую задачу — создание их топологии: установление физических взаимодействий между узлами. Кроме этого, важным этапом становится управление данной структурой и отдельными её компонентами. Особенно важен учёт распределения узлов в пространстве при формировании таких систем. В контексте беспроводных сетей стандарты обеспечивают разнообразные механизмы для отслеживания местоположения как самого устройства, так и его соседних узлов [2]. Основными подходами к определению позиций в самоорганизующихся сетях являются геолокационные методы на основе реального расположения узлов. Также популярны системы с использованием виртуальных координат и триангуляции. Дополнительным инструментом служат алгоритмы, базирующиеся на характеристиках радиосигналов: уровне

RSSI (Received Signal Strength Indicator), времени задержки ToA (Time of Arrival) и других параметров [2-4].

Одновременно применяя множественные методы геолокации — такие как системы с виртуальными координатами, триангуляцию, анализ RSSI, ToA и других параметров радиосигнала [6] удаётся существенно повысить точность определения местоположения каждого узла в самоорганизующихся сетях. Исходя из этих данных строится уникальная топологическая структура сети. Управление такими системами обладает специфическими чертами и кардинально отличается от традиционных инфраструктурных сетей. Во-первых, управление сетью должно распределяться между всеми узлами сети и быть полностью децентрализовано. Во-вторых, выработку решений для управления узлом и сетью в целом необходимо осуществлять оперативно и в жестких временных рамках [5].

Управление в самоорганизующихся сетях имеет ряд особенностей и существенно отличается от управления в инфраструктурных сетях. Управлять узлом в самоорганизующейся сети можно, используя следующие принципы: адаптивность, функциональность, распределённость, координацию взаимодействия, иерархию и автоматизацию процесса принятия решений. Вместе с тем, механизм управления сетью должен обеспечивать контроль узлов и сбор информации о состоянии сети и ее смежных узлов, а также осуществлять выработку решений по изменению топологии сети, маршрутизации и т.д. Необходимо учитывать, что при решении задач управления сетью важную роль играют управляемые параметры физического, канального и сетевого уровней. Это могут быть мощность передатчика, скорость передачи данных, вид модуляции и другие характеристики. Также необходимо принимать во внимание ряд неуправляемых параметров: динамику изменения топологии сети и ее размерность. В целях управления топологией сети существует множество различных алгоритмов. Кроме того, существующие стратегии и способы управления топологией сети имеют возможность быть однородными или неоднородными. Под однородным управлением топологией в самоорганизующихся сетях понимают управление узлами, имеющими одинаковую мощность передатчиков и установленный радиус действия. В случае неоднородных методов управления топологией предполагается, что узлы способны управлять различными характеристиками на разных уровнях модели OSI [1].

Выделяют также централизованные и децентрализованные алгоритмы неоднородного управления топологией сети. Децентрализованные методы, в свою очередь, можно классифицировать на геометрические, которые основываются на информации о размещении узлов в пространстве, и графовые, где узлы располагают лишь сведениями о своих соседях. Наиболее распространенными из таких методов являются графовые алгоритмы, такие как LMST, DLSS, FLSS. В связи со сложностью управления мобильными узлами в самоорганизующихся сетях всё большее внимание привлекают методы управления, основанные на теории игр, которые рассмотрены в работах и некоторых других источниках. На основе анализа можно заключить, что подходы к созданию самоорганизующихся сетей значительно отличаются от методов, применяемых в инфраструктурных сетях. В частности, процесс поиска и установления связей с соседними узлами в таких сетях имеет свои особенности из-за динамичного поведения узлов. Кроме того, для управления сформированной топологией существует множество подходов, которые успешно применяются при реализации протоколов маршрутизации в самоорганизующихся сетях. При этом выбор алгоритмов будет зависеть от выбранной технологии доступа.

С учетом усложнений в управлении мобильными узлами в самоорганизующихся сетях, методы управления, основанные на теории игр, становятся всё более актуальными, чему

способствует ряд исследований [4,5] и другие публикации. Анализ показывает, что стратегии, применяемые для создания самоорганизующихся сетей, существенно отличаются от тех, что используются в инфраструктурных сетях. В частности, процесс поиска и установления связи с соседними узлами в таких сетях имеет свои уникальные особенности из-за изменчивости поведения узлов. Более того, существует множество методов для управления уже сформировавшейся топологией, которые успешно применяются при реализации протоколов маршрутизации в самоорганизующихся сетях. В этой связи выбор алгоритмов будет определяться используемой технологией доступа.

Обзор и анализ технологий доступа для создания беспроводных самоорганизующихся сетей. Как уже упоминалось, процесс формирования физической топологии самоорганизующейся сети часто зависит от используемых технологий доступа к среде. Большинство современных самоорганизующихся сетей основываются на уже имеющихся технологиях беспроводного доступа, таких как IEEE 802.15.1 (Bluetooth), IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.15.4 (ZigBee) и других, в зависимости от назначения сети [3-5].

На Рисунке показано сравнение некоторых технологий доступа по максимальной доступной пропускной способности [6].

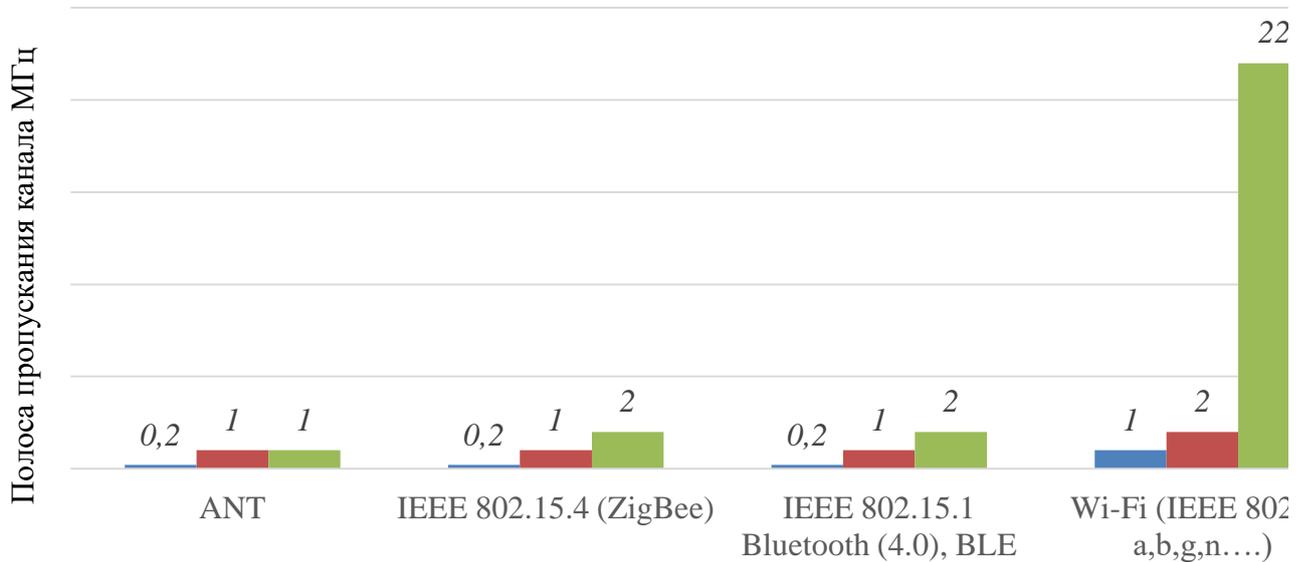


Рисунок. Максимально доступная полоса пропускания технологий беспроводного доступа

Анализируя график на Рисунке, можно заметить, что стандарт Wi-Fi обладает высокой пропускной способностью. При этом увеличение полосы пропускания приводит к повышенному потреблению энергии устройствами, которые применяются в самоорганизующихся сетях [5]. В ходе исследования технологий доступа было установлено, что беспроводные технологии, такие как Wi-Fi, Bluetooth и IEEE 802.15.4 (ZigBee), чаще всего используются в самоорганизующихся сетях. При выборе фундаментальной технологии важно учитывать предназначение сети (Mesh, MANET, WSN), задачи, которые будут решаться, а также преимущества и недостатки каждой из технологий. В настоящее время для самоорганизующихся сетей, основанных на рассмотренных технологиях доступа, ключевыми остаются задачи по формированию топологии сети, межузловому управлению и маршрутизации.

Обзор и анализ протоколов маршрутизации в самоорганизующихся сетях. Алгоритмы маршрутизации в самоорганизующихся сетях делятся на три категории: *Проактивная маршрутизация* – наличие постоянно обновляемых полных списков адресов назначения и

маршрутов до них. *Реактивная маршрутизация* осуществляется по мере необходимости, т.е. когда появляется трафик для конкретного адресата, с использованием запросов к соседним узлам и методов обнаружения соседей. *Гибридная маршрутизация* — сочетание элементов проактивной и реактивной маршрутизации. Т.е. хранение таблицы некоторых адресатов, и последующий их опрос по требованию по мере необходимости построения иных маршрутов. Важную функцию в функционировании самоорганизующихся сетей выполняют методы управления и, в частности задачам маршрутизации. Маршрутизация — это процесс определения наиболее эффективного маршрута доставки пакета к месту назначения. Комплекс мер по решению задач маршрутизации содержится в протоколах маршрутизации, которые затем реализуются в функционировании реальных телекоммуникационных систем. Используя одно устройство, сеть может одновременно поддерживать несколько протоколов маршрутизации. *Протокол маршрутизации* — это сетевой протокол, который маршрутизаторы используют для определения потенциальных путей передачи данных через сеть [4].

Следует отметить, что правила протоколов маршрутизации в самоорганизующихся сетях отличаются от правил в инфраструктурных сетях, хотя алгоритмы, используемые для поиска маршрутов, часто схожи. Это связано с тем, что самоорганизующиеся сети претерпевают динамические изменения, включая сдвиги положения узлов и их атрибутов. Это связано с динамическими изменениями в самоорганизующейся сети, такими как быстрое изменение местоположения узлов и их характеристик. В связи с этим протоколы маршрутизации, которые используют в инфраструктурных сетях, оказываются неэффективными, а порой и неработоспособными в условиях беспроводных самоорганизующихся сетей. Очевидно, что решение проблемы маршрутизации в таких сетях является важной и актуальной задачей. На выбор протоколов маршрутизации для самоорганизующейся сети обычно влияет технология, используемая для доступа к беспроводной среде, масштаб сети, ее структура и другие важные факторы. Независимо от конкретных алгоритмов маршрутизации, используемых в самоорганизующихся сетях, протоколы маршрутизации должны включать механизмы, обеспечивающие эффективную и надежную связь. Включает в себя механизмы, отвечающие за решение следующих задач: обнаружение соседних станций; оценка качества канала связи между соседними станциями; распространение информации о состоянии сети; выбор маршрутов передачи данных; ретрансляция пакетов по выбранным маршрутам [5].

Кроме того, выдвинут ряд требований для решения вышеперечисленных задач в самоорганизующихся сетях, таких как: малое время построения маршрута, высокая надежность доставки пакетов, минимальный объем служебной информации, отсутствие петель, механизмы оперативного обнаружения и восстановления нарушенных маршрутов, высокая масштабируемость, поддержка необходимого уровня качества обслуживания (QoS) [6]. Важно признать, что по мере дальнейшего развития самоорганизующихся сетей неизбежно возникнут новые требования. Наибольшее распространение в самоорганизующихся сетях получили проактивные (табличные) протоколы маршрутизации. Эти протоколы периодически рассылают в сеть служебные сообщения с информацией обо всех изменениях в ее топологии. В результате каждый узел в сети, основываясь на полученной информации, строит маршруты к остальным узлам и сохраняет их в таблице маршрутизации, откуда они могут быть извлечены при необходимости передачи сообщения конкретному адресату. Основной отличительной чертой проактивных протоколов маршрутизации является выбор алгоритмов, лежащих в их основе. Большинство из них используют алгоритмы Беллмана-Форда с некоторыми модификациями, а также алгоритм

Дейкстры для нахождения наиболее оптимального маршрута. В настоящее время наиболее распространенными проактивными протоколами в самоорганизующихся сетях являются DSDV, OLSR, FSR, WRP, В.А.Т.М.А.Н, Babel и другие. Анализ протоколов показал, что применение проактивной маршрутизации оказывается наиболее эффективным в условиях маломобильных и небольших самоорганизующихся сетей. При возрастании подвижности (динамической топологии) и увеличении числа узлов в сети использование проактивных протоколов приводит к быстрому росту нагрузки сети служебным трафиком и неэффективному расходованию энергетических ресурсов каждого узла, что представляет собой значительный минус при организации крупных, динамичных сетей, таких как мобильные ad-hoc сети (MANET) [1]. Также достаточно популярными являются реактивные (работающие по запросу) протоколы маршрутизации. Они формируют маршруты к конкретным узлам лишь в случае возникновения необходимости передачи информации от узла к узлу. В реактивных протоколах отправляющий узел широковещательно рассылает по сети запрос на получение маршрута, который должен дойти до нужного узла. В ответ на такой запрос узел-получатель отправляет сообщение-подтверждение, из которого отправитель получает информацию о необходимом маршруте и сохраняет его в своей таблице маршрутизации. При повторной передаче данных этому получателю маршрут просто извлекается из таблицы маршрутизации. Если обнаруженный маршрут становится недоступным, инициируется процедура поиска и поддержания маршрута. Наиболее известными реактивными протоколами являются AODV, DSR, DYMO [4].

В отличие от проактивных, реактивные протоколы демонстрируют большую эффективность в условиях динамически изменяющихся сетей, таких как MANET [5], благодаря снижению объема служебной информации, передаваемой по сети, поскольку маршруты ищутся только по мере необходимости. Тем не менее, несмотря на свои преимущества по сравнению с проактивными протоколами, реактивные имеют ряд недостатков, среди которых можно выделить увеличение задержки при поиске первичного маршрута, что связано с высокой подвижностью и большим количеством узлов. Это может привести к неработоспособности в некоторых случаях. Также значительным минусом является необходимость поиска нового маршрута в реальном времени, что существенно ограничивает применение реактивных протоколов для передачи трафика, чувствительного к задержкам, такого как видео или голосовая связь.

Для устранения недостатков проактивной и реактивной маршрутизации в подвижных сетях были разработаны гибридные протоколы, объединяющие механизмы обоих типов. Обычно такие протоколы разбивают сеть на несколько подсетей, внутри которых работает проактивный протокол, а взаимодействие между подсетями осуществляется с использованием реактивных методов маршрутизации. В крупных масштабируемых сетях это позволяет уменьшить размеры таблиц маршрутизации, хранящихся на узлах, поскольку им необходимо знать только маршруты к узлам внутри подсети, к которой они принадлежат. Применение такого подхода в гибридных протоколах способствует снижению объема передаваемой служебной информации по всей сети, так как основная часть передается только внутри подсети. Среди подобных протоколов сейчас наибольшее распространение получили HWMP, ZHLS, ZRP [5, 6].

Таким образом, объединение преимуществ проактивных и реактивных протоколов дает возможность применять гибридные технологии маршрутизации в крупных и динамичных сетях, таких как ad-hoc сети (MANET). В то же время их относительная сложность при реализации, необходимость повышения производительности оборудования (узлов) и снижение эффективности маршрутизации из-за необходимости деления сети на кластеры

являются недостатками. В настоящее время существует множество исследований, посвященных различным протоколам маршрутизации [4-6]. В этих работах предлагаются рекомендации по оптимизации протоколов маршрутизации с целью повышения их эффективности в условиях самоорганизующихся сетей независимо от их размеров и других характеристик. Следовательно, можно заключить, что большинство современных протоколов маршрутизации, используемых в самоорганизующихся сетях, имеют множество недостатков, которые также требуют решения. При этом важно отметить, что выбор конкретного протокола маршрутизации чаще всего зависит от назначения самоорганизующейся сети и предъявляемых к ней требований. Требования к технологиям самоорганизующихся сетей могут варьироваться. Поэтому в небольших и малоподвижных сетях наиболее целесообразно применять проактивные или реактивные протоколы маршрутизации, тогда как в более крупных сетях гибридные протоколы могут оказаться более эффективными.

Анализ проблем самоорганизующихся сетей. Поскольку самоорганизующиеся сети являются беспроводными, они наследуют и проблемы традиционных беспроводных сетей. В частности, это вопросы, касающиеся энергоэффективности, синхронизации, электромагнитной совместимости, безопасности и ряда других аспектов. Для решения этих проблем в различных технологиях доступа могут применяться помехоустойчивые виды модуляции и аппаратные, программные технологии ММО [4]. По результатам проведенного анализа необходимо отметить, что множество проблем в самоорганизующихся сетях взаимосвязаны и требуют комплексного подхода к решению. В ходе исследования выявлено, что одной из актуальных задач остается определение местоположения узлов. Без ее решения практически невозможно сформировать полную топологию сети. В настоящее время существует множество методов для решения этой проблемы, включая методы триангуляции, которые позволяют достаточно точно определять местоположение узлов даже в условиях динамически изменяющейся топологии. Также существуют проблемы управления сетью, так как методы, используемые в самоорганизующейся сети, должны принимать во внимание ее динамику и оперативно реагировать на все изменения. Кроме того, как уже упоминалось, в таких сетях часто невозможно использовать методы управления, характерные для традиционных сетей, из-за их централизованной природы. Одним из возможных решений этой проблемы может стать использование положительных аспектов как централизованного, так и децентрализованного подходов к управлению сетью.

Итак, результаты анализа продемонстрировали, что такие сети обладают значительным потенциалом для решения множества задач в области телеметрии. Однако существует еще ряд задач, которые остаются нерешенными или требуют доработки, и им будут посвящены дальнейшие исследования.

Список литературы:

1. Aliu O. G., Imran A., Imran M. A., Evans B. A survey of self organisation in future cellular networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2012. V. 15. №1. P. 336-361. <https://doi.org/10.1109/SURV.2012.021312.00116>
2. Forecast G. Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update, 2017–2022 // Update. 2019. V. 2017. P. 2022.
3. Евланов М. В., Неумывакина О. Е., Карамышева А. Ю. Анализ возможностей применения подходов к самоорганизации отдельных сервисов в сервис-ориентированных информационных системах // Вісник Національного технічного університету ХПІ. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2013. №16. С. 22-26.

4. Хоров Е. М. Знакомство с современными беспроводными технологиями. Многошаговые беспроводные сети: принципы построения и открытые задачи // Информационно-технологический вестник. 2017. №3. С. 13.

5. Евдокимов И. Л. Применение технологии MIMO в самоорганизующихся сетях связи ad hoc // Т-Comm-Телекоммуникации и Транспорт. 2011. №9. С. 74-76.

6. Суконщиков А. А., Швецов А. Н., Андрианов И. А., Кочкин Д. В. Принципы построения самоорганизующихся информационно-телекоммуникационных систем // Вестник Череповецкого государственного университета. 2021. №1 (100). С. 56-67. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2021-1-100-4>

7. Ташполотов Ы. Т., Абдыраева Н. Р. Фрактальная размерность и информационный обмен в сотовых сетях связи // Бюллетень науки и практики. 2018. Т. 4. №7. С. 198-202.

References:

1. Aliu, O. G., Imran, A., Imran, M. A., & Evans, B. (2012). A survey of self organisation in future cellular networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(1), 336-361. <https://doi.org/10.1109/SURV.2012.021312.00116>

2. Forecast, G. (2019). Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update, 2017–2022. *Update, 2017, 2022*.

3. Evlanov, M. V., Neumyvakina, O. E., & Karamysheva, A. Yu. (2013). Analiz vozmozhnostei primeneniya podkhodov k samoorganizatsii otel'nykh servisov v servis-orientirovannykh informatsionnykh sistemakh. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu KhPI. Seriya: Novi rishennya v suchasnikh tekhnologiyakh*, (16), 22-26.

4. Khorov, E. M. (2017). Znakomstvo s sovremennymi besprovodnymi tekhnologiyami. Mnogoshagovye besprovodnye seti: printsipy postroeniya i otkrytye zadachi. *Informatsionnotekhnologicheskii vestnik*, (3), 13.

5. Evdokimov, I. L. (2011). Primenenie tekhnologii MIMO v samoorganizuyushchikhsya setyakh svyazi ad hoc. *T-Comm-Telekommunikatsii i Transport*, (9), 74-76.

6. Sukonshchikov, A. A., Shvetsov, A. N., Andrianov, I. A., & Kochkin, D. V. (2021). Printsipy postroeniya samoorganizuyushchikhsya informatsionno-telekommunikatsionnykh sistem. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta*, (1 (100)), 56-67. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2021-1-100-4>

7. Tashpolotov, Y., & Abdyraeva, N. (2018). Fractal dimension and information exchange in the cellular network. *Bulletin of Science and Practice*, 4(7), 198-202.

Работа поступила
в редакцию 28.01.2025 г.

Принята к публикации
11.02.2025 г.

Ссылка для цитирования:

Абдыраева Н. Р., Каюмов У., Доценко А. А. Анализ особенностей маршрутизации самоорганизующихся сетей // Бюллетень науки и практики. 2025. Т. 11. №3. С. 115-123. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/112/14>

Cite as (APA):

Abdyraeva, N., Kayumov, U., & Dotsenko, A. (2025). Analysis of Routing Features of Self-organizing Networks. *Bulletin of Science and Practice*, 11(3), 115-123. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/112/14>