



УДК 621.391

**АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ СЕТЕЙ****ANALYSIS OF STATE AND DEVELOPMENT PERSPECTIVES
OF SELF-ORGANIZING NETWORKS****А.В. Проскочило, А.В. Воробьев, М.С. Зряхов, А.С. Кравчук
A.V. Proskochylo, A.V. Vorobyov, M.S. Zriakhov, A.S. Kravchuk***Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина, 61070, г. Харьков, ул. Чкалова, 17
National Aerospace University KhAI, 17, Chkalov Street, Kharkiv, 61070, Ukraine**E-mail: a.proskochylo@rtsla.khai.edu, and_vorobey@hotmail.com, zriakhov@mail.ru*

Аннотация. В работе проведен обзор и анализ состояния и перспектив развития самоорганизующихся сетей типа MESH, ad-hoc и WSN и их отличительных особенностей. Значительное внимание уделено особенностям формирования топологии самоорганизующейся сети. Проведено сравнение наиболее популярных технологий доступа к беспроводной среде и определены их преимущества и недостатки. Рассмотрена проблема управления топологией самоорганизующейся сети в целом и узлом в частности. В ходе анализа установлены ключевые проблемы в самоорганизующихся сетях, которые требуют своего решения.

Resume. In this work the overview and analysis of the state and development perspectives of self-organizing networks such as MESH, ad-hoc and WSN and their distinctive features have been carried out. Significant attention is given to the peculiarities of self-organizing network topology formation. A comparison of the most popular access technology to the wireless environment has been fulfilled and their advantages and disadvantages have been determined. The issue of self-organizing network topology management in general and in particular node has been considered. During analysis the key issues in the self-organizing networks have been established.

Ключевые слова: самоорганизующиеся сети, ad-hoc, mesh, WSN, маршрутизация, технологии доступа.
Key words: self-organizing network, ad-hoc, mesh, WSN, routing, access technology.

Введение

В настоящее время наблюдается тенденция увеличения количества мобильных телекоммуникационных устройств, таких как ноутбуки, планшеты, смартфоны и ряда других, количество которых достигнет 10 млрд. уже в 2018 году и сравняется по количеству со стационарными устройствами [1]. В такой ситуации на первый план выходят беспроводные технологии для построения сетей на принципах самоорганизации.

Под самоорганизацией понимают процесс упорядочения элементов одного уровня в системе за счет внутренних факторов, без внешнего специфического воздействия [2]. Следовательно, самоорганизующиеся сети – это такие сети, которым не требуется никакой дополнительной инфраструктуры кроме самих узлов [3]. Такие сети не имеют единого центра управления узлами, после включения узла в сеть происходит его автоматическая настройка. В данном случае все узлы берут на себя функции управления сетью.

Применение самоорганизующихся сетей имеет ряд преимуществ над беспроводными сетями традиционной архитектуры за счет возможности передачи данных на большие расстояния без увеличения мощности передатчика и необходимости в предустановленной инфраструктуре. Кроме этого такая самоорганизующаяся сеть является устойчивой к изменениям в топологии сети и обладает простотой и высокой скоростью развертывания [4, 5].

В настоящее время самоорганизующиеся сети можно разделить на Mesh (ячеистые), ad-hoc сети и беспроводные сенсорные сети (WSN) и др. [6, 7]. Для построения таких сетей могут использоваться уже имеющиеся мобильные устройства, работающие на таких технологиях беспроводного доступа, как Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee и ряда других.

В данной работе проведен обзор и анализ основных особенностей построения самоорганизующихся сетей, выявлены основные проблемы и рассмотрены возможные пути уменьшения их влияния на работу такой сети.

1. Особенности формирования топологии в самоорганизующихся сетях

Самыми распространенными видом самоорганизующихся сетей являются MESH сети. Они зачастую строятся на основе беспроводных технологий доступа Wi-Fi и Bluetooth. Особенностью MESH сетей являются то, что они являются радиосетями ячеистой структуры. При этом такие сети состоят из беспроводных стационарных маршрутизаторов, которые создают беспроводную магистраль и зону обслуживания абонентов и мобильных/стационарных абонентов, имеющих доступ к



одному из маршрутизаторов в пределах зоны видимости. Топология таких MESH сетей - звезда, со случайным соединением опорных узлов [8].

Самоорганизующиеся ad-hoc сети являются радиосетями со случайными включающимися абонентами, в которых реализовано полностью децентрализованное управление при отсутствии базовых станций или опорных узлов. Топология такой сети, фиксированная со случайным соединением узлов. Однако в мобильных ad-hoc сетях (MANET) основные отличительные особенности – использование быстро меняющейся топологии и применение случайного соединения узлов [8].

Беспроводные сенсорные сети в большинстве случаев используются как телеметрические сети. Такие сети состоят из малогабаритных сенсорных узлов, основная функция которых сбор, обработка и передача телеметрических данных, которая происходит посредством радиоканала [8].

Следует отметить, что независимо от вида самоорганизующейся сети и ее назначения, такие сети зачастую характеризуются динамически изменяющейся топологией сети, ограниченными характеристиками узлов, такими как мощность передатчика, заряд батареи и другими параметрами. Также самоорганизующиеся сети обладают различной размерностью, неоднородностью по мощности передачи и мобильности, ограниченной безопасностью и другими факторами [9]. Поэтому при развертывании таких сетей следует учитывать влияние данных особенностей на все этапы ее построения.

Важной частной задачей при построении самоорганизующейся сети является формирование топологии, то есть установление физических связей между узлами, а также задача управления топологией сети и узлом в частности. Следует отметить, что при решении задачи формирования самоорганизующейся сети необходимо учитывать местоположение узлов в пространстве. Так в различных спецификациях стандартов беспроводного доступа к среде реализованы различные механизмы, которые позволяют отслеживать местоположение самого узла так и его соседей.

Для учета местоположения узлов в пространстве в самоорганизующихся сетях наибольшее распространение получили методы, основанные на географическом местоположении узлов в пространстве [10]. Кроме этого, широко распространены методы, основанные на определении виртуальных координат узла и триангуляции. Существуют также методы определения расстояния на основе параметров радиосигнала, таких как уровень мощности принимаемого сигнала (RSSI), времени задержки (ToA) и ряда других [7, 10 - 12].

Под триангуляцией в беспроводных самоорганизующихся сетях, подразумевают процесс разбиения полигональной области со сложной конфигурацией в набор треугольников. Одним из наиболее известных методов триангуляции является (AOA - Angle of Arrival), который основан на измерении угла прихода радиосигнала от источника излучения [7, 12]. В тоже время для повышения точности определения местоположения узла могут использоваться одновременно несколько методов определения местоположения [12]. На основании полученных данных о местоположении узлов формируется топология самоорганизующейся сети. После этого решается задача управления такой сетью в целом и узлами в частности.

Управление в самоорганизующихся сетях имеет ряд особенностей и существенно отличается от управления в инфраструктурных сетях. 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 [9].

К основным принципам управления узлом в самоорганизующейся сети можно отнести: адаптивность, функциональность, распределенность, координацию взаимодействия, иерархичность и автоматизацию в выработке решений. При этом механизм управления сетью должен осуществлять контроль узлов, сбор и хранение информации о состоянии сети и смежных с ней узлов, а также осуществлять выработку решений о состоянии и изменении топологии сети, маршрутизации и т.д. [9].

Важную роль при решении задач управления сетью играют управляемые параметры физического, канального и сетевого уровней, которыми могут быть мощность передатчика, вид модуляции, скорость передачи. Также важно учитывать и ряд неуправляемых параметров: динамику изменения топологии сети и ее размерность.

Для решения задач управления топологией сети существует множество алгоритмов [7, 13 - 14]. При этом существующие методы управления топологией сети могут быть однородными и неоднородными. Под однородным управлением топологией в самоорганизующихся сетях подразумевают управление узлами, имеющих одинаковую мощность передатчиков и фиксированный радиус действия. При использовании неоднородных методов управления топологией подразумевают, что узлы могут управлять различными характеристиками узлов на разных уровнях модели OSI [15].

Выделяют также централизованные и децентрализованные алгоритмы неоднородного управления топологией сети. В свою очередь децентрализованные методы можно разделить на геометрические, полагающиеся на информацию о расположении узлов в пространстве, и графовые, где узлы обладают только информацией о своих соседях [14, 15]. Наиболее распространенные из таких методов управления используют графовые алгоритмы, такие как LMST, DLSS, FLSS [16, 17].

Из-за сложности управления мобильными узлами в самоорганизующейся сети все большее распространение получают методы управления, основанные на теории игр, которые рассмотрены в работах [14, 15] и ряде других.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что подходы к построению самоорганизующихся сетей существенно отличаются от подходов, которые используют в инфраструктурных сетях. В частности, процесс поиска и установление связей с соседними узлами в таких сетях имеет ряд особенностей из-за динамического характера поведения узлов. Кроме этого для управления сформированной топологией существуют множество подходов, которые нашли свое применение при реализации протоколов маршрутизации в самоорганизующихся сетях. При этом выбор алгоритмов будет зависеть от выбранной технологии доступа, которые рассмотрены в разделе 2.

2. Обзор и анализ технологий доступа для организации беспроводных самоорганизующихся сетей

Как было рассмотрено ранее зачастую процесс формирования физической топологии самоорганизующейся сети зависит от технологий доступа к среде лежащий в ее основе. Большинство из современных самоорганизующихся сетей строятся на основе уже существующих технологий беспроводного доступа, таких как IEEE 802.15.1 (Bluetooth), IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.15.4 (ZigBee) и др. в зависимости от назначения такой сети [18 - 20].

На рисунке 1 представлено сравнение некоторых технологий доступа по максимально доступной полосе пропускания [19, 21].

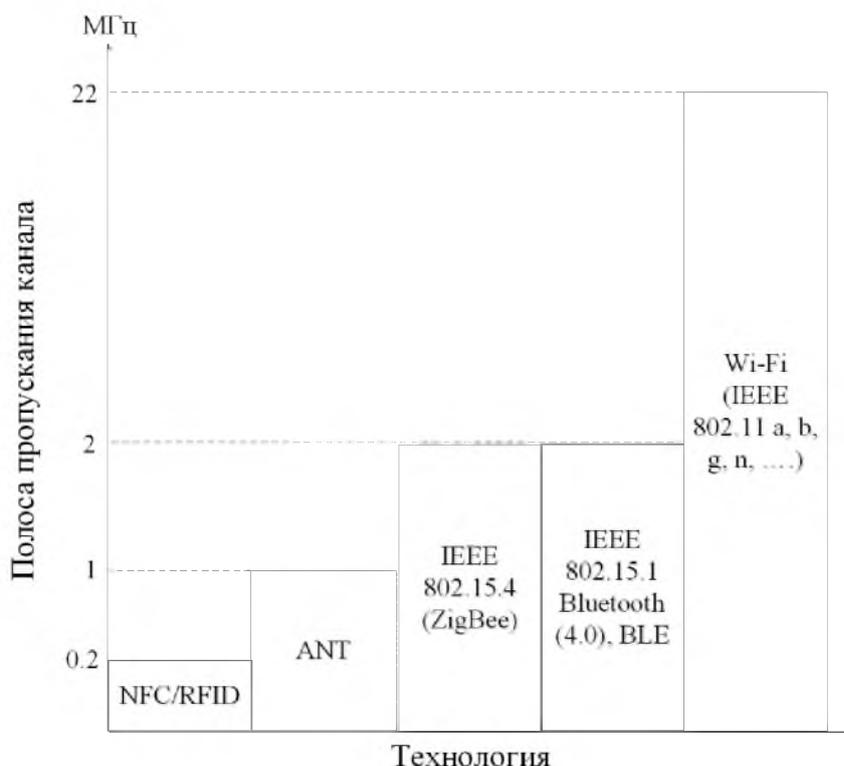


Рис. 1. Максимально доступная полоса пропускания технологий беспроводного доступа
Fig. 1. The maximum available bandwidth of technologies used in self-organizing networks

Из анализа графика на рисунке 1 наибольшей пропускной способностью обладает стандарт Wi-Fi. При этом расширение полосы пропускания приводит к большему энергопотреблению устройств используемых в самоорганизующихся сетях [19].

Кроме этого на рисунке 2 представлено сравнение технологий доступа по требуемым источникам питания для их работы в условиях самоорганизующихся сетей [19, 21].

Наиболее экономичными в плане энергопотребления являются стандарты RFID, IEEE 802.15.4 (ZigBee), что позволяет им использовать одну батарею на протяжении нескольких лет. В тоже время наиболее энергопотребляемым остается стандарт Wi-Fi, но существуют наработки по уменьшению затрат энергии данной технологией [23].

В таблице 1 представлено сравнение самых перспективных технологий доступа к беспроводной среде по некоторым параметрам [18 - 20].

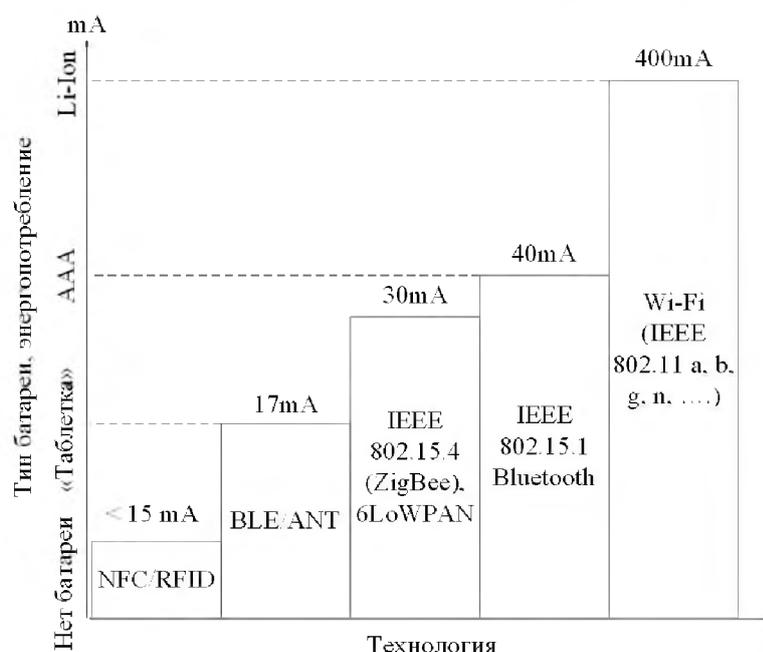


Рис. 2. Типы источников питания требуемых технологиями доступа в самоорганизующихся сетях
 Fig. 2. The types of power supplies for using access technologies in self-organizing networks

Таблица 1
 Table 1

Сравнение стандартов беспроводного доступа
A comparison of wireless access standards

Характеристики	Стандарты		
	Bluetooth	IEEE 802.15.4 (ZigBee)	Wi-Fi
Частоты	2,4 ГГц	0,868/0,915/2,4 ГГц	2,4, 5 – 6 ГГц
Количество каналов	79	1/10/16	14
Скорость передачи	3 МБ/с	20..250 кБ/с	11 МБ/с – 10 Гб/с
Уровень OSI	Физический, канальный	Физический, канальный, (сетевой - приложений)	Физический, канальный
Доступ к среде	FHSS	DSSS	DSSS, CCK, OFDM
Использование технологии MIMO	Есть	Есть	Есть
Радиус действия устройств	10 м	10-100 м	100 м
Полоса пропускания канала	1 МГц	0.3/0.6 МГц; 2 МГц	22 МГц
Модуляция	GFSK	BPSK, O-QPSK	BPSK, QPSK, COFDM, CCK, MQAM, QAM
Количество устройств в сети	8	65000	2007
Уровень мощности	0 – 30 дБм	От 0 дБм (1 мВт)	20 дБм
Потребляемая мощность	40mA TX, в режиме ожидания 0.2mA	30mA TX, в режиме ожидания 3µA	400mA TX, в режиме ожидания 20mA

Опираясь на информацию, представленную в таблице 1 можно сделать вывод, что рассмотренные технологии доступа имеют существенные различия между собой. При выборе той или иной технологии доступа и ее применения в самоорганизующихся сетях следует учитывать следующие параметры: уровень потребляемой мощности, скорость передачи данных, количество возможных устройств, одновременно работающих в сети и другие. Кроме этого, сети, на основе данных технологий доступа, должны учитывать ряд достоинств и недостатков каждой из технологий.

К основным достоинствам стандарта Bluetooth можно отнести: возможность быстрого развертывания, сравнительно малое энергопотребление абонентских устройств, широкий спектр поддерживаемых эту технологию устройств, высокий уровень стандартизации и совместимость между устройствами Bluetooth разных производителей, защиту передаваемых данных, низкую стоимость, универсальность и большое разнообразие модулей под различные задачи. В тоже время данная технология имеет и ряд недостатков, которые ограничивают ее использование в самоорганизующихся сетях. Сре-



ди них стоит отметить относительно невысокую скорость передачи данных (до 3 Мбит/с), небольшой радиус действия и нехватка частотного ресурса [18 - 22]. Поэтому в настоящее время Bluetooth может использоваться при создании некоторых видов самоорганизующихся сетей, где не требуется слишком высокая скорость передачи данных.

В свою очередь особенность стандарта IEEE 802.15.4 в том, что он может быть использован для широкого круга задач, но изначально направлен на создание беспроводных персональных сетей. К достоинствам данного стандарта можно отнести поддержку сложных беспроводных сетей, высокий уровень стандартизации, ультранизкое энергопотребление, низкая стоимость модулей, возможность разработки сложных приложений для решения задач различного характера. Наряду с достоинствами данный стандарт имеет ряд существенных недостатков, среди которых следует отметить невысокую скорость передачи данных. Кроме этого большая часть трафика в БСС сети на основе стандарта IEEE 802.15.4 тратится на передачу пакетов со служебной информацией, объем которой будет увеличиваться с размерами сети [23].

Протокол ZigBee разработанный на основе физического и канального уровня стандарта IEEE 802.15.4 и представляет собой универсальную платформу для реализации беспроводных сенсорных сетей. При этом стандарт получил следующие достоинства: защиту передаваемых данных, поддержка сложных беспроводных сетей, ультранизкое энергопотребление (батарея на 10 лет), скорость передачи данных до 250 кбит/с и ряд других. Ключевым недостатком стандарта ZigBee - закрытость данного протокола, который разрабатывает ZigBee Alliance. В связи с этим возникает отсутствие единой программно-аппаратной платформы для разработки сложных приложений для БСС [23].

Стандарт Wi-Fi (IEEE 802.11) существенно отличается от технологий Bluetooth, IEEE 802.15.4 (ZigBee) и изначально был направлен на его использование в беспроводных локальных сетях. Поэтому данный стандарт нашел свое место в самоорганизующихся сетях, направленных на обмен различной мультимедийной информацией (аудио, видео, данные и др.) между пользователями в такой сети и для связи с сетью Интернет.

Среди достоинств технологии Wi-Fi можно выделить: высокую скорость передачи данных, компактность устройств, большое разнообразие модулей, высокий уровень стандартизации и совместимость между устройствами Wi-Fi разных производителей, а также защищенность передаваемых данных.

Следует отметить также и недостатки данной технологии доступа к беспроводной среде, такие как: большое энергопотребление и невозможность работы в течение длительного периода времени от автономных источников питания, относительно высокую стоимость по сравнению с другими технологиями доступа. Кроме этого существуют проблемы, которые требуют особого внимания при дальнейшем развитии самоорганизующихся сетей на базе данной технологии. К ним можно отнести проблемы пропускной способности и масштабируемости [24]. Технология Wi-Fi нашла свое применение в MESH и ad-hoc (MANET) самоорганизующихся сетях, но ее применение нецелесообразно в WSN из-за большого энергопотребления.

Большинство из рассматриваемых технологий доступа работают в не лицензируемом диапазоне частот 2,4 ГГц (исключением является стандарты Wi-Fi, а также IEEE 802.15.4 (ZigBee)), это приводит к проблемам электромагнитной совместимости, помехоустойчивости, пропускной способности, безопасности и ряду других трудностей, которые возникают в условиях беспроводных самоорганизующихся сетей.

Следует отметить, что независимо от используемой технологии доступа, в процессе формирования и управления топологией сети и узлом в частности, применяются различные подходы, которые были рассмотрены в разделе 1.

При анализе технологий доступа установлено, что технологии беспроводной связи, такие как Wi-Fi, Bluetooth, IEEE 802.15.4 (ZigBee) наиболее часто используются в самоорганизующихся сетях. Также при выборе базовой технологии необходимо учитывать назначение самоорганизующейся сети (Mesh, MANET, WSN), решаемые сетью задачи, достоинства и недостатки той или иной технологии.

В настоящее время задачи самоорганизующихся сетей на основе рассмотренных технологий доступа важными задачами остаются формирование топологии сети (установление физических связей между узлами), а также задачи межузловое управления и маршрутизации (раздел 3).

3. Обзор и анализ протоколов маршрутизации в самоорганизующихся сетях

Важная роль в работе самоорганизующихся сетей отводится методам управления и в частности задачам маршрутизации. Под маршрутизацией подразумевают процесс определения лучшего пути, по которому пакет может быть доставлен получателю [25]. Весь комплекс мер по решению задач маршрутизации содержится в протоколах маршрутизации, которые затем используются в работе реальных телекоммуникационных систем. Так одно устройство в сети может поддерживать работу нескольких протоколов маршрутизации одновременно. Под протоколом маршрутизации зачастую подразумевают сетевой протокол, используемый маршрутизаторами для определения возможных маршрутов следования данных по сети [26, 27].

Следует отметить, что требования к протоколам маршрутизации в самоорганизующихся сетях существенно отличаются от требований к маршрутизации в инфраструктурных (проводных LAN и WAN) сетях несмотря на то, что зачастую сами алгоритмы поиска маршрутов остаются теми же. 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.

Из этого следует, что решение проблемы маршрутизации в таких сетях является актуальной и важной задачей. Подтверждением этому является ряд работ, например, [28, 29] и др.

Выбор протоколов маршрутизации, которые должны быть использованы в самоорганизующейся сети в большинстве случаев будет зависеть от используемой технологии доступа к беспроводной среде, размеров сети, топологии и других параметров.

Такие протоколы маршрутизации в самоорганизующихся сетях (независимо от алгоритмов маршрутизации, которые лежат в их основе), должны включать в себя механизмы, отвечающие за решение следующих задач:

- обнаружение соседних станций;
- оценку качества канала связи между соседними станциями;
- распространение информации о состоянии сети;
- выбор маршрутов для передачи данных;
- ретрансляцию пакетов по выбранным маршрутам [30].

Кроме этого в работах [28, 31] были выдвинуты ряд требований к решению вышеуказанных 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 разорванных маршрутов, высокая масштабируемость, поддержка требуемого уровня качества обслуживания (QoS). В тоже время следует отметить, что с дальнейшим развитием самоорганизующихся сетей неизбежно возникают и другие требования.

В тоже время уже существует множество протоколов маршрутизации используемых в самоорганизующихся сетях. Один из возможных вариантов классификации протоколов маршрутизации основан на принципах их работы (рисунок 3).



Рис. 3. Протоколы маршрутизации в самоорганизующихся сетях
 Fig. 3. The routing protocols in self-organizing networks

Наибольшее распространение в самоорганизующихся сетях получили проактивные (табличные) протоколы маршрутизации. Такие протоколы периодически рассылают по сети служебные сообщения с информацией о всех изменениях в ее топологии. В результате чего каждый узел в сети на основе данной информации строит маршруты ко всем остальным узлам и сохраняет их в таблицу маршрутизации, откуда они считываются при возникновении необходимости в передаче сообщения какому-либо адресату [31].

Основной отличительной особенностью проактивных протоколов маршрутизации между собой является выбор алгоритмов маршрутизации, которые лежат в их основе. Так большинство проактивных протоколов используют алгоритмы Беллмана-Форда с некоторыми улучшениями, а также алгоритм Дейкстры для поиска самого наилучшего (короткого) маршрута. На сегодня наиболее популярными проактивными протоколами в самоорганизующихся сетях являются DSDV, OLSR, FSR, WRP, В.А.Т.М.А.Н, Babel и др. [6, 7, 31 - 36].

Анализ протоколов показал, что использование проактивной маршрутизации наиболее эффективно в малоподвижных и небольших самоорганизующихся сетях. При увеличении подвижности (динамической топологии) и количества узлов сети использование проактивных протоколов приводит к быстрому росту загрузки сети служебным трафиком и неэффективному использованию энерго-ресурсов каждого узла, что является существенным недостатком при организации больших, динамических сетей, таких как мобильные ad-hoc сети (MANET) [30].

Достаточно распространенными являются и реактивные (работающие по запросу) протоколы маршрутизации. Такие протоколы, составляют маршруты к конкретным узлам лишь при возникновении необходимости передачи информации от узла к узлу. В реактивных протоколах передающий узел широковещательно рассылает по сети сообщение-запрос на получение маршрута, которое долж-



но прийти к необходимому узлу. В ответ на такое сообщение узел-получатель посылает сообщение-подтверждение, из которого отправитель узнает необходимый маршрут и записывает его в свою таблицу маршрутизации. При повторной отправке данных к этому получателю маршрут просто считывается из таблицы маршрутизации. В случае, когда обнаруженный маршрут становится недоступным – запускается процедура обнаружения и поддержания маршрута. Наиболее популярными реактивными протоколами являются AODV, DSR, DYMO [7, 29, 32, 33, 36].

В отличие от проактивных, реактивные протоколы более эффективны в условиях динамически изменяющихся сетей, например, в MANET из-за уменьшения количества служебной информации, передаваемой по сети, поскольку поиск маршрута осуществляется только по необходимости. Несмотря на преимущества над проактивными протоколами реактивные протоколы имеют ряд недостатков, среди которых следует отметить увеличение задержки на поиск первичного маршрута, связанную с высокой подвижностью и большим количеством узлов [28], что в некоторых случаях может привести к неработоспособности. Еще одним существенным недостатком является поиск нового пути в реальном масштабе времени, что существенно ограничивает реактивные протоколы при передаче трафика реального времени, такого как видео или речь.

В свою очередь для устранения недостатков проактивной и реактивной маршрутизации в больших, подвижных сетях были предложены гибридные протоколы, которые сочетают в себе механизмы проактивных и реактивных. Такие протоколы, как правило, разбивают сеть на множество подсетей, внутри которых функционирует проактивный протокол, а взаимодействие между такими подсетями осуществляется на основе реактивных протоколов маршрутизации. В крупных масштабируемых сетях это позволяет уменьшить размеры таблиц маршрутизации, которые хранятся на узлах в сети, так как им необходимо знать точные маршруты только ко всем узлам подсети, к которой они принадлежат. Использование в гибридных протоколах такого подхода позволяет сократить объем передаваемой служебной информации по всей сети, так как основная ее часть распространяется лишь в пределах подсети. В настоящее время среди таких протоколов наибольшее распространение получили HWMP, ZHLS, ZRP [7, 29, 32, 33, 35, 36].

Таким образом, сочетание преимуществ проактивных и реактивных протоколов позволяет использовать гибридные технологии маршрутизации в больших и динамичных сетях, таких как ad-hoc сети (MANET). В тоже время недостатком являются их относительная сложность при реализации и увеличение производительности оборудования (узлов), а также снижение эффективности маршрутизации в связи с необходимостью разбиения структуры сети на кластеры [28].

В настоящее время исследованию различных протоколов маршрутизации посвящено множество таких работ как [28, 29, 32] и других. В них предложены рекомендации по усовершенствованию протоколов маршрутизации для повышения эффективности работы в условиях самоорганизующихся сетей независимо от их размерности и других параметров.

Таким образом, можно сделать вывод, что большинство существующих протоколов маршрутизации, используемых в самоорганизующихся сетях, имеют ряд недостатков, которые также требуют своего решения. При этом стоит отметить, что выбор того или иного протокола маршрутизации в большинстве случаев зависит от назначения самоорганизующейся сети и требований, которые предъявляют к ней. Следует отметить, что требования к самоорганизующимся сетевым технологиям могут расширяться. Поэтому в небольших и малоподвижных сетях наиболее целесообразно применять проактивные или реактивные протоколы маршрутизации, а в более крупных эффективными могут быть гибридные.

4. Анализ проблем самоорганизующихся сетей

Поскольку самоорганизующиеся сети беспроводные, то им присущи и проблемы традиционных беспроводных сетей. В частности, это проблемы, связанные с энергоэффективностью, синхронизацией, электромагнитной совместимостью, безопасностью и ряда других. При решении данных проблем в различных технологиях доступа могут применяться помехоустойчивые виды модуляции, аппаратные и программные технологии MIMO [4].

По результатам проведенного в работе анализа следует отметить, что большинство проблем в самоорганизующихся сетях являются взаимосвязанными и должны решаться комплексно. Так в ходе анализа установлено, что в настоящее время одной из важных проблем остается определение местоположения узлов. Без решения этой проблемы практически невозможно решить задачу формирования полной топологии сети. Сейчас для решения данной проблемы существует множество подходов, в частности, методов триангуляции, которые позволяют достаточно точно определить местоположение узлов сети даже в условиях динамически изменяющейся топологии сети.

Существуют также проблемы, связанные с управлением сетью, поскольку методы, применяемые в самоорганизующейся сети должны учитывать ее динамику и своевременно реагировать на все изменения в сети. Кроме этого, как было отмечено выше, в таких сетях часто невозможно применять методы управления, которые применяются в традиционных сетях из-за ориентированности на централизованное управление. Одним из возможных решений данной проблемы является использова-



ние положительных свойств централизованного и децентрализованного подходов управления сетью. Также решению данных проблем посвящено множество работ таких как [9, 14, 15] и ряда других.

Кроме этого, технологии доступа, используемые в самоорганизующихся сетях, также имеют ряд недостатков, которые приводят к ограничению в применении (см. раздел 2).

В настоящее время одной из важных проблем является поиск и создание эффективных протоколов маршрутизации, поскольку большинство существующих протоколов эффективны только в небольших сетях и сталкиваются с проблемой масштабируемости. При этом в зависимости от вида самоорганизующейся сети их использование может привести к неэффективному распределению ресурсов сети, а иногда и к ее неработоспособности. Решению проблем эффективной маршрутизацией посвящены работы [29 - 31], но вопрос остается открытым.

В заключение, отметим важность решения следующих задач и устранение ряда проблем [4]:

1. Проблема пропускной способности каналов от абонента к абоненту («точка»-«точка»), так и пропускной способности сети в целом.

2. Обеспечения помехоустойчивости в условиях плотной застройки, передвижения абонентов и высокого уровня интерференции между устройствами сети.

3. Обеспечения безопасности передаваемого трафика и его защита от перехвата и фальсификации.

4. Проблема эффективной маршрутизации в зависимости от заданных условий окружения и типа передвижения абонентов.

5. Проблема высокой нагрузки на узлы в «центре» сети.

6. Конструктивные проблемы изготовления портативных абонентских устройств с использованием MIMO.

7. Задача взаимодействия с внешними сетями.

Таким образом, в настоящее время существует множество задач без решения, которых эффективность самоорганизующихся сетей будет низкой. При этом попытки решения большинства проблем, связанных с беспроводной средой передачи данных, таких как энергоэффективность, синхронизация, электромагнитная совместимость, безопасность были предприняты в различных стандартах, например, таких как Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee. Поэтому во многом ключевыми проблемами самоорганизующихся сетей в настоящее время остаются проблемы управления в частности задачи маршрутизации.

Заключение

В работе проведен анализ состояния и рассмотрены перспективы развития самоорганизующихся сетей в современных телекоммуникационных системах. Анализ показал, что такие сети являются перспективными при решении множества задач телеметрии, военного и гражданского применения. Но еще не решенными или требующими доработки остаются ряд задач решению которых будут посвящены дальнейшие исследования.

Список литературы References

1. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2014–2019. Electronic resource. Available at: http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white_paper_c11-520862.pdf (15 July 2015)

Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2014–2019. Electronic resource. Available at: http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white_paper_c11-520862.pdf (15 July 2015)

2. Евланов М.В., Неумывакина О.Е., Карамышева А.Ю. 2013. Анализ возможностей применения подходов к самоорганизации отдельных сервисов в сервис-ориентированных информационных системах. Вестник Национального технического университета. № 16: 22-26.

Evlanov M.V., Neumyvakina O.E., Karamysheva A.Yu. 2013. Analiz vozmozhnostey primeneniya podkhodov k samoorganizatsii otdel'nykh servisov v servis-orientirovannykh informatsionnykh sistemakh. Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta. № 16: 22-26.

3. Хоров Е.М. Знакомство с современными беспроводными технологиями. Многошаговые беспроводные сети: принципы построения и открытые задачи. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://mipt.ru/drec/upload/d27/multihop-wireless.pdf> (16 июля 2015)

Khorov E.M. Znakomstvo s sovremennymi besprovodnymi tekhnologiyami. Mnogoshagovye besprovodnye seti: printsipy postroeniya i otkrytye zadachi. Electronic resource. Available at: <https://mipt.ru/drec/upload/d27/multihop-wireless.pdf> (16 July 2015).

4. Евдокимов И. Л. Применение технологии MIMO в самоорганизующихся сетях связи ad hoc. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://conf.mirea.ru/CD2011/pdf/p3/31.pdf> (16 июля 2015)

Evdokimov I. L. Primenenie tekhnologii MIMO v samoorganizuyushchikhsya setyakh svyazi ad hoc. Electronic resource. Available at: <http://conf.mirea.ru/CD2011/pdf/p3/31.pdf> (16 July 2015).



5. Польшиков К.А. 2015. Оценка вероятностно-временных характеристик доставки данных в беспроводной самоорганизующейся сети. Научные ведомости БелГУ. Сер. Экономика. Информатика. – № 7 (204). Вып. 34(1): 183–187.
- Pol'shchikov K.A. 2015. Probability-time characteristics estimates of data delivery in the wireless ad hoc network. Nauchnye vedomosti BelGU. Ser. Istorija. Politologija. Jekonomika. Informatika. - № 7 (204). Vyp. 34(1): 183–187.
6. Pathan A. S. K. (ed.). 2010. Security of self-organizing networks: MANET, WSN, WMN, VANET. CRC press, 638.
- Pathan A. S. K. (ed.). 2010. Security of self-organizing networks: MANET, WSN, WMN, VANET. CRC press, 638.
7. Boukerche A. (ed.). 2008. Algorithms and protocols for wireless, mobile Ad Hoc networks. John Wiley & Sons, 496.
- Boukerche A. (ed.). 2008. Algorithms and protocols for wireless, mobile Ad Hoc networks. John Wiley & Sons, 496.
8. Беспроводные самоорганизующиеся сети. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://crossgroup.su/solutions/adhoc.html> (16 июля 2015)
- Besprovodnye samoorganizuyushchiesya seti. Electronic resource. Available at: <http://crossgroup.su/solutions/adhoc.html> (16 July 2015).
9. Миночкин А.И., Романюк В.А. 2005. Методология оперативного управления мобильными радиосетями. Зв'язок. № 2: 53-58.
- Minochkin A.I., Romanyuk V.A. 2005. Metodologiya operativnogo upravleniya mobil'nymi radiosetiyami. Zv'yazok. № 2: 53-58.
10. Файзулхаков Я.Р., Пыттев С.А. Анализ методов позиционирования узлов беспроводной сенсорной сети. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.ipmce.ru/about/press/articles/ampubss/> (16 июля 2015)
- Fayzulkhakov Ya.R., Pyttev S.A. Analiz metodov pozitsionirovaniya uzlov besprovodnoy sensornoy seti. Electronic resource. Available at: <http://www.ipmce.ru/about/press/articles/ampubss/> (16 July 2015).
11. Иванов Е.В. 2008. Определение координат в беспроводных сенсорных сетях. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 26 с.
- Ivanov E.V. 2008. Opredelenie koordinat v besprovodnykh sensorykh setyakh. Abstract. dis. ... cand. tech. sciences. Moskva, 26.
12. Подшивалов. В.В., Баскаков С.С. Локализация объектов в беспроводных сенсорных сетях. Электронный ресурс. Режим доступа: sntbul.bmstu.ru/file/out/505560 (16 июля 2015)
- Podshivalov. V.V., Baskakov S.S. Lokalizatsiya ob"ektov v besprovodnykh sensorykh setyakh. Electronic resource. Available at: sntbul.bmstu.ru/file/out/505560 (16 July 2015).
13. Santi P. 2005. Topology control in wireless ad hoc and sensor networks. ACM computing surveys (CSUR). T. 37. № 2: 164-194.
- Santi P. 2005. Topology control in wireless ad hoc and sensor networks. ACM computing surveys (CSUR). T. 37. № 2: 164-194.
14. Базенков Н.И. 2013. Динамика двойных наилучших ответов в игре формирования топологии беспроводной ad hoc сети. Управление большими системами. № 43: 217-239.
- Bazhenkov N.I. 2013. Dinamika dvoynnykh nailuchshikh otvetov v igre formirovaniya topologii besprovodnoy ad hoc seti. Upravlenie bol'shimi sistemami. № 43: 217-239.
15. Базенков Н.И. 2014. Теоретико-игровые алгоритмы формирования децентрализованных беспроводных сетей. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 125 с.
- Bazhenkov N.I. 2014. Teoretiko-igrovye algoritmy formirovaniya detsentralizovannykh besprovodnykh setey. Dis. ... cand. tech. sciences. Moskva, 125.
16. Li N., Hou J. C., Sha L. 2005. Design and analysis of an MST-based topology control algorithm. Wireless Communications, IEEE Transactions on. T. 4. № 3: 1195-1206.
- Li N., Hou J. C., Sha L. 2005. Design and analysis of an MST-based topology control algorithm. Wireless Communications, IEEE Transactions on. T. 4. № 3: 1195-1206.
17. Cartigny, J. 2005. Localized LMST and RNG based minimum-energy broadcast protocols in ad hoc networks. Ad Hoc Networks. T. 3. № 1: 1-16.
18. Петров Д. 2010. Стандарты беспроводной связи диапазона ISM. Электронные компоненты. № 10: 28-32.
- Petrov, D. 2010. Standarty besprovodnoy svyazi diapazona ISM. Elektronnyye komponenty. № 10: 28-32.
19. Proskochylo A., Vorobyov A., Zriakhov M., Kravchuk A., Akulynichev A., Lukin V. 2015. Overview of wireless technologies for organizing the sensor networks. Second International Scientific-Practical Conference «Problems of Informatics. Science and Technology». 39-41.
- Proskochylo A., Vorobyov A., Zriakhov M., Kravchuk A., Akulynichev A., Lukin V. 2015. Overview of wireless technologies for organizing the sensor networks. Second International Scientific-Practical Conference «Problems of Informatics. Science and Technology». 39-41.
20. Pothuganti, K., Chitneni A. 2014. A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi. Advance in Electronic and Electric Engineering. 4(6): 655–662.
- Pothuganti, K., Chitneni A. 2014. A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi. Advance in Electronic and Electric Engineering. 4(6): 655–662.
21. Texas Instruments. Electronic resource. Available at: <http://www.ti.com/lit/sg/slab056d/slab056d.pdf> (16 July 2015).
- Texas Instruments. Electronic resource. Available at: <http://www.ti.com/lit/sg/slab056d/slab056d.pdf> (16 July 2015).
22. Романов С. 2012. Беспроводные технологии с низким энергопотреблением. Электронные компоненты. № 2: 33-41.



- Romanov S. 2012. *Besprovodnyye tekhnologii s nizkim energopotrebleniem. Elektronnyye komponenty*. № 2: 33-41.
23. Аникин А. 2011. Обзор современных технологий беспроводной передачи данных. *Беспроводные технологии*. №4: 6-12.
- Anikin A. 2011. *Obzor sovremennykh tekhnologiy besprovodnoy peredachi dannykh. Besprovodnyye tekhnologii*. №4: 6-12.
24. Самоорганизующиеся (ad hoc) сети. Что это и зачем это нужно? Электронный ресурс. Режим доступа: <http://wireless09.livejournal.com/334.html> (16 июля 2015)
- Samoorganizuyushchiesya (ad hoc) seti. Chto eto i zachem eto nuzhno? Electronic resource. Available at: <http://wireless09.livejournal.com/334.html> (16 July 2015).
25. Брокмайер Д., Лебланк Д.Э., Маккарти. Р. 2002. *Маршрутизация в Linux*. М., Вильямс, 240.
- Brokmayer D., Leblank D.E., Makkarti. R. 2002. *Marshrutizatsiya v Linux*. M., Vil'yams, 240.
26. Протокол маршрутизации. Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.ammanu.edu.jo/wiki/ru/articles/п/р/о/Протокол_маршрутизации.html (16 июля 2015)
- Protokol marshrutizatsii. Electronic resource. Available at: http://www.ammanu.edu.jo/wiki/ru/articles/п/р/о/Протокол_маршрутизации.html (16 July 2015).
27. Адамс Б., Ченг Э., Фокс Т. и др. 2004. *Руководство Cisco по междоменной многоадресатной маршрутизации [Interdomain Multicast Solutions Guide]*. М., Вильямс, 320.
- Adams B., Cheng E., Foks T. i dr. 2004. *Rukovodstvo Cisco po mezhdomennoy mnogoadresatnoy marshrutizatsii [Interdomain Multicast Solutions Guide]*. M., Vil'yams, 320.
28. Метелёв А.П., Чистяков А.В., Жолобов А.Н. 2013. *Протоколы маршрутизации в беспроводных самоорганизующихся сетях*. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 3(1): 75-78.
- Metelev A.P., Chistyakov A.V., Zholobov A.N. 2013. *Protokoly marshrutizatsii v besprovodnykh samoorganizuyushchikhsya setyakh. Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. 3(1): 75-78.
29. Орлов В.Г., Фадеев А.Н. 2012. *Протоколы маршрутизации в мобильных ad-hoc-сетях*. Материалы Международной научно-технической конференции (INTERMATIC - 2012). Часть 6: 208-212.
- Orlov V.G., Fadeev A.N. 2012. *Protokoly marshrutizatsii v mobil'nykh ad-hoc-setyakh. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (INTERMATIC - 2012). Chast' 6: 208-212.*
30. Ляхов А.И., Некрасов П.О., Островский Д.М., Сафонов А.А., Хоров Е.М. 2012. *Анализ совместного использования проактивного и реактивного методов распространения сетевой информации в многоадресных беспроводных сетях*. Информационные процессы. Т 12. № 3: 198-212.
- Lyakhov A.I., Nekrasov P.O., Ostrovskiy D.M., Safonov A.A., Khorov E.M. 2012. *Analiz sovместного ispol'zovaniya proaktivnogo i reaktivnogo metodov rasprostraneniya setevoy informatsii v mnogoshagovykh besprovodnykh setyakh. Informatsionnye protsessy*. Т 12. № 3: 198-212.
31. Винокуров В.М., Пуговкин А.В., Пшеничников А.А., Ушарова Д.Н., Филатов А.С. 2010. *Маршрутизация в беспроводных мобильных Ad hoc-сетях*. Доклады ТУСУРа. – 2010. № 2(22): 288-292.
- Vinokurov V.M., Pugovkin A.V., Pshennikov A.A., Usharova D.N., Filatov A.S. 2010. *Marshrutizatsiya v besprovodnykh mobil'nykh Ad hoc-setyakh. Doklady TUSURa*. – 2010. № 2(22): 288-292.
32. Астраханцев А.А., Горбань С.М. 2014. *Сравнительный анализ эффективности протоколов маршрутизации в AD-HOC сетях*. Системы обработки информации. № 1: 156-159.
- Astrakhantsev A.A., Gorban' S.M. 2014. *Sravnitel'nyy analiz effektivnosti protokolov marshrutizatsii v AD-HOC setyakh. Sistemi obrobki informatsii*. № 1: 156-159.
33. Seguí C. et al. 2006. *Evolution of unicast routing protocols in data networks*. IEEE The 25 th Conference on Computer Communications.
- Seguí C. et al. 2006. *Evolution of unicast routing protocols in data networks*. IEEE The 25 th Conference on Computer Communications.
34. Что такое MANET или почему WiFi не решение всех телекоммуникационных проблем. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://habrahabr.ru/post/197860/> (16 июля 2015)
- Chto takoe MANET ili pochemu WiFi ne reshenie vsekhn telekommunikatsionnykh problem. Electronic resource. Available at: <http://habrahabr.ru/post/197860/> (16 July 2015).
35. Proskochylo A., Vorobyov A., Zriakhov M. *Overview of possibilities to improve efficiency of self-organizing networks // 2014, First International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology»*. – IEEE, 2014. – P. 118-119.
- Proskochylo A., Vorobyov A., Zriakhov M. *Overview of possibilities to improve efficiency of self-organizing networks // 2014, First International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology»*. – IEEE, 2014. – P. 118-119.
36. Sarkar S. K., Basavaraju T. G., Puttamadappa C. 2007. *Ad hoc mobile wireless networks: principles, protocols and applications*. CRC Press, 349.
- Sarkar S. K., Basavaraju T. G., Puttamadappa C. 2007. *Ad hoc mobile wireless networks: principles, protocols and applications*. CRC Press, 349.