

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ И МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАРШРУТОВ ДОСТАВКИ ДАННЫХ В БЕСПРОВОДНЫХ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Г.И. Кулагин

gleb.kulagin@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

В настоящее время одним из перспективных направлений развития сетевых технологий являются беспроводные самоорганизующиеся сети на основе беспилотных летательных аппаратов — FANET (Flying Ad-Hoc Networks — летающие специальные сети), наиболее важная задача которых в процессе их функционирования состоит в организации эффективного обмена данными. Отличительные свойства беспроводных самоорганизующихся сетей с изменяющейся топологией приводят к тому, что технические решения и методы определения маршрутов доставки данных, используемые в телекоммуникационных сетях с традиционной фиксированной архитектурой, в специальных сетях FANET оказываются неэффективными и не обеспечивают необходимой производительности. Вместе с тем беспроводные самоорганизующиеся сети на основе беспилотных летательных аппаратов имеют собственные техники, применяющиеся для маршрутизации данных, к которым предъявляются требования, учитывающие свойственные сетям подобного типа характерные отличия — высокая мобильность и низкая плотность узлов, динамичные и частые изменения топологии. Проведен анализ особенностей и методов определения маршрутов доставки данных в беспроводных самоорганизующихся сетях, основу (узлы) которых составляют беспилотные летательные аппараты

Ключевые слова

Беспроводные самоорганизующиеся сети, беспилотные летательные аппараты, маршрутизация, протоколы маршрутизации, FANET

Поступила 27.05.2022

Принята 04.10.2022

© Автор(ы), 2023

Введение. Применение беспилотных летательных аппаратов (БЛА) как основы для формирования сетевой инфраструктуры — оптимальный способ повышения телекоммуникационных возможностей беспроводных самоорганизующихся сетей, главные преимущества которых состоят в уни-

версальности, гибкости, небольших расходах и исключении человеческого фактора при выполнении различных задач [1].

В настоящий момент наибольший интерес представляют группы взаимодействующих между собой БЛА, применение которых повышает эффективность выполнения многоплановых миссий в интересах различных секторов экономики и сокращает время на их проведение. В то же время такие уникальные характеристики беспроводных самоорганизующихся сетей на основе БЛА, как высокая мобильность и низкая плотность узлов, динамичные и частые изменения топологии не позволяют использовать традиционные подходы к определению маршрутов доставки данных, что требует применения специализированных протоколов маршрутизации.

В связи с этим изучение методов определения маршрутов доставки данных в беспроводных самоорганизующихся сетях на основе БЛА в целях решения задачи маршрутизации является одним из актуальных направлений исследований для обеспечения эффективного функционирования сетей подобного типа.

Характерные свойства беспроводных самоорганизующихся сетей на основе беспилотных летательных аппаратов. Одно из перспективных направлений развития беспроводных самоорганизующихся сетей — летающие специальные сети (FANET), основу (узлы) которых составляют БЛА. Сети FANET можно классифицировать как подмножество VANET (Vehicle Ad-Hoc Networks — транспортные специальные сети), которое также является подгруппой MANET (Mobile Ad-Hoc Networks — мобильные специальные сети) [2]. Эта взаимосвязь показана на рис. 1.

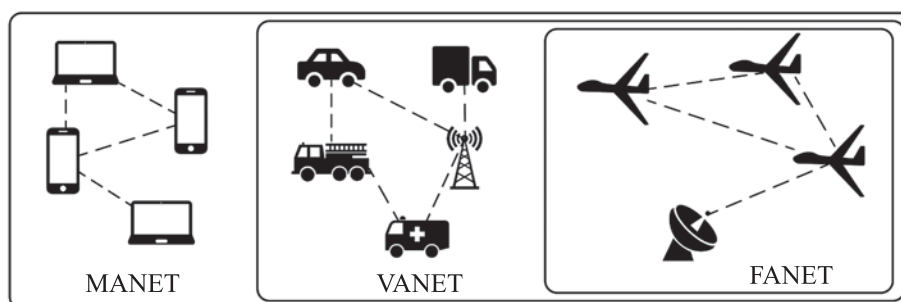


Рис. 1. Взаимосвязь сетей MANET, VANET и FANET

Сети на основе БЛА, образующих летающий сегмент, имеют распределенную структуру, обеспечивающую беспроводную связь между узлами без какой-либо дополнительной инфраструктуры с поддержкой самоорганизации.

Анализ практического применения БЛА показывает необходимость одновременного участия при решении большинства задач не одного, а группы взаимодействующих друг с другом малоразмерных БЛА, за счет чего обеспечивается высокая отказоустойчивость, надежность, масштабируемость, увеличение времени действия, сокращение сроков и снижение стоимости выполнения конкретных заданий [3, 4]. Альтернативное коммуникационное решение для систем с несколькими БЛА — организация сетей FANET.

В типичной структуре FANET в то время, когда одни БЛА связываются с базовой станцией, другие могут получать данные непосредственно через каналы связи с соседними БЛА, минуя базовую станцию. Пример структуры сети FANET приведен на рис. 2 [5].

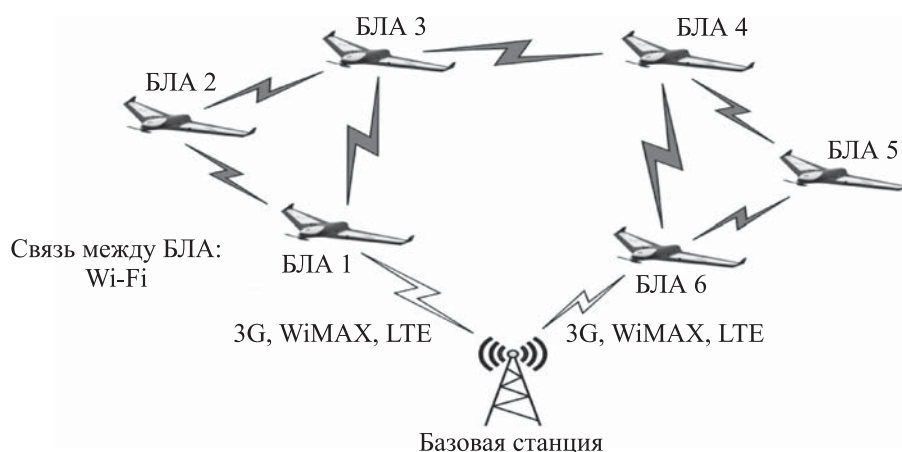


Рис. 2. Пример структуры сети FANET

Приведенная структура сети FANET представляет собой топологию ячеистой сети, узлы которой связываются друг с другом в воздушном пространстве с использованием стандартных беспроводных технологий передачи данных (например, Wi-Fi). Взаимодействие между узлом-источником и узлом-получателем осуществляется случайно через цепочку промежуточных узлов сети. Таким образом, узлы сети не только получают данные, но и выполняют функции маршрутизатора, обеспечивая доставку данных. При взаимодействии узлов сети с базовой станцией используются мобильные сети сотовой связи (3G, WiMAX, LTE).

Сети FANET могут быть применены при решении широкого спектра задач для гражданского сектора экономики, включая [6]:

- мониторинг участков местности в процессе осуществления поисковых и других видов аварийно-спасательных работ, создание условий для

организации временной связи в районах ликвидации последствий стихийных бедствий;

– обеспечение и сопровождение работ при проведении экологического контроля территорий и акваторий, зондирования и аэрофотосъемки земной поверхности;

– сбор данных и контроль загрязнений окружающей среды, территорий возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, состояния трасс газо- и нефтепроводов, лесных и сельскохозяйственных угодий, линий электропередач, движения транспортных средств на автомобильных магистралях.

Пример использования сети FANET для контроля дорожного движения приведен на рис. 3.



Рис. 3. Пример использования сети FANET для контроля дорожного движения

Несмотря на то что сети FANET во многом схожи с сетями MANET и VANET, они характеризуются следующими отличительными свойствами [7].

1. Крайне высокая степень мобильности узлов. Узлы сети (БЛА) перемещаются в воздушном пространстве со скоростью 30...460 км/ч, что приводит к динамичным изменениям в топологии сети и ее разделении (разрывам каналов связи между узлами).

2. Разнообразные модели мобильности узлов. Как правило, движение узлов в сети predetermined, т. е. оно задается некоторым алгоритмом. Однако в реальной среде движение узлов может быть изменено вследствие действия внешних факторов (погодные условия, характер выполняемых задач и т. п.). В соответствии с этим существует несколько моделей мобильности узлов, образующих сети типа FANET, которые могут быть условно распределены на пять типов [8].

2.1. Случайные модели мобильности (Randomized Mobility Model) — простейшие модели движения, используемые при исследовании сетей.

В этих моделях движение узла не зависит ни от поведения других узлов сети, ни от предыдущих действий узла. Каждый узел выбирает произвольное направление движения и скорость, с которой он будет перемещаться в определенный промежуток времени. Примеры случайных моделей мобильности: RW (Random Walk — случайная прогулка); RWP (Random Way-Point — случайная точка пути); RD (Random Direction — случайное направление); MG (Manhattan Grid — манхэттенская сеть), использующая топологию реальной транспортной сети, где узлы должны менять траекторию движения то в горизонтальном, то в вертикальном направлении, учитывая особенности карты местности.

2.2. Модели мобильности, зависящие от пространственно-временных характеристик (Time/Space Dependent Mobility Models). Эти модели основаны на устранении резких изменений скорости и траектории движения узлов. Текущая скорость и траектория движения узлов выбираются на основе соотношений с траекторией и скоростью движения узлов на предыдущем шаге. Примеры: BSA (Boundless Simulation Area — безграничная область моделирования); GM (Gauss — Markov — модель Гаусса — Маркова); ST (Smooth Turn — плавный поворот), позволяющая узлам сети двигаться по криволинейным траекториям и выбирать в пространстве определенные точки, которые будут являться конечными пунктами их траектории.

2.3. Модели мобильности с заранее определенной траекторией (Path-Planned Mobility Models), устанавливающие для узлов сети траекторию определенной формы. Узлы следуют по определенной траектории до тех пор, пока не достигнут конечной точки этой траектории, затем узлы выбирают случайным образом новую траекторию или повторяют движение по той же самой траектории. К ним относят такие модели, как SRCM (Semi-Random Circular Movement — полуслучайное круговое движение), предназначенные для криволинейных траекторий движения узлов сети; PPRZM (Paparazzi Mobility Model — мобильная модель папарацци), являющаяся примером стохастических моделей мобильности, которые основаны на автомате состояний, содержащем возможные траектории движения узла сети.

2.4. Модели групповой мобильности (Group Mobility Models), которые накладывают определенные пространственные ограничения на все узлы сети. Модель мобильности RPGM (Reference Point Group Mobility — мобильность группы контрольных точек) имитирует случайные движения узла сети рядом с отправной точкой, используя модель RWP. В модели NC (Nomadic Community — кочевое сообщество) каждый узел перемещается вокруг отправной точки, которая также перемещается в пространстве

случайным образом. Модель PRS (Pursue — преследование) похожа на модель NC, но узлы сети пытаются следовать за определенной целью, не прибегая к случайным движениям около нее.

2.5. Модели мобильности, основанные на контроле топологии сети (Topology-Control Based Mobility Models), используют в случаях, когда необходимо отслеживать топологию сети в режиме реального времени. Классический пример — модель DPR (Distributed Pheromone Repel — распределенное отражение феромонов), применяемая в сетях, которые предназначены для поисковых операций, где каждый узел отмечает на карте сканируемые области и транслирует эти данные в сеть. Модель SDPC (Self-Deploy Point Coverage — самостоятельное развертывание точечного покрытия) предложена для решения проблем в зонах стихийных бедствий путем развертывания сети узлов в целях создания такой коммуникационной инфраструктуры, которую могут использовать как большее число пострадавших.

3. Достаточно низкая плотность узлов. Узлы сети распределены в воздушном пространстве, а расстояние между БЛА может составлять несколько километров.

4. Более динамичные и частые изменения топологии сети. Крайне высокая степень мобильности узлов сети, отказы в их работе, добавления к сети новых узлов и перебои в работе каналов связи приводят к более быстрым и частым изменениям топологии сети.

5. Оптимизация энергопотребления и времени действия сети. У маломерных БЛА запаса мощности для осуществления полета и организации связи может быть недостаточно, что приводит к сокращению времени действия сети и прекращению выполнения задач.

6. Адаптивность к быстро меняющимся текущим наборам параметров сети. Многие параметры сети на основе БЛА изменяются во время выполнения задач. Сеть должна адаптироваться в соответствии с плотностью узлов, расстоянием между узлами и изменениями условий окружающей среды.

7. Особые модели распространения радиоволн. Рабочая среда сети обладает проблемами, оказывающими влияние на характеристики распространения радиоволн, а именно большие различия расстояний между узлами; типы антенн (всенаправленного или узконаправленного действия); воздействие положения БЛА относительно земной поверхности (тангаж, крен, рыскание и т. п.) на качество радиосвязи; природно-климатические условия; интерференция и помехозащищенность от деструктивного воздействия.

8. Ограничения платформы БЛА. Применение малоразмерных БЛА накладывает ограничения на размеры и вес полезной нагрузки для размещения на борту необходимого вычислительного и коммуникационного оборудования, что существенно влияет на производительность сети.

9. Устойчивость полета БЛА. Малоразмерные БЛА в большей степени зависят от условий окружающей среды, в частности подвержены неустойчивым потокам естественной турбулентности атмосферы, особенно в условиях плотной городской застройки.

10. Необходимость точного определения местоположения узлов. Вследствие высокой скорости и различных моделей мобильности систем с БЛА требуются более точные данные о местоположении узлов с меньшими временными интервалами, что достигается за счет применения GPS с инерциальным измерительным блоком.

Характерные отличительные свойства беспроводных самоорганизующихся сетей на основе БЛА создают необходимость в детальном анализе особенностей и методов определения маршрутов доставки данных, обеспечивающих максимальную производительность и минимальные затраты, для их дальнейшей реализации.

Динамическая маршрутизация в беспроводных самоорганизующихся сетях на основе беспилотных летательных аппаратов. Одним из факторов, препятствующим популяризации сетей FANET, является необходимость использования протоколов маршрутизации, учитывающих их специфические свойства.

Маршрутизация (Routing) — процесс принятия решения, какой маршрут будет использован для пересылки пакетов данных от узла-источника до узла-получателя. В сетях FANET каждый узел отвечает за хранение и пересылку данных, поддерживая информацию о топологии сети. Узлы сети могут перемещаться динамически, постоянно изменяя топологию, при этом ресурсы бортового оборудования БЛА по вычислительным возможностям, пропускной способности и энергии ограничены. Узлы сети могут отключаться и подключаться, выходить за пределы диапазона передачи и т. д. Такие ситуации приводят к созданию несвязных сегментов сети [9]. Протокол маршрутизации должен решать эту проблему. Выбор протокола маршрутизации зависит от сценария использования, параметров и требований сети.

В связи с этим разработка новых (подход 1), адаптация и усовершенствование существующих (подход 2) протоколов маршрутизации являются актуальными направлениями исследований. Хотя подход 1 позволяет разрабатывать протоколы маршрутизации, удовлетворяющие всем

характерным свойствам сети FANET, подход 2 получил большее распространение, поскольку имеет преимущества, включая сохранение совместимости с такими типами беспроводных самоорганизующихся сетей, как MANET, VANET и WSN (Wireless Sensor Network — беспроводная сенсорная сеть), а также с другими разновидностями узлов (например, мобильные устройства, наземные транспортные средства, сенсорные узлы).

В общем случае к протоколам маршрутизации для сети FANET предъявляются следующие требования [10, 11]:

- высокая устойчивость к более динамичным и частым изменениям топологии сети, быстрая сходимость (построение маршрута);
- поддержка механизмов защиты от заикливания маршрутов и механизмов обнаружения недоступных маршрутов, их удаления и восстановления;
- обеспечение минимальной загрузки сети служебной информацией, низкой задержки, джиттера и поддержки QoS (Quality of Service — качество обслуживания);
- поддержка нескольких маршрутов доставки данных до пункта назначения с более высокой степенью надежности;
- относительно невысокая вычислительная сложность и энергопотребление;
- обеспечение безопасности и защищенности процессов определения маршрутов доставки пакетов данных, а также минимальных накладных расходов на маршрутизацию.

Следует отметить, что отдельные требования могут противоречить друг другу, поэтому в большинстве случаев необходим компромисс по удовлетворению нескольких взаимоисключающих требований, обусловленный поставленной задачей, сценарием применения или используемым приложением. Вместе с тем сети типа FANET, являясь подмножеством MANET и VANET, обладают собственными методами и техниками, применяющимися для маршрутизации данных.

Техники маршрутизации данных в беспроводных самоорганизующихся сетях на основе беспилотных летательных аппаратов. Для правильного функционирования процесса доставки данных в беспроводных самоорганизующихся сетях на основе БЛА техники маршрутизации должны быть адаптированы как к моделям мобильности, так и к рабочей среде, характерной для сетей FANET. Наиболее распространенные техники, применяющиеся для маршрутизации данных в FANET, перечислены ниже [12, 13].

Техника маршрутизации Store-Carry and Forward (хранение, перенос и пересылка). Используется тогда, когда сеть подключена динамически и пересылающие пакеты данных узлы не находят ни одного промежуточного (ретрансляционного) узла (рис. 4).

В определенный момент, когда в сети происходят периодические нарушения связи, узел-источник может не обнаружить узел, которому он мог бы передать пакет данных. Как следствие, узел-источник не может отправить пакет данных к определенному узлу сети, который находился бы в радиусе его передачи (Transmission Range). В таком случае узлу-источнику необходимо физически перемещаться в пространстве до тех пор, пока в его радиус действия не попадет какой-либо узел сети, которому он мог бы передать этот пакет данных (или узел, которому предназначается этот пакет данных).

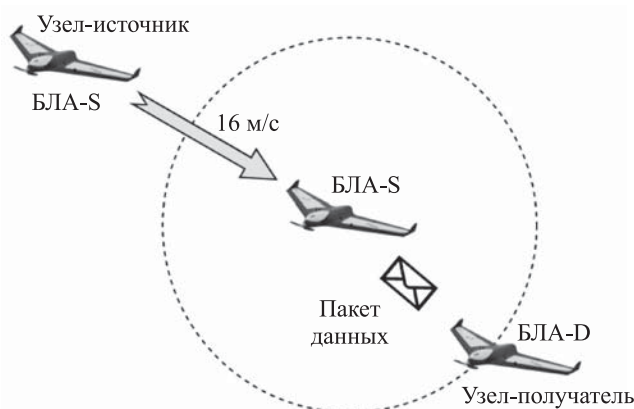


Рис. 4. Техника маршрутизации Store-Carry and Forward

Техника маршрутизации Greedy Forwarding («жадная» переадресация). Применяется в случае, если сеть имеет высокую плотность (содержит достаточно большое число узлов). Цель техники маршрутизации (рис. 5) — минимизация числа переходов, которые может совершить пакет данных во время его передачи от узла-источника к узлу-получателю. Принцип работы техники заключается в том, что на каждом шаге в качестве узла ретрансляции выбирается тот узел сети, который с географической позиции находится ближе всего к узлу-получателю и т. д., пока пакет данных не достигнет пункта назначения.

Вместе с тем процесс передачи пакета данных может быть заблокирован в случае, если узел сети, которому передаются данные, будет признан ближайшим по отношению к узлу-получателю, но в радиусе его действия не окажется ни одного узла (включая и узел-получатель), которому он по-

тенциально мог бы передать пакет данных для продолжения процесса маршрутизации. Тогда для обеспечения надежности передачи данных необходимо использовать предложенный подход в комбинации с другими методами.

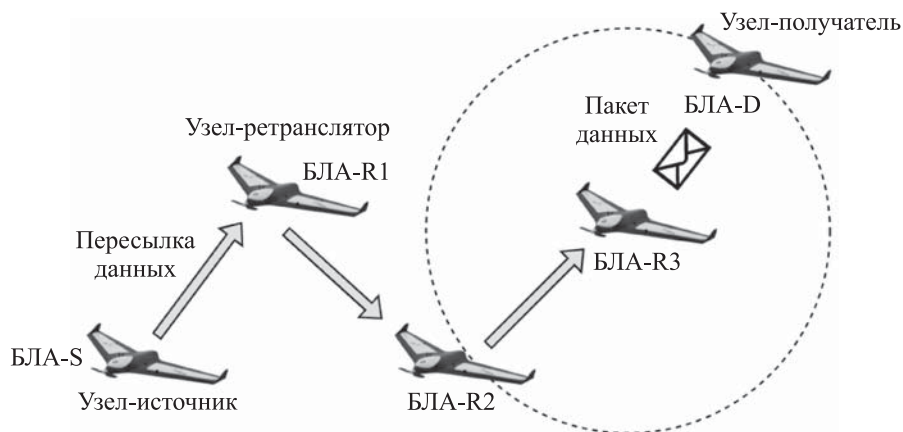


Рис. 5. Техника маршрутизации Greedy Forwarding

Техника маршрутизации Path Discovery (обнаружение пути). Используется и разворачивается в том случае, когда узлу-источнику неизвестно географическое положение узла-получателя (рис. 6).

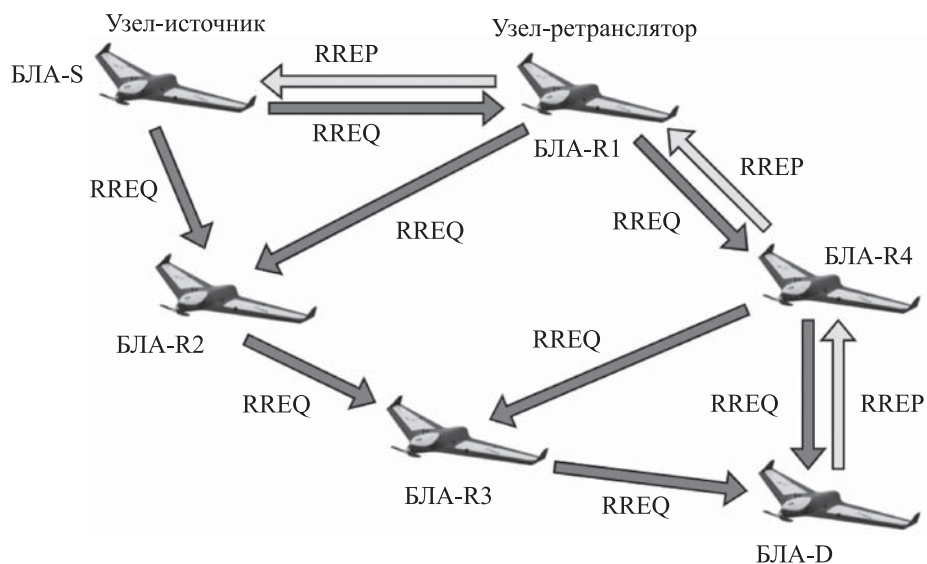


Рис. 6. Техника маршрутизации Path Discovery

Процесс обнаружения состоит в том, что узел-источник, если у него есть пакеты данных, которые он желает отправить в сеть, инициализирует широковещательную рассылку запросов установления маршрута

RREQ (Route Request — запрос маршрута) для поиска всех возможных путей к узлу-получателю.

Далее каждый узел сети, принимающий запрос RREQ, либо возвращает пакет с ответом о нахождении маршрута RREP (Route Reply — ответ на запрос маршрута), либо пересылает его соседям при условии, что этот узел не является получателем. Когда все возможные пути обнаружены, подходящий маршрут для пересылки данных выбирается в соответствии с определенными критериями. Затем этот маршрут используется для передачи пакета данных от узла-источника до узла-получателя.

Техника маршрутизации Single-Path (однопутевая). Применяется для передачи данных между двумя узлами сети с использованием единого пути маршрутизации (рис. 7).

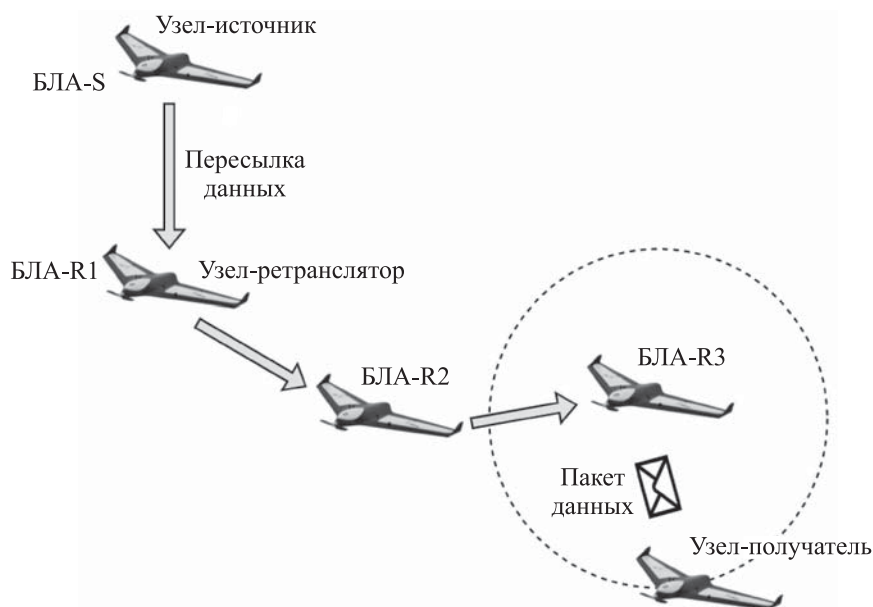


Рис. 7. Техника маршрутизации Single-Path

Принцип работы техники состоит в поиске и установлении одного пути от узла-источника до узла-получателя, что может упростить обработку таблиц маршрутизации в каждом узле сети. Однако основным недостатком такой техники является то, что когда в сети по каким-либо причинам возникает нарушение связи между узлами (БЛА) и нет альтернативного пути для пересылки данных, это может привести к критическим потерям пакетов данных.

Техника маршрутизации Multi-Path (многопутевая). Используется для решения проблемы однопутевой маршрутизации (рис. 8). При при-

менении указанной техники осуществляется поиск сразу нескольких путей доставки пакета данных от узла-источника к узлу-получателю. Эта техника эффективна, так как в случае возникновения каких-либо неисправностей в сети, они быстро и легко обнаруживаются и пакет данных направляется по альтернативному пути доставки. Недостаток — довольно сложно сконфигурировать такую технику маршрутизации, поскольку даже незначительные ошибки могут приводить к появлению петель маршрутизации, блокирующих процесс доставки данных в сети.

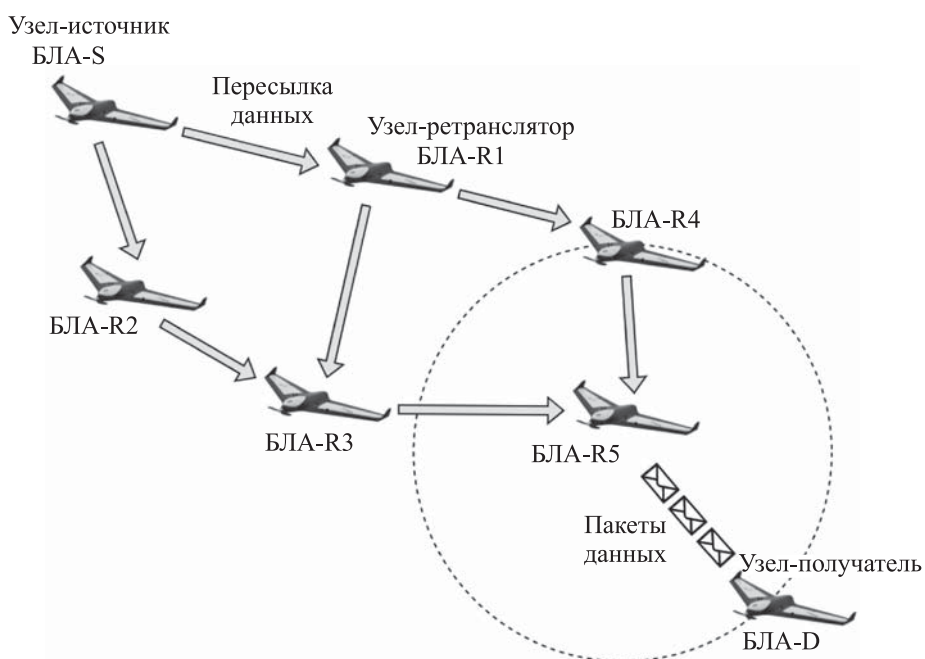


Рис. 8. Техника маршрутизации Multi-Path

Техника маршрутизации Prediction (прогнозирование). Считается наиболее популярным подходом среди техник маршрутизации, используемых в сетях типа FANET (рис. 9). Принцип действия техники заключается в предсказании позиции узла сети в определенный момент времени, основываясь на его текущем географическом положении, направлении и скорости движения. Эти параметры дают точную информацию о местоположении следующего узла ретрансляции, что значительно снижает потери пакетов данных, а иногда и уменьшает сквозную задержку между двумя взаимодействующими узлами сети.

Классификация и краткий обзор протоколов маршрутизации беспроводных самоорганизующихся сетей на основе беспилотных летательных аппаратов. Выбор протокола маршрутизации — важный аспект

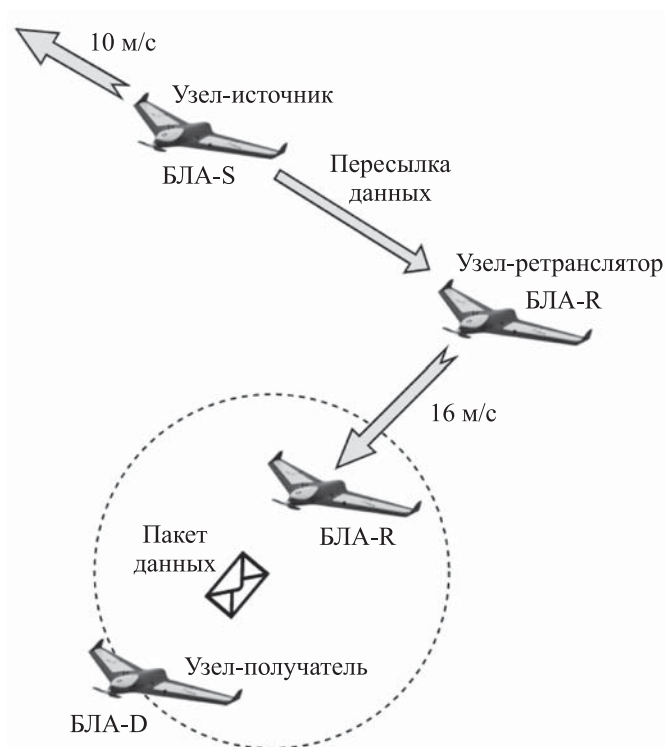


Рис. 9. Техника маршрутизации Prediction

для обеспечения эффективного функционирования сети. Число существующих протоколов маршрутизации для сетей FANET достаточно велико, что объясняется разнообразием сценариев их применения, предъявляемыми требованиями к передаваемым и циркулирующим в сетях подобного типа потокам данных (информации), ограничениями аппаратного и (или) программного обеспечения.

Протоколы маршрутизации сетей FANET можно условно разделить на пять базовых категорий в соответствии с используемой техникой и принципом работы каждого протокола [14–17]. Классификация протоколов маршрутизации сетей FANET приведена на рис. 10.

Категория 1. Проактивные (управляемые таблицами) протоколы маршрутизации. Предполагают наличие на каждом узле сети глобальной таблицы маршрутизации, содержащей полную информацию о сетевой топологии, позволяющей достичь любого узла. Неотъемлемая часть таких протоколов — механизм управления, который устанавливает и закрывает логические соединения между узлами сети, находящимися в зоне радиовидимости. Проактивные протоколы обеспечивают минимальную задержку доставки пакетов данных, а при изменении топо-

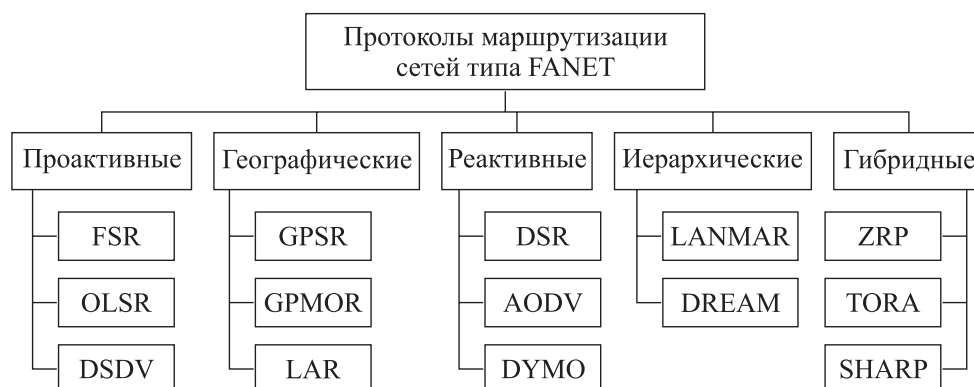


Рис. 10. Классификация протоколов маршрутизации сетей типа FANET

логии сети инициируется широковещательная рассылка сообщений об этих изменениях. К числу проактивных протоколов маршрутизации относят:

- FSR (Fisheye State Routing — маршрутизация состояния «рыбий глаз»), особенность которого заключается в том, что сообщения о состоянии канала LSA (Link-State Advertisement) генерируются с использованием последовательности различных значений времени жизни TTL (Time to Live) пакета данных, вследствие чего каждый узел имеет все менее обновляемую информацию о топологии сети по мере увеличения расстояния. В результате уменьшается общий объем циркулирующей в сети информации;

- OLSR (Optimized Link-State Routing — оптимизированная маршрутизация состояния канала), использующий обмен сообщениями приветствия и управления топологией для обнаружения и последующего распространения информации о состоянии канала по всей сети;

- DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector — дистанционно-векторный упорядоченный по назначению), основанный на идее классического алгоритма Беллмана — Форда с некоторыми улучшениями. Протокол рассчитывает и выбирает кратчайший путь (с минимальным расстоянием) из нескольких путей для отправки пакетов данных от узла-источника к узлу-получателю.

Категория 2. Реактивные (с запросом по требованию) протоколы маршрутизации. Начинают поиск маршрута только при необходимости передачи пакета данных. При первоначальном определении маршрута пакеты данных отправляются по всем возможным направлениям, а в заголовках добавляется информация о пройденном узле сети. В результате по достижении цели заголовок пакета данных содержит полностью сфор-

мированный маршрут между заданными узлами сети. В случае возникновения петель, т. е. повторного приема первого пакета данных, узел сети уничтожает этот пакет.

Реактивные протоколы маршрутизации:

– DSR (Dynamic Source Routing — динамическая маршрутизация от источника), формирующий маршрут по требованию посредством передачи широковещательного запроса и использующий явную маршрутизацию, не полагаясь на таблицы маршрутизации на промежуточных (ретрансляционных) узлах сети;

– AODV (Ad-Hoc On-demand Distance Vector — специальный дистанционно-векторный по запросу), инициализирующий процесс поиска и поддержания маршрута по требованию. Основан на идее формирования динамической таблицы маршрутизации, поддерживаемой всеми узлами сети и содержащей по одной записи на каждый известный путь;

– DYMO (Dynamic MANET On-demand — динамическая мобильная специальная сеть по запросу), полагающийся на быстрое распространение пакетов запроса маршрута по сети для поиска маршрутов между узлом-источником и узлом-получателем. Хотя этот процесс обычно основан на широковещательной рассылке, ответные сообщения маршрутизации, которые возвращаются узлу-источнику, базируются на одноадресной рассылке. Таким образом, при достижении запроса маршрута адреса назначения полный двусторонний путь следования становится доступным для всех связующих узлов сети.

Категория 3. Гибридные протоколы маршрутизации. Сочетают в себе механизмы проактивных и реактивных протоколов маршрутизации на разных уровнях иерархии, определяя, кроме метода поиска маршрута, метод разбиения сети на иерархические структуры или домены. Недостатки гибридных протоколов: относительная сложность реализации и снижение эффективности маршрутизации, связанные с необходимостью разбиения структуры сети на кластеры. Гибридные протоколы маршрутизации:

– ZRP (Zone Routing Protocol — протокол зональной маршрутизации), подразумевающий разбиение структуры сети на зоны. При этом внутри зон функционирует проактивная маршрутизация с использованием протокола внутризональной маршрутизации (Intra-zone Routing Protocol, IARP), а взаимодействие между зонами организовано на основе реактивной маршрутизации с применением протокола межзональной маршрутизации (Inter-zone Routing Protocol, IERP);

– TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm — алгоритм временно упорядоченной маршрутизации), открывающий маршруты по требованию. Осуществляет поиск нескольких маршрутов к пункту назначения, быстро устанавливает маршруты, сводит к минимуму затраты по актуализации маршрутной информации при изменениях топологии сети, обнаруживает разрывы и прерывания при обратном соединении, создает и поддерживает направленный ациклический граф DAG (Directed Acyclic Graph) от узла-источника к узлу-получателю;

– SHARP (Sharp Hybrid Adaptive Routing Protocol — гибридный протокол адаптивной маршрутизации Sharp), представляющий собой гибридный и адаптивный протокол, который обеспечивает контроль над производительностью на уровне приложений за счет интеграции реактивного и проактивного алгоритмов маршрутизации во временной и пространственной областях. Протокол включает в себя механизм адаптации с низкими накладными расходами и аналитическую модель, позволяющую найти компромисс между проактивным и реактивным протоколами маршрутизации.

Категория 4. Протоколы географической маршрутизации. Предполагают использование информации о географическом положении узлов сети, которые определяют свое местоположение с использованием GPS или другой системы навигации. С помощью этой информации пакеты данных могут быть направлены к месту назначения без знания топологии сети или предварительного обнаружения маршрута. К основным преимуществам таких протоколов относят отсутствие необходимости хранения маршрутной информации на промежуточных узлах и возможность оптимизации маршрутов, исходя из имеющейся информации о местоположении узлов сети.

Примеры протоколов географической маршрутизации:

– GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing — жадная маршрутизация по периметру без сохранения состояния), использующий для пересылки пакетов данных географически ближайшие к месту назначения узлы сети. Пересылка осуществляется на основе жадной стратегии. Процесс ретрансляции пакетов данных промежуточными узлами сети продолжается до достижения пункта назначения. Каждый передаваемый пакет данных включает в себя информацию о местоположении узла-отправителя;

– GPMOR (Geographic Position Mobility Oriented Routing — маршрутизация, ориентированная на географическое положение и мобильность), имеющий возможность определять местоположение узлов сети

не только с использованием данных об их географическом положении, но и с помощью модели мобильности Гаусса — Маркова и применять эту информацию для поиска следующего транзитного участка для пересылки пакета данных;

– LAR (Location-Aided Routing — маршрутизация с учетом местоположения), основанный на применении маршрута узла сети — источника передачи. Протокол использует информацию о местоположении для ограничения области (зоны запроса), где проводится поиск маршрута. Как следствие, число сообщений о запросе искомого маршрута сокращается. Протокол обеспечивает две схемы для определения зоны запроса, в качестве которой выступает наименьшая прямоугольная область сети, включающая в себя узел-источник и узел-получатель.

Категория 5. Иерархические протоколы маршрутизации. Разработаны для решения проблемы масштабируемости сети и используют алгоритмы иерархической кластеризации. Сеть подразделяется на кластеры (уровни, слои, группы или домены). В каждом кластере выбираются главный узел, шлюзы и внутренние узлы. Один из основных недостатков этих протоколов — относительно высокая сложность их реализации и схемы адресации.

Иерархические протоколы маршрутизации:

– LANMAR (Landmark Ad-Hoc Routing — маршрутизация по ориентирам), использующий концепцию «ориентир» для масштабируемой маршрутизации в больших мобильных одноранговых сетях. Протокол объединяет узлы сети в группы по принципу их склонности к совместному передвижению в качестве единой группы. В каждой группе один узел сети динамически назначается так называемой реперной точкой, которая служит своеобразным «маяком» при пересылке пакетов данных между узлами различных групп;

– DREAM (Distance Routing Effect Algorithm for Mobility — алгоритм маршрутизации, соразмерный мобильности и эффекту расстояния), основанный на том, что каждый узел сети знает свои географические координаты через GPS и периодически обменивается ими с другими узлами. Эти координаты сохраняются в таблице маршрутизации — таблице местоположения. В протоколе накладные расходы на маршрутизацию сокращаются за счет того, что частота распространения обновленных сообщений становится пропорциональной мобильности и эффекту расстояния.

Сравнительная оценка пяти базовых категорий протоколов маршрутизации сетей типа FANET обобщена в таблице.

Сравнительная оценка протоколов маршрутизации сетей типа FANET

Критерий оценки	Проактивные	Реактивные	Гибридные	Географические	Иерархические
Способ построения маршрута	Таблица	По запросу	Сочетание механизмов проактивных и реактивных протоколов	Данные о географическом положении узлов	Кластеризация, разбиение сети на отдельные зоны
Вычислительная сложность	Средняя			Высокая	
Размерность сети	Небольшая	Большая	Любая	Большая	
Объем памяти для таблиц маршрутизации	Значительный	Незначительный	Средний	Значительный	Незначительный
Отказоустойчивость	Присутствует				
Эффективность использования пропускной способности	Минимальная		Средняя	Минимальная	Максимальная
Время сходимости	Медленное	Быстрое	Среднее		
Задержка	Низкая	Высокая	Высокая	Низкая	Высокая
Частота возникновения отказов	Низкая		Очень низкая		
Популярность	Средняя		Высокая	Низкая	Высокая

Заключение. В результате исследования характерных отличительных свойств беспроводных самоорганизующихся сетей, основу (узлы) которых составляют БЛА, проведен анализ особенностей и методов определения маршрутов доставки пакетов данных между взаимодействующими узлами сетей подобного типа.

Применяемые в телекоммуникационных сетях с традиционной фиксированной архитектурой технические решения и методы определения маршрутов доставки данных в сетях FANET не приводят к желаемым результатам и не гарантируют необходимой производительности. При этом

FANET, представляя собой подмножество сетей MANET и VANET, имеют собственные техники, применяющиеся для маршрутизации данных. К этим техникам предъявляются требования, учитывающие такие уникальные характеристики сетей подобного типа, как высокая мобильность и низкая плотность узлов, динамичные и частые изменения топологии. Поэтому важным аспектом для создания условий, гарантирующих эффективное функционирование FANET, является выбор приемлемого с позиции обеспечения максимальной производительности и минимальных затрат протокола маршрутизации. Таким образом, вопрос организации процесса принятия решения, какой маршрут будет использован для пересылки пакетов данных от узла-источника до узла-получателя в беспроводных самоорганизующихся сетях на основе БЛА (другими словами, проблема маршрутизации) остается одним из наиболее важных в области изучения, создания и применения сетей подобного типа. В настоящее время к решению этой проблемы не существует общепризнанных и стандартизированных подходов.

Тем не менее дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку новых, адаптацию и усовершенствование существующих методов определения маршрутов доставки данных, удовлетворяющих требованиям и учитывающих характерные отличительные свойства FANET. Это дает основание рассчитывать на появление уникальных протоколов маршрутизации, нацеленных на обеспечение эффективной работы подобных специальных сетей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Wei S., Ge L., Yu W., et al. Simulation study of unmanned aerial vehicle communication networks addressing bandwidth disruptions. *Proc. SPIE*, 2014, vol. 9085. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2050765>
- [2] Bekmezci I., Sahingoz O.K., Temel S. Flying Ad-Hoc networks (FANETs): a survey. *Ad Hoc Netw.*, 2013, vol. 11, iss. 3, pp. 1254–1270. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.12.004>
- [3] Krichen L., Fourati M., Fourati L.C. Communication architecture for unmanned aerial vehicle system. In: Montavont N., Papadopoulos G. (eds). *Ad-Hoc, Mobile, and Wireless Networks. ADHOC-NOW 2018. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 11104. Cham, Springer, pp. 213–225. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-00247-3_20
- [4] Чертова О.Г., Чиров Д.С. Построение опорной сети связи на базе малоразмерных беспилотных летательных аппаратов с отсутствием наземной инфраструктуры. *Наукоёмкие технологии в космических исследованиях Земли*, 2019, т. 11, № 3, с. 60–71.

- [5] Hentati A.I., Fourati L.C. Comprehensive survey of UAVs communication networks. *Comput. Stand. Interfaces*, 2020, vol. 72, art. 103451.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csi.2020.103451>
- [6] Bujari A., Calafate C.T., Cano J.C., et al. Flying Ad-Hoc network application scenarios and mobility models. *Int. J. Distrib. Sens. Netw.*, 2017, vol. 13, no. 10.
DOI: <https://doi.org/10.1177/1550147717738192>
- [7] da Cruz E.P.F. A comprehensive survey in towards to future FANETs. *IEEE Lat. Am. Trans.*, 2018, vol. 16, iss. 3, pp. 876–884. DOI: <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8358668>
- [8] Bujari A., Palazzi C.E., Ronzani D. FANET application scenarios and mobility models. *Proc. DroNet'17*, 2017, pp. 43–46. DOI: <https://doi.org/10.1145/3086439.3086440>
- [9] Kerrache C.A., Barka E., Lagraa N., et al. Reputation-aware energy-efficient solution for FANET monitoring. *Proc. WMNC*, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1109/WMNC.2017.8248851>
- [10] Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks. *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 2016, vol. 18, iss. 2, pp. 1123–1152.
DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2495297>
- [11] Shi W., Zhou H., Liet J., et al. Drone assisted vehicular networks: architecture, challenges and opportunities. *IEEE Netw.*, 2018, vol. 32, iss. 3, pp. 130–137.
DOI: <https://doi.org/10.1109/MNET.2017.1700206>
- [12] Oubbati O.S., Lakas A., Zhou F., et al. A survey on position-based routing protocols for flying Ad-Hoc networks (FANETs). *Veh. Commun.*, 2017, vol. 10, pp. 29–56.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2017.10.003>
- [13] Nayyar A. Flying Adhoc network (FANETs): simulation based performance comparison of routing protocols: AODV, DSDV, DSR, OLSR, AOMDV and HWMP. *Proc. icABCD*, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICABCD.2018.8465130>
- [14] Khan M.A., Safi A., Qureshi M.I., et al. Flying Ad-Hoc networks (FANETs): a review of communication architectures, and routing protocols. *Proc. INTELLECT*, 2017.
- [15] Chriki A., Touati H., Snoussi H., et al. FANET: communication, mobility models and security issues. *Comput. Netw.*, 2019, vol. 163, art. 106877.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.106877>
- [16] Lakew D.S., Sa'ad U., Dao N.N., et al. Routing in flying Ad-Hoc networks: a comprehensive survey. *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 2020, vol. 22, iss. 2, pp. 1071–1120.
DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.2982452>
- [17] Tareque Md.H., Hossain Md.S., Atiquzzaman M. On the routing in flying Ad-Hoc networks. *Proc. FedCSIS*, 2015. DOI: <https://doi.org/10.15439/2015F002>

Кулагин Глеб Игоревич — аспирант кафедры «Информационная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кулагин Г.И. Анализ особенностей и методов определения маршрутов доставки данных в беспроводных самоорганизующихся сетях на основе беспилотных летательных аппаратов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2023, № 1 (142), с. 60–82. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-1-60-82>

ANALYSIS OF FEATURES AND METHODS FOR DATA DELIVERY ROUTES DETERMINATION IN THE WIRELESS SELF-ORGANIZING NETWORKS BASED ON THE UNMANNED AERIAL VEHICLES

G.I. Kulagin

gleb.kulagin@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Currently, one of the promising areas in the development of network technologies is the wireless self-organizing networks based on the unmanned aerial vehicles, i.e., FANET (Flying Ad-Hoc Networks), which most important task in the course of their operation lies in organizing the effective data exchange. The distinctive properties of wireless self-organizing networks with altering topology are leading to the fact that technical solutions and methods of determination of the data delivery routes used in telecommunication networks with the traditional fixed architecture turn out to be inefficient in the special FANET networks and are not able to provide the required performance. At the same time, wireless self-organizing networks based on the unmanned aerial vehicles possess their own techniques used in data routing, which are subject to the requirements that take into account characteristic differences inherent in the networks of this type, including high mobility and low density of the nodes, dynamic and frequent topology alterations. Features and methods for determining data delivery routes were analyzed in the wireless self-organizing networks, which basis (nodes) were the unmanned aerial vehicles

Keywords

Wireless Ad Hoc Networks, unmanned aerial vehicles, routing, routing protocols, FANET

Received 27.05.2022

Accepted 04.10.2022

© Author(s), 2023

REFERENCES

[1] Wei S., Ge L., Yu W., et al. Simulation study of unmanned aerial vehicle communication networks addressing bandwidth disruptions. *Proc. SPIE*, 2014, vol. 9085. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2050765>

- [2] Bekmezci I., Sahingoz O.K., Temel S. Flying Ad-Hoc networks (FANETs): a survey. *Ad Hoc Netw.*, 2013, vol. 11, iss. 3, pp. 1254–1270.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.12.004>
- [3] Krichen L., Fourati M., Fourati L.C. Communication architecture for unmanned aerial vehicle system. In Montavont N., Papadopoulos G. (eds). *Ad-Hoc, Mobile, and Wireless Networks. ADHOC-NOW 2018. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 11104. Cham, Springer, pp. 213–225. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-00247-3_20
- [4] Chertova O.G., Chirov D.S. Building a core communication network which is based on small size unmanned aircraft vehicle without ground infrastructure. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli* [High Technologies in Earth Space Research], 2019, vol. 11, no. 3, pp. 60–71 (in Russ.).
- [5] Hentati A.I., Fourati L.C. Comprehensive survey of UAVs communication networks. *Comput. Stand. Interfaces*, 2020, vol. 72, art. 103451.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csi.2020.103451>
- [6] Bujari A., Calafate C.T., Cano J.C., et al. Flying Ad-Hoc network application scenarios and mobility models. *Int. J. Distrib. Sens. Netw.*, 2017, vol. 13, no. 10.
DOI: <https://doi.org/10.1177/1550147717738192>
- [7] da Cruz E.P.F. A comprehensive survey in towards to future FANETs. *IEEE Lat. Am. Trans.*, 2018, vol. 16, iss. 3, pp. 876–884. DOI: <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8358668>
- [8] Bujari A., Palazzi C.E., Ronzani D. FANET application scenarios and mobility models. *Proc. DroNet'17*, 2017, pp. 43–46. DOI: <https://doi.org/10.1145/3086439.3086440>
- [9] Kerrache C.A., Barka E., Lagraa N., et al. Reputation-aware energy-efficient solution for FANET monitoring. *Proc. WMNC*, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1109/WMNC.2017.8248851>
- [10] Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks. *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 2016, vol. 18, iss. 2, pp. 1123–1152.
DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2495297>
- [11] Shi W., Zhou H., Liet J., et al. Drone assisted vehicular networks: architecture, challenges and opportunities. *IEEE Netw.*, 2018, vol. 32, iss. 3, pp. 130–137.
DOI: <https://doi.org/10.1109/MNET.2017.1700206>
- [12] Oubbati O.S., Lakas A., Zhou F., et al. A survey on position-based routing protocols for flying Ad-Hoc networks (FANETs). *Veh. Commun.*, 2017, vol. 10, pp. 29–56.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2017.10.003>
- [13] Nayyar A. Flying Adhoc network (FANETs): simulation based performance comparison of routing protocols: AODV, DSDV, DSR, OLSR, AOMDV and HWMP. *Proc. icABCD*, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICABCD.2018.8465130>
- [14] Khan M.A., Safi A., Qureshi M.I., et al. Flying Ad-Hoc networks (FANETs): a review of communication architectures, and routing protocols. *Proc. INTELLECT*, 2017.
- [15] Chriki A., Touati H., Snoussi H., et al. FANET: communication, mobility models and security issues. *Comput. Netw.*, 2019, vol. 163, art. 106877.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.106877>

[16] Lakew D.S., Sa'ad U., Dao N.N., et al. Routing in flying Ad-Hoc networks: a comprehensive survey. *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 2020, vol. 22, iss. 2, pp. 1071–1120. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.2982452>

[17] Tareque Md.H., Hossain Md.S., Atiquzzaman M. On the routing in flying Ad-Hoc networks. *Proc. FedCSIS*, 2015. DOI: <https://doi.org/10.15439/2015F002>

Kulagin G.I. — Post-Graduate Student, Department of Information Security, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Kulagin G.I. Analysis of features and methods for data delivery routes determination in the wireless self-organizing networks based on the unmanned aerial vehicles. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2023, no. 1 (142), pp. 60–82 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-1-60-82>