

УДК 681.3

Опыт исследования алгоритмов маршрутизации и передачи данных в ad-hoc-сетях

Д. Ю. Поселенцева

Пермский государственный национальный исследовательский университет
Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15

Е. Б. Замятина

Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"
Россия, 614070, г. Пермь, ул. Студенческая, 38
ezamyatina@hse.ru

Рассматриваются вопросы исследования алгоритмов маршрутизации и передачи данных в мобильных сетях методами имитационного моделирования. Сети этого класса обладают характерными свойствами: динамически перемещающиеся узлы, "ограниченное расстояние" между узлами, отсутствие централизованного узла. При выполнении алгоритмов маршрутизации и передачи данных важно предсказать условия, когда происходит нарушение связности узлов. Имитационные эксперименты выполняются в среде AnyLogic.

Ключевые слова: *ad-hoc-сети; оппортунистические сети; алгоритм маршрутизации; алгоритм передачи данных.*

DOI: 10.17072/1993-0550-2018-4-76-85

Введение

В настоящее время получил широкое распространение класс компьютерных сетей (беспроводных децентрализованных), для которых характерна мобильность: узлы могут перемещаться в пространстве, включаться в сеть или исключаться из нее. Кроме того, для таких сетей характерно ограничение расстояния между узлами. Каждый узел характеризуется мощностью передатчика и чувствительностью приемника сигналов. Если узлы удалены друг от друга менее, чем на определенное расстояние r , тогда можно сказать, что между ними существует связь для передачи сигналов. Если же расстояние между узлами превышает указанную величину расстояния r , то связь между узлами может быть прервана, поскольку непосредственной связи нет.

© Поселенцева Д. Ю., Замятина Е. Б., 2019

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-47-230003 и Администрации Краснодарского края.

Математической моделью такой сети является граф. Поскольку сеть является мобильной, то и граф является динамическим, в этом графе случайно меняется количество вершин, появляются и исчезают ребра. Работоспособность и качественные характеристики сети в этом случае могут быть описаны через такие характеристики геометрического графа как связность, количество компонент, длины маршрутов и т.д. Граф в какие-то моменты может быть связным, в какие-то – несвязным.

Для некоторой пары вершин в различные моменты времени может не быть вообще маршрутов, может быть единственный маршрут или может существовать несколько маршрутов. Оппортунистическая мобильная система может обеспечить передачу сообщения даже при отсутствии в некоторые периоды времени маршрута между вершинами, одна из которых является источником, вторая – приемником. Этого можно добиться за счет того, что сообщение продвигается от источника сначала к промежуточному узлу (до которого есть маршрут), ожидает в нем (буферизуется), а затем,

продвигается дальше, когда возникает благоприятная возможность (opportunity) из-за перемещения узлов.

Алгоритм маршрутизации должен динамически находить маршрут, складывающийся из частичных маршрутов, для каждого сообщения. Для этого могут использоваться знания, накопленные о системе и ее окружении. Поведение узлов трудно прогнозировать. По этой причине необходимо использовать аппарат теории графов и теории вероятности (случайные графы) [1]. Для анализа информационных потоков в компьютерных сетях, кроме методов, представленных теорией графов, используют аналитические методы теории массового обслуживания и методы имитационного моделирования.

Имитационные модели являются одним из важнейших инструментов для исследования алгоритмов маршрутизации по той причине, что мобильные сети и поведение объектов мобильных сетей являются достаточно сложными и не всегда дают возможность применить аналитические методы. Поскольку математической моделью является динамический граф, то инструментальные средства имитационного моделирования должны быть гибкими и эффективными.

В качестве инструментальных средств была выбрана отечественная система имитационного моделирования AnyLjgic [2].

В настоящее время существует большое количество различных классов мобильных сетей: MANET, VANET, FANET и т.д.

Сосредоточимся на сетях класса FANET, приведем обзор этих сетей и методов их исследования.

Алгоритмы маршрутизации FANET

FANET представляет собой разновидность одноранговой VANET сети (от англ. *Vehicle Ad-hoc Network – самоорганизующаяся сеть транспортных средств*), узлами которой являются БПЛА [3] (беспилотные летающие аппараты).

Перемещения БПЛА в FANET контролируются исключительно алгоритмами, без какого-либо человеческого вмешательства, поэтому БПЛА можно легко развернуть в ad-hoc-сеть [4, 5].

Узлы данной сети связываются посредством беспроводных технологий: WiFi, LTE, WiMAX и т.п.

Хотя FANET во многом схожи с VANET и MANET (от англ. *Mobile Ad-hoc Network – самоорганизующаяся сеть мобильных устройств*), однако при этом FANET имеет и некоторые специфические характеристики.

Модели мобильности FANET и их практическое применение

Существуют два типа связи, которые могут быть установлены в FANET [4]:

- Беспроводное соединение "воздух-воздух" (от англ. *air-to-air*): БПЛА могут связываться друг с другом посредством только лишь ad-hoc архитектуры, чтобы избежать ограничений, связанных с диапазоном передачи, налагаемых связью между БПЛА и наземными базовыми станциями. В дополнение к этому упомянутый выше вид беспроводной связи может быть использован в многошаговых коммуникациях (от англ. *multi-hop communications*), в которых узлы могут передать пакет данных другому узлу, находящемуся вне диапазона.
- Беспроводное соединение "воздух-земля" (от англ. *air-to-ground*): в FANET не все БПЛА могут связываться с различными инфраструктурами (под инфраструктурой здесь и далее понимается совокупность программно-технических комплексов телекоммуникационного взаимодействия), такими как наземные базовые станции или спутники. При этом только некоторые из узлов FANET связываются с инфраструктурами, чтобы улучшить возможности подключения.

Как уже отмечалось ранее, движение узлов в FANET как правило предопределено, т.е. оно задается посредством некоторого алгоритма.

Однако в реальной среде движение узлов может быть изменено из-за некоторых внешних факторов: из-за погодных условий, характера выполняемой сетью миссии и т. п. [4].

В соответствии с этим существует несколько моделей мобильности (от англ. *Mobility models*) узлов, образующих FANET.

Модели мобильности узлов FANET можно классифицировать на пять категорий [6]:

1. Случайная модель мобильности (от англ. *Randomized mobility model*), – простейшая модель движения, которая используется при исследовании сетей.

Поведение отдельно взятого узла сети (его движение) в этом виде моделей мобильности абсолютно не зависит как от поведения других узлов, входящих в данную сеть, так и от предыдущих действий узла. Примерами случайных моделей мобильности могут послужить RW (от англ. *Random Walk*), RWP (от англ. *Random Way-Point*) и RD (от англ. *Random Direction*). В этих моделях мобильности каждый узел выбирает произвольное направление движения и скорость, с которой он будет двигаться в определенный промежуток времени. Еще одним примером такого типа моделей мобильности является модель MG (от англ. *Manhattan Grid*), которая использует топологию реальной транспортной сети. При этом движение узлов сопровождается некоторыми трудностями, так как узлы должны менять траекторию своего движения то в горизонтальном, то в вертикальном направлении, учитывая особенности карты местности (города).

2. Модели мобильности, зависящие от пространственно-временных характеристик (от англ. *Time/space dependent mobility models*), – модели мобильности, принадлежащие данной категории, основаны на устранении резких изменений скорости и траектории движения узлов. Для этого используются различные математические уравнения. Примерами могут послужить следующие модели мобильности: BSA (от англ. *Boundless Simulation Area*), GM (от англ. *Gauss-Markov*). В подобных моделях мобильности текущие скорость и траекторию узлов выбирают на основе соотношений с траекторией и скоростью узлов на предыдущем шаге. Модель мобильности ST (от англ. *Smooth Turn*) позволяет узлам сети двигаться по криволинейным траекториям. При этом в пространстве выбирают определенную точку, которая будет являться конечным пунктом траектории узла.

3. Модель мобильности с заранее определенной траекторией (от англ. *Path-planned mobility models*) – модели мобильности, относящиеся к данной категории, задают для узлов траекторию определенной формы. Узлы следуют по определенной траектории до тех пор, пока они не

дойдут до конечной точки этой траектории, затем узлы выбирают случайным образом новую траекторию или повторяют движение по той же самой траектории. Модель мобильности SRCM (от англ. *Semi-Random Circular Movement*) также относится к указанной категории, так как модель предназначена для случаев, когда узлы сети движутся по криволинейным траекториям. Модель мобильности PPRZM (от англ. *Paparazzi mobility model*) является хорошим примером стохастической модели мобильности. Стохастические модели мобильности основаны на машине состояний, каждое из состояний в которой является одной из возможных траекторий движения узла: Stay-At, Oval, Eight, Scan, Way-Point. Каждый из узлов сети выбирает определенную траекторию и случайную скорость своего движения.

4. Групповые модели мобильности (от англ. *Group mobility models*) – эти модели накладывают определенные пространственные ограничения на все узлы сети. Модель мобильности RPGM (от англ. *Reference Point Group mobility*) имитирует случайные движения узла возле отправной точки, используя при этом простую RWP модель мобильности. Выделяют также особые случаи RPGM: в модели мобильности NC (от англ. *Nomadic Community*) каждый из узлов перемещается возле отправной точки, которая в свою очередь также продвигается в пространстве случайным образом. Модель мобильности PRS (от англ. *Pursue*) похожа на NC, но при этом узлы сети стараются следовать за определенной целью, не прибегая при этом к случайным движениям возле нее.

5. Модели мобильности, основанные на контроле топологии сети (от англ. *Topology-control based mobility models*) – используют в случаях, когда необходимо постоянно в режиме реального времени отслеживать топологию сети. Классическим примером для данной категории моделей мобильности является модель DPR (от англ. *Distributed Pheromone Repel*), которая используется в сетях, предназначенных для рекогносцировки или осуществления поисковых миссий. В этой модели каждый из узлов имеет свою карту феромонов (от англ. *pheromone map*).

Модель мобильности SDPC (от англ. *Self-Deploy Point Coverage*) создана для сетей, которые предназначены для решения проблем, связанных со стихийными бедствиями.

Данная модель разворачивает сеть БПЛА на месте происшествия для того, чтобы создать коммуникационную инфраструктуру, которую могут использовать пострадавшие. Целью каждого из узлов в данной сети является охват как можно большего количества людей и поддержание связи с другими узлами сети. Хотя FANET и является своего рода подклассом MANET- и VANET-сетей, FANET имеет свои собственные техники маршрутизации данных. Эти техники имеют свои достоинства и недостатки.

Далее рассмотрим наиболее популярные на данный момент техники, применяющиеся для маршрутизации данных в FANET, а также будет приведена классификация существующих протоколов маршрутизации.

Техники маршрутизации пакетов данных в FANET

Техника маршрутизации Store-carry and forward

В определенный момент, когда в сети происходят периодические нарушения связи, узел-отправитель может не обнаружить узел, которому бы он мог передать пакет данных. Как следствие, узел-отправитель не может отправить пакет данных к определенному узлу, который находится бы в радиусе его передачи (от англ. *transmission range*). В таком случае узлу-отправителю необходимо самому физически передвигаться в пространстве до тех пор, пока в его радиус действия не попадет какой-либо узел, которому он мог бы передать этот пакет данных (или узел, которому предназначается этот пакет данных) [4, 9].

Протокол маршрутизации LCDR

Наиболее популярный протокол маршрутизации с точки зрения использования и надежности, который основан на данном принципе, несет название LCDR (от англ. *Load, Carry and Deliver Routing*).

Принцип работы данного протокола маршрутизации подробно описан в [8]: данная модель предназначена для передачи данных от одной наземной базовой станции.

Для этого используются БПЛА и одношаговая связь (от англ. *single-hop communication*).

Эта модель подходит для передачи изображений и видео. Для начала данные загружаются с точки доступа на один из БПЛА, а затем БПЛА с данными продвигается к точке доступа получателя, чтобы передать ему пакет данных. С точки зрения безопасности, рассматриваемый протокол маршрутизации достаточно надежен: пакет данных не осуществляет дополнительных "скачков" (от англ. *hops*) в процессе передачи.

Время, необходимое для доставки пакета данных от одной базовой станции до другой, зависит от скорости БПЛА и расстояния между точками доступа.

Одним из вариантов для уменьшения времени доставки пакетов данных является увеличение количества БПЛА, которые получали бы и передавали данные. Кроме того, можно увеличить скорость движения БПЛА или разделить всю сеть на подсети, внутри которых также будет использоваться LCDR-маршрутизация.

Техника маршрутизации Greedy forwarding [4]

Эту технику рекомендуется применять в случае, если FANET имеет высокую плотность (содержит достаточно большое количество узлов). Основная задача "жадной" маршрутизации состоит в минимизации количества "прыжков" пакета с данными в процессе его передачи от узла к узлу.

Принцип работы техники достаточно прост: на каждом шаге необходимо выбирать в качестве узла ретрансляции тот узел, который с географической точки зрения (используя географические координаты узлов) находится ближе всего к узлу-получателю. Процесс пересылки пакета заканчивается тогда, когда пакет доходит до получателя. Однако в этой технике есть некоторые недостатки.

Процесс передачи пакета данных может быть заблокирован в случае, если узел, которому передаются данные, будет признан ближайшим по отношению к узлу-получателю, однако в радиусе его действия не окажется ни одного узла (в т. ч. и узла-получателя), которому он потенциально мог бы передать пакет данных для продолжения процесса маршрутизации.

Для обеспечения надежности передачи данных необходимо использовать предложенный подход в комбинации с другими подходами.

Протокол маршрутизации RGR

Значительные улучшения в технику "жадной" маршрутизации может принести метод RGR (от англ. *Reactive-Greedy-Reactive routing*), предложенный Rostam Shirani в [10].

Данный протокол является типичным представителем протоколов реактивной маршрутизации. Принцип реактивной маршрутизации заключается в том, чтобы найти все возможные пути (от англ. *path discovery*) от источника пакета к узлу-получателю. Однако не стоит путать данный тип маршрутизации с проактивной маршрутизацией: в проактивных протоколах вычисляются все возможные пути между каждой парой узлов, находящихся в сети, поэтому данная техника не совсем подходит для FANET, ввиду высокой динамичности узлов этого вида сетей.

В реактивных протоколах маршрутизации вычисление путей от источника к узлу-получателю происходит "по запросу" (от англ. *on-demand*), когда между двумя узлами невозможно проложить путь по причине того, что узел-отправитель не знает географического местоположения получателя [4]. Процесс поиска путей основан на распространении запросов создания маршрутов (от англ. RREQ). Протокол маршрутизации RGR использует смешанную технику: пакет доставляется с использованием техники реактивной маршрутизации, но если по каким-либо причинам процесс передачи пакета нарушится, то будет использована альтернативная ветвь алгоритма – GGF-маршрутизация.

В статье [10] приведены результаты моделирования с учетом изменения скоростей БПЛА. К реактивным протоколам маршрутизации также можно отнести протоколы AODV и OLSR.

Сотрудники Омского государственного технического университета А.В. Леонов и Г.А. Литвинов в статье [11] дают характеристику рассмотренным выше протоколам, а также демонстрируют результаты моделирования в среде NS-2.

Техники маршрутизации Single-path и Multi-path [2]

Название техники маршрутизации Single-path говорит само за себя – осуществля-

ется поиск одного пути от источника пакета данных к его получателю. Однако стоит отметить главный недостаток данного подхода: если по каким-либо причинам связь в сети будет нарушена (будет потеряна связь между БПЛА или один из узлов, через который проходит найденный путь, будет неисправен), то у пакета не будет альтернативного канала отправки, что может привести к серьезным потерям данных в сети.

Решением данной проблемы может послужить использование техники Multi-path: в ней осуществляется поиск сразу нескольких альтернативных путей доставки пакета от источника к получателю. Этот метод эффективен, так как в случае неполадок в FANET, данная ошибка будет быстро обнаружена, и пакет данных будет направлен по альтернативному пути доставки. Однако и этот метод имеет свои недостатки: довольно сложно сконфигурировать данный тип маршрутизации, потому что даже незначительные ошибки могут привести к появлению "зацикливания" (от англ. *loops*), которые могут блокировать процесс доставки.

Техника маршрутизации Prediction

Принцип работы данного метода маршрутизации заключается в предсказании позиции узла сети в определенном момент времени, основываясь на его текущем географическом местоположении, скорости его движения, направлении его движения и т.п.

Техника, основанная на роевом интеллекте

Особую популярность начал приобретать подход к маршрутизации, основанный на понятии "роевого интеллекта" (от англ. *swarm intelligence*). Термин был предложен в 1989 г. Херардо Бени (Gerardo Beni) и Ван Цзином (Jing Wang) [14]. Алгоритм описывает коллективное поведение децентрализованной самоорганизующейся системы [13]. Подход основывается на моделировании поведения животных или насекомых, которые придерживаются стайного или роевого образа жизни.

В статье [11, 12] А.В. Леоновым было предложено использовать алгоритм "пчелиной колонии" (от англ. *Bee colony algorithm*) [15] для моделирования мобильных сетей.

Алгоритм пчелиной колонии широко известен, тем не менее, опишем его более подробно. Алгоритм имитирует поведение пчелиного роя,

который ищет пыльцу и нектар на определённой территории. В пчелином рое есть четкая дифференциация обязанностей между всеми пчелами, поэтому условно всех пчел роя можно разделить на три группы:

1. Employed bees – пчелы, которые ищут источники нектара на определенной территории, а затем сообщают информацию о качестве исследованной местности другому виду пчел – onlooker bees.

2. Onlooker bees – пчелы, которые принимают информацию о качестве найденных источников нектара от employed bees. Передача данной информации осуществляется при помощи так называемого "виляющего танца" (от англ. *waggle dance*). Движения, которые исполняют при этом пчелы, содержат в себе информацию о размере найденного источника нектара, о его точном местоположении.

3. Scouts – пчелы, которые случайным образом исследуют территорию и находящиеся на этой территории источники нектара. Изначально именно эти пчелы снабжают employed bees информацией о некотором количестве найденных на исследуемой территории источников. Далее employed bees исследуют соседние для найденных источников территории.

Главной целью пчелиного роя является определение самого большого источника нектара (с математической точки зрения это задача оптимизации некоторой целевой функции).

Все рассмотренные выше техники маршрутизации широко используются в реальных FANET. Однако каждая техника маршрутизации имеет свои достоинства и недостатки.

Исследование достоинств и недостатков работы тех или иных протоколов маршрутизации при использовании реальных FANET-сетей является не только трудозатратным и довольно длительным по времени, но и достаточно дорогостоящим делом.

Таким образом, надо найти метод, который смог бы дать возможность выполнять исследовательские эксперименты над постоянно изменяющим свои параметры процессом, не прибегая при этом к работе с реальной системой. При этом необходимо, чтобы данный метод позволял учитывать значительное количество параметров, изменения которых могут привести к изменениям результатов работы алгоритма.

Именно таким методом и является имитационное моделирование.

Подтверждением этого является большое количество публикаций, исследующих мобильные компьютерные сети с привлечением различных инструментальных средств имитационного моделирования [11, 16].

Рассмотрим один из алгоритмов маршрутизации (GGF) и результаты имитационного эксперимента, выполненные с привлечением инструментальных средств AnyLogic [2, 17, 18]. AnyLogic является отечественной разработкой и существует доступная для всех пользователей версия.

Описание алгоритма GGF

Алгоритм "жадной" географической маршрутизации заключается в следующем: узел, который является держателем пакета в текущее время, должен передать данный пакет своему узлу-соседу, который обладает следующими свойствами:

- он должен попадать в радиус действия передачи узла-носителя;
- он должен находиться ближе к получателю пакета, чем текущий узел-носитель и другие его соседние узлы.

Таким образом, выбираемый на каждом шаге работы алгоритма узел должен минимизировать количество пересылок пакета данных от узла к узлу. Маршрутизация будет считаться завершенной успешно, если пакет будет доставлен получателю за время, меньшее (или равное) времени "жизни" пакета.

На рис. 1 представлена блок-схема данного алгоритма.

Моделирование сети при помощи средства ИМ AnyLogic

Для исследования алгоритма GGF была построена имитационная модель с использованием инструментального средства AnyLogic. Язык разработки – Java. Модель позволяет строить маршруты передачи пакетов данных внутри FANET. Узлы могут передвигаться с определенной скоростью по некоторой ограниченной области. При моделировании использовалась модель мобильности RWP.

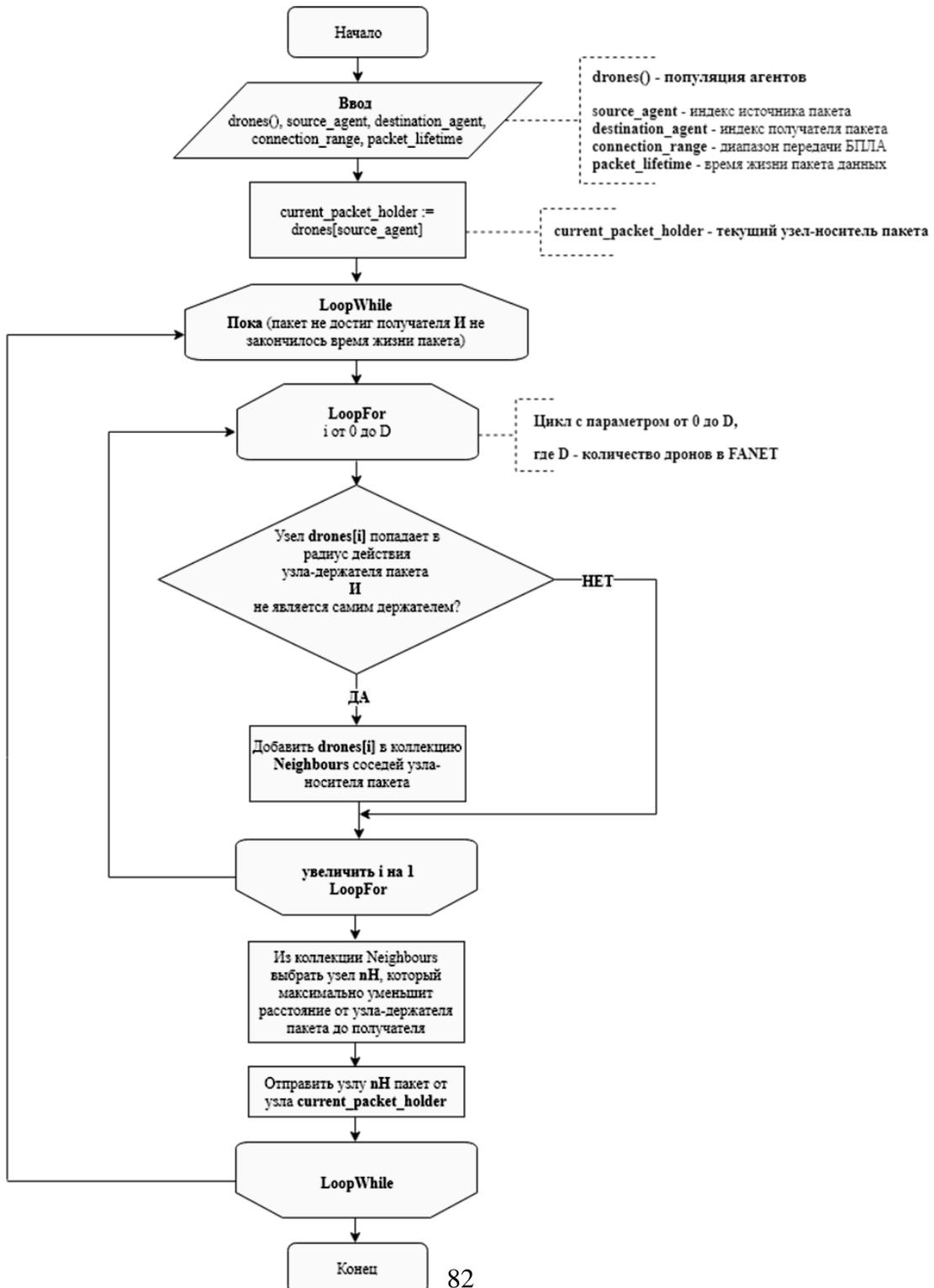
Построенная модель не учитывает некоторых характеристик: бывает, что в реальных FANET возникают технические неполадки, которые могут помешать процессу передачи пакета.

Кроме того, не учитываются внешние воздействия окружающей среды и т. п.

Тест № 1: определение зависимости работы алгоритма от количества узлов в FANET.

Тест № 1.1:

- Количество узлов в сети: 50.
- Тип расположения узлов: Random.
- Диапазон распространения связи: 81,125 у.е.



- Время жизни пакета: 4483,3 мс.
- Индекс узла-источника пакета: 34.
- Индекс узла-получателя пакета: 24.

Рис. 1. Блок-схема алгоритма GGF

Результаты работы алгоритма маршрутизации GGF при заданных параметрах представлены на рис. 2. Количество узлов ретрансляции: 3. Пакет не был доставлен до получателя. Пакет остался у дрона с номером 17.

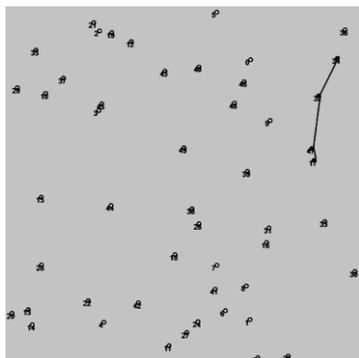


Рис. 2. Тест № 1.1

Тест № 1.2:

Количество узлов в сети: 100.

- Тип расположения узлов: Random.
- Диапазон распространения связи: 81,125 у.е.
- Время жизни пакета: 4483,3 мс.
- Индекс узла-источника пакета: 9.
- Индекс узла-получателя пакета: 3.

Результаты работы алгоритма маршрутизации GGF при заданных параметрах представлены на рис. 3. Количество узлов ретрансляции: 5. Пакет был доставлен до получателя.

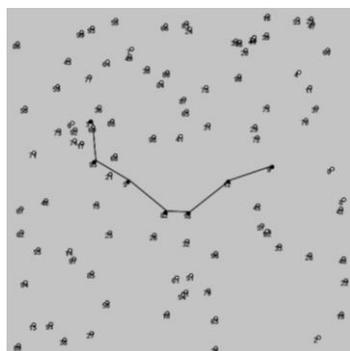


Рис. 3. Тест № 1.2

Тест № 1.3:

- Количество узлов в сети: 200.

- Тип расположения узлов: Random.
- Диапазон распространения связи: 81,125 у.е.
- Время жизни пакета: 4483,3 мс.
- Индекс узла-источника пакета: 93.
- Индекс узла-получателя пакета: 58.

Результаты работы алгоритма маршрутизации GGF при заданных параметрах представлены на рис. 4. Количество узлов ретрансляции: 4. Пакет был доставлен до получателя.

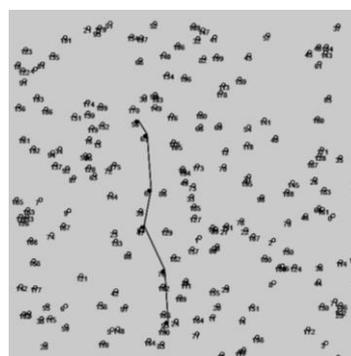


Рис. 4. Тест № 1.3

Тест № 1.4:

- Количество узлов в сети: 400.
- Тип расположения узлов: Random.
- Диапазон распространения связи: 81,125 у.е.
- Время жизни пакета: 4483,3 мс.
- Индекс узла-источника пакета: 4.
- Индекс узла-получателя пакета: 60.

Результаты работы алгоритма маршрутизации GGF при заданных параметрах представлены на рис. 5. Количество узлов ретрансляции: 5. Пакет был доставлен до получателя.

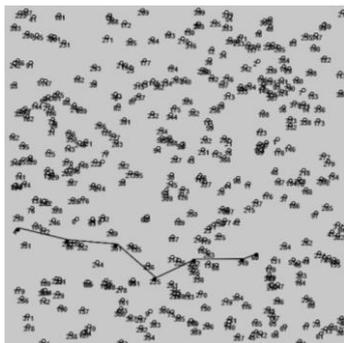


Рис. 5. Тест № 1.4

На тестах 1.2, 1.3 и 1.4 модель дала хорошие результаты.

Пути, проложенные между узлами, можно считать приемлемыми, потому что в них отсутствуют петли, и пакет был доставлен до пункта назначения в каждом из этих случаев.

Однако в тесте № 1.1 обнаруживается проблема: пакет не успел дойти до получателя и остался у дрона № 17 по той причине, что в радиусе действия связи дрона № 17 не оказалось ни одного из дронов, которому он мог бы передать пакет, чтобы процесс продолжился.

Из этого можно сделать вывод, что рассмотренный выше алгоритм показывает хорошие результаты только в сетях с высокой плотностью узлов. Чем больше узлов в сети, тем лучше работает алгоритм.

Тест № 2: определение зависимости работы алгоритма от времени жизни пакета.

При анализе работы алгоритма в зависимости от количества узлов в сети была выявлена проблема блокирования процесса передачи пакета в случае, если в радиусе действия узла нет других узлов. Решением данной проблемы может стать увеличение времени жизни пакета, ведь в таком случае процесс поиска соседних узлов будет происходить дольше, а значит, у пакета появляется дополнительный шанс на успешную передачу. Рассмотрим следующий набор параметров:

- Количество узлов в сети: 50.
- Тип расположения узлов: Random.
- Диапазон распространения связи: 81,125 у.е.
- Время жизни пакета: 20 000 мс.
- Индекс узла-источника пакета: 43.
- Индекс узла-получателя пакета: 44.

Результаты работы алгоритма маршрутизации GGF при заданных параметрах представлены на рис. 7. Количество узлов ре-

трансляции: 7. Пакет был доставлен получателю.

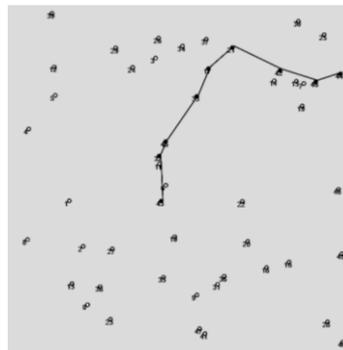


Рис. 7. Тест № 2

Заключение

В работе представлена сравнительная характеристика таких типов ad-hoc сетей, как FANET, MANET и VANET. Были рассмотрены наиболее популярные техники маршрутизации данных в FANET.

В работе представлены возможности использования методов имитационного моделирования и инструментальных средств AnyLogic для изучения и исследования сетей FANET. Построена имитационная модель алгоритма "жадной" географической маршрутизации данных в FANET. Был выявлен недостаток, связанный с применимостью данного алгоритма к FANET-сетям, имеющим низкую плотность узлов. Установлено, что алгоритм показывает хорошие результаты для сетей с высокой плотностью узлов.

Таким образом, алгоритм нуждается в доработках и оптимизации. Одним из вариантов решения этой проблемы может стать реализация алгоритма RGR, который сочетает в себе два альтернативных пути: реактивную маршрутизацию и алгоритм GGF.

Список литературы

1. Миков А.И. Динамические геометрические графы мобильных ad hoc сетей // Информатизация и связь, 2017. № 2. С. 66–70. ISSN 2078-8320.
2. Григорьев И. AnyLogic за три дня. Практическое пособие по имитационному моделированию. URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/2017-uch-posob-grigoriev-anylogic.pdf>. (дата обращения: 10.10.2019).

3. *Леонов А.В., Литвинов Г.А.* Применение алгоритма пчелиной колонии BeeAdHoc для маршрутизации в FANET. URL: http://vestnik.sibsutis.ru/uploads/1522390810_2495.pdf (дата обращения: 10.10.2019).
4. *Sami Oubbati O., Lakas A., Zhou F., Güne, s M., Yagoubi M.B.* A survey on position-based routing protocols for Flying Ad hoc Networks (FANETs), Vehicular Communications, 2017. P. 29–56.
5. *Leonov A.V.* Applying bio-inspired algorithms to routing problems solution in FANET. URL: https://www.researchgate.net/publication/317384612_Applying_BioInspired_Algorithms_to_Routing_Problem_Solution_in_FANET (дата обращения: 10.10.2019).
6. *Bujari A., Palazzi C.E., Ronzani D.* FANET Application Scenarios and Mobility Models. URL: https://www.researchgate.net/publication/317673393_FANET_Application_Scenarios_and_Mobility_Models (дата обращения: 10.10.2019).
7. *Kaur S., Talwar M.* Routing Strategies in Flying Ad-Hoc Networks. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/800d/af523f6f990f50807118a2ac734a7ded37e2.pdf> (дата обращения: 10.10.2019).
8. *Yassein M.B., Damer N.A., Flying M.A.* Ad-Hoc Networks: Routing Protocols, Mobility Models, Issues, International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2016. P. 162–168.
9. *Nadeem A., Alghamdi T., Yawar A., Mehmood A., Siddiqui M.S.* A Review and Classification of Flying Ad-Hoc Network (FANET) Routing Strategies, Journal of Basic and Applied Scientific Research, 2018. P. 1–8.
10. *Shirani R., St-Hilaire M., Kunz T., Zhou Y., Li J., and Lamont L.* On the Delay of Reactive-Greedy-Reactive Routing in Unmanned Aeronautical Ad-hoc Networks, Procedia Computer Science, 2012. P. 535–542.
11. *Leonov A.V.* Application of Bee Colony Algorithm for FANET Routing. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7538709> (дата обращения: 10.10.2019).
12. *Leonov A.V., Litvinov G.A.* Applying AODV and OLSR routing protocols to airto-air scenario in flying ad hoc networks formed by mini-UAVs. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8350612> (дата обращения: 10.10.2019).
13. *Роевой интеллект* // *Википедия*. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Роевой_интеллект (дата обращения: 10.10.2019).
14. *Beni G., Jing W.* Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems, Robots and biological systems: towards a new bionics, 1989. P. 26–30.
15. *Beni G.* From Swarm Intelligence to Swarm Robotics, Lecture Notes in Computer Science, 2004. P. 1–9.
16. *Гудов А.М., Семехина М.В.* Имитационное моделирование процессов передачи трафика в вычислительных сетях. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/imitatsionnoe-modelirovanie-protsessov-peredachi-trafika-v-vychislitelnyhsetyah> (дата обращения: 10.10.2019).
17. *Борщёв А.* От системной динамики и традиционного ИМ – к практическим агентным моделям: причины, технология, инструменты. URL: <http://www.gpss.ru/paper/borshevarc.pdf> (дата обращения: 10.10.2019).
18. *Anylogic*. URL: <https://www.anylogic.ru/> (дата обращения: 10.10.2019).

An experience of routing algorithms and a data transfer algorithms using simulation

D. Yu. Poselentseva

Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia

E. B. Zamyatina

National Research University "Higher School of Economics"
38, Studencheskaya st., Perm, 614070, Russia
e_zamyatina@mail.ru

The problems of routing and data transmission algorithms in mobile networks are considered. Authors use simulation in order to carry out their researches. The class of mobile networks has characteristic properties: dynamically moving nodes, "limited distance" between nodes, and lack of a centralized node. It is important to predict the conditions when the connection failure of nodes occurs during executing routing and data transfer algorithms. Simulation experiments are performed in the AnyLogic environment.

Keywords: *ad-hoc networks; opportunistic networks; routing algorithm; data transfer algorithm.*