

Е.Б. Замятина, А.В. Кудрявцев ¹

Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»

Пермский государственный национальный
исследовательский университет

ezamyatina@hse.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ МАРШРУТИЗАЦИИ AD-HOC-СЕТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АГЕНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В работе рассматриваются различные классы ad-hoc-сетей, алгоритмы маршрутизации, более подробно исследуются алгоритмы маршрутизации сетей FANET. Приведено краткое описание системы имитационного моделирования TriadNS, с помощью которой построена имитационная модель ad-hoc-сети. Обосновывается целесообразность применения агентной парадигмы имитационного моделирования для исследования сетей.

Ключевые слова: имитационное моделирование, агентная технология, протоколы маршрутизации, ad-hoc-сети.

Введение

Благодаря прогрессу в беспроводных технологиях появилось большое количество устройств (GPS, Wi-Fi интерфейсов, компьютеров со встроенными микропроцессорами и т.д.), используемых в повседневной жизни.

Вслед за этими приспособлениями появились достаточно миниатюрные «умные» беспилотные летающие аппараты, что привело к появлению сетей нового вида, несущих название FANET (fly ad hoc network)[1]. С внедрением FANET, возникли различные виды гражданских и военных приложений, предназначенных для координации спасательных команд на земле, пограничного контроля, для кон-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-01-00359

троля сельскохозяйственных угодий, обнаружение нефтяных месторождений и т.д.

Наряду с сетями FANET, развиваются сети VANET (vehicular ad hoc network)[2]. Эти сети предполагают осуществить взаимодействие транспортных средств между собой и с сетью связи общего пользования. Необходимо в автомобиле создавать сетевой интерфейс, который позволил бы поддерживать такие группы соединений, как автомобиль-автомобиль, автомобиль-инфраструктурная сеть, автомобиль-жилье, маршрутизация (архитектура сети VANET предполагает взаимодействие автомобиля, как с другими автомобилями, так и с придорожной сетью). VANET превращает автомобиль в беспроводной узел сети или маршрутизатор.

И для той и для другой сети характерно то, что они могут функционировать без телекоммуникационных операторов (без их инфраструктуры). Все узлы сети взаимодействуют в процессе передачи сообщения. Следует отметить подвижность узлов сети, а эти сети называют “мобильными”[3] (MANET-Mobile Ad hoc Network), сети FANET и VANET являются подклассами мобильных сетей.

Итак, задача мобильных сетей - осуществить передачу данных в сети по определённом алгоритму маршрутизации. Существует большое количество алгоритмов маршрутизации для мобильных сетей, которые мы рассмотрим ниже. Алгоритмы учитывают особенности мобильных сетей различных классов. В этой статье мы более подробно рассмотрим класс мобильных сетей FANET.

При разработке алгоритмов маршрутизации зачастую используют метод имитационного моделирования. Необходимость в моделировании алгоритмов объясняется тем, что при их разработке необходимо добиться достаточно высокой производительности надёжности этих алгоритмов.

Статья включает следующие разделы: первый раздел посвящён различным алгоритмам маршрутизации FANET, во втором разделе рассматриваются система имитационного моделирования TriadNS, далее – лингвистические конструкции языка Triad, которые используют для описания программного агента и результаты тестирования.

Алгоритмы маршрутизации в сети FANET

Существует два типа приложений, работающих с воздушными узлами: (а) одноузловое приложение, в котором воздушный узел находится в центре множества базовых станций, находящихся на земле (узел может быть использован станциями в качестве роутера для коммуникации с другими станциями, находящимися вне их поля диапазона

связи); (б) многоузловое приложение [1].

Если мы используем один узел, то может возникнуть проблемы, а именно: (а) узел может обладать крайне небольшим диапазоном связи, (б) могут возникать помехи в процессе передачи сигнала. По этой причине для передачи данных используют группу воздушных узлов. Преимущества многоузловых приложений заключаются в следующем: (а) многоузловое приложение способствует повышению отказоустойчивости (при выходе из строя одного узла другие узлы берут на себя его работу); (б) отдельные задачи могут выполняться параллельно различными узлами, что в значительной мере уменьшает продолжительность выполнения всего задания в целом. Необходимо учитывать, что для надежной работы алгоритмов маршрутизации необходимо достаточное количество узлов.

Надёжная маршрутизация является важным фактором стабильности приложений и услуг, которые они предоставляют. Существует широкий спектр протоколов маршрутизации, предложенных для FANET. Все эти протоколы призваны улучшить коэффициент доставки пакетов и минимизировать задержки передачи данных, а также, вероятность потери пакетов.

Протоколы маршрутизации FANET можно разделить на три основные категории: (а) протоколы маршрутизации на основе топологии, (б) роевые (Swarm) протоколы маршрутизации, (в) протоколы маршрутизации на основе географического местоположения.

Протоколы маршрутизации, основанные на топологии (скорость перемещения узлов в воздухе невысока, число узлов ограничено) недостаточно изучены для FANET. Дело в том, что, если скорость перемещения узлов высока, то алгоритмы, основанные на топологии, не могут быть применены достаточно успешно. Ещё одним недостатком этих алгоритмов является потребление большего количества ресурсов и энергии (относительно большие затраты памяти, например, для хранения таблиц маршрутизации). Итак, категория протоколов маршрутизации, основанная на топологии, использует IP-адреса для определения узлов и использует существующую информацию о ссылках в сети для пересылки пакетов по соответствующему пути. Протоколы классифицируются следующим образом: проактивная маршрутизация (протоколы OLSR, D-OLSR, M-OLSR, CE-OLSR и DSDV), реактивная (AODV, AODV-SEC, AODV с временным интервалом, M-AODV, APAR и DSR) и гибридная (HWMP, ZRP, SHARP, HRPO и TORA). Гибридная категория протоколов предполагает, что сеть разделяется на зоны, в отдельной зоне принимается проактивная маршрутизация, а связь между зонами основана на реактивной маршрутизации.

Роевые протоколы маршрутизации основаны на роевом интеллекте (SI), который впервые использовался для клеточной роботизированной системы. Роевые алгоритмы моделируют социальное поведение птиц или рыб у стада или насекомых на рое (выше перечислены примеры SAC – самоорганизующихся адаптивных систем). Алгоритмы SI направлены на поиск оптимального решения. В качестве протоколов маршрутизации на основе роя, которые предназначены для FANET, можно выделить BeeAdhoc и APAR.

Протоколы, основанные на определении географического местоположения: этот класс протоколов маршрутизации основан на знании географического местоположения узлов сети, которое каждый узел может определить с помощью GPS.

Для оценки производительности протоколов маршрутизации используют, как правило, шесть основных показателей (для FANET):

1. Коэффициент доставки пакетов (PDR): определяется как отношение успешно доставленных пакетов в пункт назначения ко всем пакетам данных, сгенерированным отправителями. Чем больше PDR, тем лучше производительность протокола.

2. Средняя конечная задержка (EED): среднее время прохождения пакетов данных до целевых пунктов назначения. Чем меньше EED, тем лучше производительность протокола.

3. Среднее количество переходов (H): определяется как количество доставленных пакетов данных, делённое на количество переходов, выполняемых всеми пакетами

4. Накладные расходы (O): отношение пакетов маршрутизации к успешно доставленным пакетам в приёмниках. Этот показатель показывает степень насыщения сети. Чем ниже, тем лучше.

5. Пропускная способность (T): количество пакетов данных, успешно доставляемых в целевой пункт назначения в течение заданного промежутка времени (обычно 1). Чем больше значение T, тем лучше производительность протокола маршрутизации.

6. Задержка (L): мера времени, затрачиваемого пакетом данных для транзита между двумя узлами в данной сети. Чем ниже значение L, тем лучше алгоритм маршрутизации.

Одним из основных методов анализа алгоритмов маршрутизации является имитационное моделирование. Существуют специальные системы имитации, предназначенные для моделирования компьютерных сетей. Дадим краткий обзор симуляторов компьютерных сетей.

Обзор симуляторов компьютерных сетей

В настоящее время существует достаточное большое количество симуляторов компьютерных сетей, в том числе: COMNET [4], OPNET [5], OMNeT++ [6]. Все они обладают привлекательными чертами, которые позволяют выполнять автоматизированное проектирование компьютерных сетей, получать временные оценки алгоритмов.

Так COMNET III – объектно-ориентированная система моделирования локальных и глобальных сетей. Позволяет моделировать уровни: приложений, транспортный, сетевой, канальный. Использует все известные на сегодня технологии и протоколы, а также системы клиент-сервер. Модель создаётся из объектов, “строительных блоков”, с COMNET поставляется большая библиотека объектов-моделей реального сетевого оборудования и методов доступа к среде.

OPNET – также представляет собой программное средство для проектирования и моделирования локальных и глобальных сетей, компьютерных систем, приложений и распределенных систем. Включает следующие программные продукты: Netbiz (проектирование и оптимизация вычислительной системы), Modeler (моделирование и анализ производительности сетей, компьютерных систем, приложений и распределенных систем), ITGuru (оценка производительности коммуникационных сетей и распределенных систем).

OMNeT++ представляет собой симулятор дискретных событий, которые происходят внутри простых модулей (simple modules). В системе OMNeT++ заложена детальная реализация протоколов, начиная с сетевого уровня, возможность написания и подключения собственных модулей, развитый графический интерфейс.

Можно сделать заключение, что описанные выше программные средства для проектирования, анализа и исследования компьютерных сетей являются низкоуровневыми. Ещё один недостаток: симуляторы являются коммерческими.

Наряду с использованием специальных средств имитационного моделирования используют системы моделирования общего назначения. Исследование компьютерных сетей можно провести с помощью развитых систем имитационного моделирования общего назначения, например, GPSS [7] или AnyLogic [8].

Однако эти системы моделирования лишены некоторых специализированных лингвистических и программных средств для описания структурных особенностей компьютерных сетей и функционирования узлов, а также для сбора статистических данных, которые могли бы определить производительность.

Система моделирования TriadNS и агентное моделирование

В TriadNS [9,10] с помощью специально разработанного высокоуровневого языка моделирования Triad можно описать новое устройство или, *структуру* компьютерной сети (математической моделью локальной компьютерной сети является граф, математической моделью ad hoc сетей, к которым относятся и сети FANET – динамические случайные графы).

Используя лингвистические [11,12] и программные средства *слоя рутин* СИМ TriadNS, есть возможность описать новый алгоритм. Нашей задачей является построение алгоритмов маршрутизации в ad hoc сетях.

Средства сбора в ходе имитационного эксперимента статистической информации о построенной имитационной модели позволяют проанализировать ее, предоставив в распоряжение исследователя результаты работы стандартных и пользовательских *информационных процедур*.

Условия моделирования языка Triad позволяют задать алгоритм исследования и, в результате, получить модель, соответствующую заданным критериям.

Известно, что существуют различные парадигмы имитационного моделирования: ориентированная на события, процессо-ориентированная, объектно-ориентированная, агентная.

Так авторы СИМ ANYLOGIC позиционируют ее как многоподходную, т.е. исследователь может применить как средства системной динамики, так и средства, реализующие процессо-ориентированное и агентное имитационное моделирование. Известно, что агентное имитационное моделирование предполагает, что имитационная модель представляет собой взаимодействующих программных агентов. Агенты могут быть реактивными (реагировать на внешние воздействия окружающей среды) или интеллектуальными, т.е. могут принимать решения.

Поскольку зачастую в алгоритмах маршрутизации ad hoc сетей возникают сложные ситуации и вычислительный узел должен принимать решения, менять своё поведение в зависимости от изменений во внешней среде, целесообразно использовать агентную парадигму имитационного моделирования.

В качестве описания действий агентов можно использовать рутинны языка TriadNS. Рассмотрим синтаксис рутинны. Каждую рутину задают множеством событий E , линейно упорядоченным множеством временных моментов (T) и набором состояний $\{Q\}$. Состояние задаётся

значениями локальных переменных. Локальные переменные определяются в рутине. Состояние изменяется только в случае возникновения события. События планируют друг друга (*schedule* (*event1*, *t1*) – процедура планирования события *event1* на момент времени *t1*). В рутине могут быть определены входные и выходные полюсы (Pr_{in} и Pr_{out}). Входной полюс служит для приёма сообщений, выходные полюсы – для их отправки. Среди множества событий выделяют входные сообщения. Все входные полюсы обрабатываются входным событием, выходные полюсы – обычным событием. Специальный оператор (*out* <сообщение> *through* <имя полюса>) служит для отправки сообщения.

Синтаксис рутины на языке Triad имеет следующий вид:

```
Routine <Имя> { <Секция параметров> |
                  <Объявление полюсов> }
          [ <Секция инициализации рутины> ]
          { <Описание события рутины>}
EndRout
```

Рассмотрим тестовую задачу поиска нужного вычислительного узла в сети.

В начальный момент времени агент находится в некоторой точке *A1*. Его цель – добраться до объекта *G*. Между этими объектами находятся другие вычислительные узлы, через которые пролегает путь.

Также изначально в задаче известны расстояния между связанными объектами. При этом агент, осуществляющий поиск, из альтернатив при выборе направления предпочтёт тот вычислительный узел, расстояние до которого меньше.

Граф, представляющий вычислительные узлы и связи между ними, представлен на рис. 1.

Ниже приведена рутина и агент, который осуществляет поиск нужного узла в компьютерной сети.

Рутина *G* – отдельная рутина, выделенная для поиска объекта:

```
routine G(inout Con[10])
  initial
    integer place;
    place:=8;
    schedule CheckSearching in 0;
  endi
  event CheckSearching
    if (mIndex = 8) then Print "Found!";
```

```

eor;
endf;
schedule CheckSearching in 1;
ende
endrout

```

В секции инициализации рутина содержит переменную *place*, являющуюся позицией (индексом среди вершин). Событие *CheckSearching*, следит за тем, найдена ли конечная вершина.

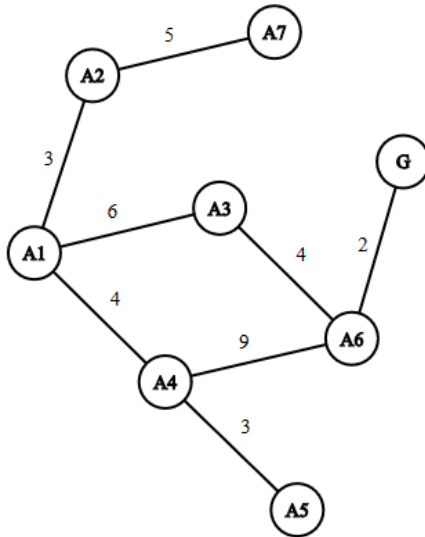


Рис. 1. Граф перемещений

Рутинa *G* реализует алгоритм функционирования конечного узла. Алгоритм, по которому функционируют остальные узлы, реализован с помощью другой рутинy. Рутинa содержит вспомогательные переменные (предварительно описанные в слое сообщений), которые позволяют хранить информацию, полученную в результате опроса ближайших узлов, определять расстояние до этих узлов, индексы узлов. Механизм вывода позволяет определить вычислительный узел с нужным индексом.

Были проведены соответствующие эксперименты, которые показали жизнеспособность разработанных программных средств.

Заключение

В работе рассмотрены ad hoc сети, рассмотрены особенности сетей, различные классы. Более подробно рассмотрен класс беспроводных сетей для беспилотных летательных аппаратов (FANET) и алгоритмы маршрутизации в этих сетях. Алгоритмы маршрутизации сетей FANET интересны тем, что узлы сети являются мобильными, а сети – многоузловыми, следовательно, являются достаточно сложными.

Для изучения и исследования алгоритмов применяют методы имитационного моделирования, наиболее адекватными в этом случае являются агентные технологии имитационного моделирования. В работе обоснована возможность применения СИМ TriadNS для исследования ad-hoc-сетей и приводится тестовый пример, в котором используют разработанные авторами программные средства, реализующие агентов и выполняющих механизм логического вывода, показывающие возможности подхода и разработанной системы.

Библиографический список

1. *Oubbatia O.S., Lakas A., Zhouc M., Güne M.B., Yagoubia F.* A survey on position-based routing protocols for Flying Adhoc Networks (FANETs)// *Vehicular Communications*, 10, Elsevier, 2017. P. 29–56.
2. *Boussoufa-Lahlaha S., Semchedinea F., Bouallouche-Medjkounea L.* Geographic routing protocols for Vehicular Ad hoc NETworks (VANETs): A survey// *Vehicular Communications*, 11, Elsevier, 2018. P. 20–31.
3. *Li M., Salmanian M., Willink T.J.* Network layer connectivity awareness with application to investigate the OLSR protocol in tactical MANETs // In: *Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference*. P. 4093–4105.
4. COMNET III. Planning for Network Managers. Release 1.3. [Электронный ресурс] [Режим доступа: <http://eent3.lsbu.ac.uk/staff/baoyb/acs/Comnet/comnet%20III.pdf>] [Проверено: 30.10.2016].
5. OMNeT++ Community Site. [Электронный ресурс] [Режим доступа: <http://www.omnetpp.org>] [Проверено: 30.11.2018].
6. OPNET. [Электронный ресурс] [Режим доступа: <http://www.riverbed.com/products/performance-management-control/opnet.html?redirect=opnet>] [Проверено: 30.11.2018].
7. GPSS. [Электронный ресурс] [Режим доступа: <http://www.gpss.ru>] [Проверено: 30.11.2018].

8. Anylogic [Электронный ресурс] [Режим доступа: <http://www.anylogic.ru>] [Проверено: 30.11.2018].
9. *Mikov A., Zamiatina E.* Program Tools and Language for Networks Simulation and Analysis // In: Proceedings SDN & NFV – The Next Generation of Computational Infrastructure: 2014 International Science and Technology Conference «Modern Networking Technologies (MoNeTec)», October 27-29, 2014, Lomonosov Moscow State University. P. 94-102.
10. *Zamyatina E., Mikov A, Mikheev R.* Linguistic and Program Tools For Debugging and Testing Of Simulation Models Of Computer Networks // International Journal "Information Models and Analyses". 2013. Vol. 2. No. 1. P. 70-80.
11. *Mikov A.I.* Simulation and Design of Hardware and Software with Triad // In: Proc. 2nd Intl. Conf. on Electronic Hardware Description Languages. Las Vegas, USA. 1995. P. 15-20.
12. *Миков А.И.* Автоматизация синтеза микропроцессорных управляющих систем – Иркутск: издательство Иркут. ун-та, 1987.