

Применение алгоритма пчелиной колонии BeeAdHoc для маршрутизации в FANET

А. В. Леонов, Г. А. Литвинов

FANET – беспроводные самоорганизующиеся сети, состоящие из беспилотных летательных аппаратов, характеризующиеся высокой подвижностью узлов, динамически изменяющейся топологией и движением в 3D-пространстве. Одной из основных проблем организации FANET является маршрутизация. В работе на примере протокола BeeAdHoc представлены результаты экспериментального исследования, подтверждающего целесообразность применения алгоритмов пчелиной колонии для маршрутизации в FANET.

Ключевые слова: БПЛА, FANET, BeeAdHoc, роевой интеллект.

1. Введение

В 1989 году Херардо Бени и Ван Цзином был введен термин «роевой интеллект» (РИ) (англ. Swarm Intelligence, SI). Данный термин использовался для системы клеточных роботов и подразумевал коллективное поведение децентрализованной самоорганизующейся системы [1]. В дальнейшем РИ стал общепризнанным методом оптимизации в теории искусственного интеллекта. РИ представляет собой многоагентную систему интеллектуальной оптимизации, обладающую самоорганизующимся поведением [2].

Роевые алгоритмы (РА) основываются на моделировании социального поведения птиц или рыб в стае или насекомых в рое. Алгоритмы нашли свое применение при решении сложных комплексных оптимизационных задач. Решением является нахождение минимума или максимума целевой функции из дискретного множества возможных решений [3].

Необходимо отметить, что роевые агенты руководствуются локальными правилами и не имеют глобального представления о цели. Взаимодействие между агентами приводит к формированию некоего коллективного разума. Самоорганизация является ключевой особенностью системы, низкоуровневое взаимодействие приводит к изменениям на макроскопическом (глобальном) уровне [4].

В работе рассмотрены алгоритмы на основе поведения пчелиных колоний, реализованные для решения задачи маршрутизации в беспроводных самоорганизующихся сетях MANET (Mobile Ad Hoc Network), VANET (Vehicular Ad Hoc Network). Проведены экспериментальные исследования с целью выяснения возможности использования алгоритмов пчелиной колонии в FANET (Flying Ad Hoc Network) [5].

2. Пчелиные алгоритмы

Одним из направлений исследований в области биоинспирированных методов являются алгоритмы пчелиной колонии, предложенные в начале 2000-х годов [6].

Основой алгоритмов является математическое моделирование поведения пчел в поисках нектара.

Двухуровневая стратегия поиска включает в себе основную идею работы алгоритма. За счет использования пчел-разведчиков формируется случайное множество перспективных позиций (источников нектара). При возвращении в улей пчелы исполняют «виляющий танец» (являющийся, по сути, специфической формой коммуникации между пчелами), в котором передается закодированная информация о расстоянии до найденного источника пищи, о направлении к этому источнику, о качестве и количестве найденного там нектара (рис. 1).

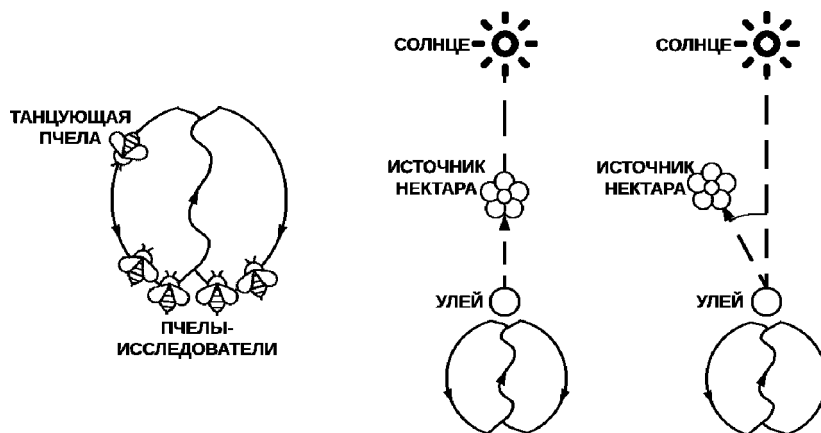


Рис. 1. Схема «виляющего» танца

На втором уровне с помощью пчел-фуражиров осуществляется исследование окрестностей [7].

Целью пчелиной колонии является поиск источника, содержащего максимальное количество нектара, что соответствует целевой функции (ЦФ) в оптимизационной задаче. При этом решение представляется в виде точки (позиции) в пространстве поиска (рис. 3) [8]. Данная парадигма лежит в основе следующих алгоритмов: Bee colony optimization [9], Bees Algorithm [10], Virtual Bee Algorithm [11], Artificial Bee Colony [12], Bee Hive algorithm [13]. Более подробное описание принципа действия и областей применения пчелиного алгоритма представлено в работах [14, 15].

3. Самоорганизующиеся сети БПЛА

В последнее время большую популярность приобретают сети FANET. Эти сети представляют собой разновидность одноранговой самоорганизующейся сети VANET, основными узлами которой являются беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Применение БПЛА в качестве фундамента для организации сетевой инфраструктуры является привлекательным подходом с точки зрения увеличения телекоммуникационных возможностей сети. Сеть на основе БПЛА характеризуется многофункциональностью, гибкостью и сравнительно небольшими эксплуатационными расходами [16]. Такую сеть можно применить в самых различных отраслях народного хозяйства (рис. 2).

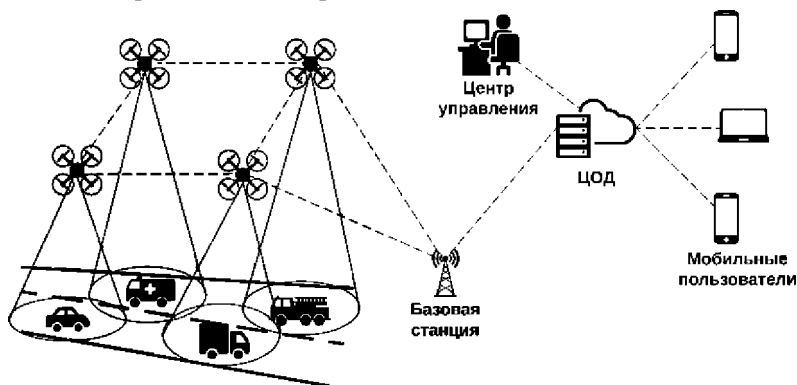


Рис. 2. Пример использования сети FANET для мониторинга дорожного движения

4. Алгоритмы и методы маршрутизации в FANET

Технологии организации самоорганизующихся сетей FANET в настоящее время находятся в стадии разработки, появляются новые методы и алгоритмы маршрутизации, усовершенствуются старые [17–19].

Выбор протокола маршрутизации определяется предъявляемыми требованиями: количеством узлов, их мобильностью, поддержкой QoS, типов передаваемого трафика и т.д.

Основой для любого протокола маршрутизации является алгоритм, применяемый для поиска наилучшего пути (как правило, кратчайшего) между узлом-источником и узлом-получателем.

При этом методы маршрутизации должны удовлетворять следующим требованиям [20, 21]:

- учитывать особенности FANET;
- обеспечивать быструю сходимость (построение маршрута) и отсутствие заикливания маршрутов;
- обеспечивать надежную доставку пакетов;
- поддерживать несколько маршрутов доставки информации до узла назначения;
- обеспечивать минимальную загрузку сети служебной информацией;
- обладать механизмами обнаружения недоступных маршрутов и их удаления/восстановления;
- обеспечивать построение маршрутов в соответствии с предъявляемыми требованиями (QoS, джиттер и др.);
- обладать механизмами обеспечения безопасности процессов маршрутизации и передачи данных;
- обеспечивать минимизацию энергопотребления узлов сети и др.

5. Маршрутизация в самоорганизующейся сети на основе алгоритмов пчелиной колонии

Пчелиные алгоритмы, разработанные для телекоммуникационных сетей, отличаются от большинства традиционных алгоритмов.

Исследователи обнаружили ряд особенностей, которые нашли свое успешное применение при решении проблем маршрутизации в беспроводных самоорганизующихся сетях [22, 23]:

- пчелы организуют эффективную и высокоорганизованную систему;
- демонстрируют адаптивность к изменяющимся условиям окружающей среды;
- обладают отказоустойчивостью, способны быстро восстанавливать свою численность после потери особей;
- присутствует высокий рост численности популяции (масштабируемость).

Рассмотрим процесс маршрутизации в самоорганизующейся сети на основе пчелиного алгоритма BeeAdHoc (см. рис. 3) [24].

Первый этап – «разведка» – состоит из прямой и обратной разведок. Прямые разведчики осуществляют в сети поиск узла назначения. При обнаружении узла назначения обратный разведчик возвращается в узел-источник. Разведчик содержит следующую информацию: ID разведчика, ID узла-источника, минимальную остаточную энергию (изначально равна бесконечности) и число хопов (изначально равно нулю). Разведчики направляются ко всем соседям узла-источника. Каждый промежуточный узел увеличивает счетчик числа прыжков на единицу. От значения этого счетчика зависит энергетическая эффективность передаваемых данных. При обнаружении узла назначения обратный разведчик возвращается в узел-источник. На промежуточных узлах алгоритм следит за изменениями характеристик

разведчиков и, руководствуясь полученной информацией, принимает решение об эффективности маршрута.

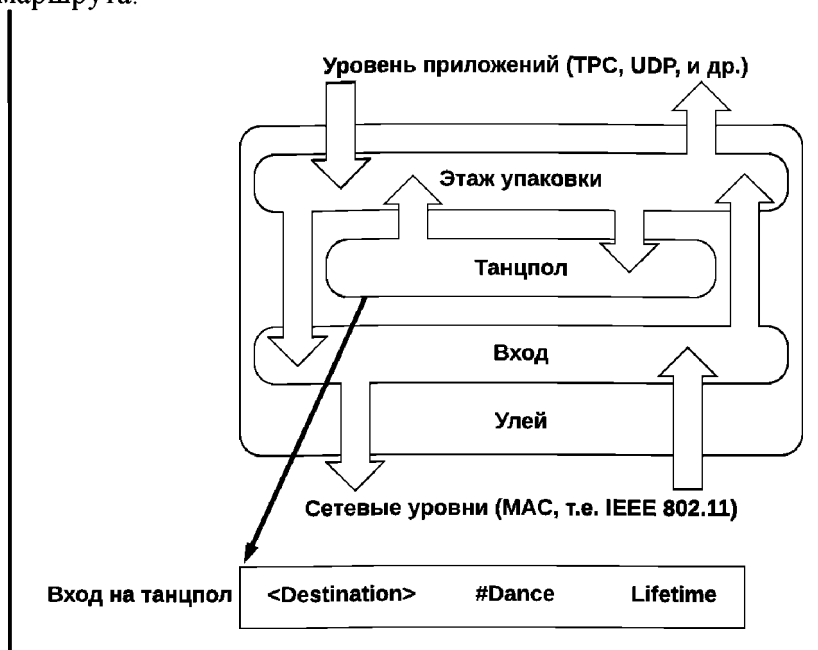


Рис. 3. Архитектура протокола BeeAdHoc

Таким образом устанавливаются многочисленные каналы между источником и узлом назначения.

После завершения разведки и установления маршрута с помощью «формулы танца» определяется необходимое количество рабочих пчел. После этого наступает этап «сбора ресурсов». Пчелы передают данные по аналогии с действиями фуражиров в живой природе, доставляющих нектар в улей.

Данные передаются от источника к узлу назначения. Количество пчел-фуражиров может варьироваться в зависимости от изменения ситуации в сети. В отличие от муравьиных алгоритмов промежуточные узлы не принимают никаких решений относительно маршрутизации, все решения инициируются узлом-источником [25].

Для того чтобы вернуться обратно, фуражиры должны объединиться в один «рой». Объединение происходит в соответствии с ID-маршрутами рабочих пчел. Во время возвращения определяется качество маршрутов, при этом энергетически неэффективные удаляются из таблиц маршрутизации.

6. Сценарий проведения имитационного моделирования

Сравнение протоколов маршрутизации в самоорганизующихся сетях FANET затруднено вследствие влияния большого числа факторов, обладающих случайным характером и по этой причине слабо поддающихся строгому математическому анализу.

Для исследования работы Ad Hoc сети применяются средства имитационного моделирования. Появление программного обеспечения для имитационного моделирования позволило проводить необходимые исследования и эксперименты, в том числе усовершенствовать существующие и разработать новые протоколы маршрутизации без реального развертывания сети.

Для проведения имитационного моделирования на выбор предлагается широкий спектр программных средств. Наиболее известными и популярными являются следующие средства имитационного моделирования: ns-2, ns-3, OPNET/Riverbed SteelCentral, OMNET++, QualNet/GloMoSim и др.

В данной работе исследования протокола маршрутизации BeeAdHoc проводились в сетевом симуляторе ns-2 с предустановленным протоколом BeeAdHoc. Сравнение проводилось с протоколами, реализованными в симуляторе: AODV, DSDV, DSR.

В моделируемой сети определены следующие постановочные условия и ограничения:

- операционная система – Ubuntu 14.04.5 Desktop (64-bit) LTS;
- версия сетевого симулятора – ns-2.34;
- визуализация перемещения БПЛА с помощью утилиты NetAnim;
- исследование протоколов маршрутизации производилось для группировок, состоящих из 10, 20, 30, 40, 50 БПЛА.

Параметры, используемые для проведения имитационного моделирования, были выбраны на основе анализа различных публикаций (см., напр., [26–29]). В результате был сделан вывод о том, что все исследователи используют примерно одинаковые параметры (см. табл. 1), которые варьируются в зависимости от целей проводимого исследования.

Сценарий имитационного эксперимента состоит из узлов, имитирующих поведение БПЛА, перемещающихся случайным образом в соответствии с моделью мобильности на основе случайных маршрутных точек (англ. Random Waypoint, RWP), в области размером 1500×1500 м² (рис. 4) [30, 31]. На уровне приложений в качестве источника полезного трафика используется генератор с фиксированным темпом выдачи пакетов (англ. Constant Bit Rate, CBR). Моделирование работы передачи трафика на транспортном уровне осуществляется с помощью UDP-дейтаграмм со скоростью 512 Кбит/с.

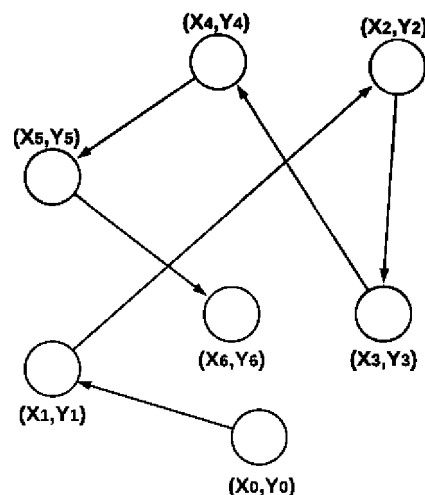


Рис. 4. Модель мобильности на основе случайных маршрутных точек

Помимо сценариев, в которых изменялись количество узлов сети и скорость передвижения, остальные условия были одинаковыми.

Для выполнения оценки производительности протоколов маршрутизации используются следующие метрики [32, 33]:

Сквозная задержка (End-to-End delay): задержка между первым переданным байтом и последним полученным байтом. Она включает в себя задержку передачи, задержки очереди процесса и задержку распространения [34].

Пропускная способность (Throughput): характеризует максимально возможную скорость успешной доставки пакетов по каналу связи [35].

Накладные расходы на маршрутизацию (Routing Overhead): накладные расходы на поиск маршрутов и построение таблицы маршрутизации [36].

Выбор метрик обусловлен проведенным изучением подходов, представленных в научных работах, получивших широкое признание среди научной общественности (см., напр., [37]).

Таблица 1. Параметры имитационного моделирования

Параметр	Значение
Размер области моделирования	1500 m x 1500 m
Модель мобильности	Random waypoint
Количество БПЛА	10, 20, 30, 40, 50
Продолжительность итерации	20 sec
Скорость узлов	20, 40, 60, 80, 100 m/s
Генератор трафика	CBR
MAC-уровень	802.11 в режиме Ad Hoc
Модель распространения сигнала	Friis
Тип антенны	Omni
Зона покрытия антенны	250 m
Транспортный уровень	UDP
Размер пакета	512 Kbytes

7. Имитационное моделирование

Было предположено, что с увеличением количества узлов протокол BeeAdHoc будет демонстрировать лучшие показатели производительности по сравнению с протоколами AODV, DSDV и DSR. Ожидалось, что накладные расходы маршрутизации и сквозная задержка будут увеличиваться, а пропускная способность останется без существенных изменений.

При проведении эксперимента количество узлов сети варьировалось в диапазоне значений от 10 до 50.

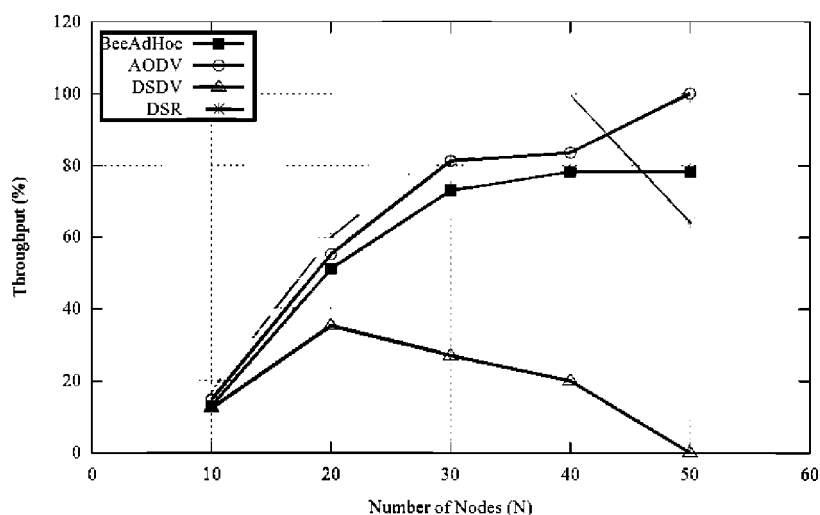


Рис. 5. Отношение пропускной способности к количеству узлов

На рис. 5 видно, что с увеличением количества узлов увеличивается пропускная способность протоколов BeeAdHoc, DSR, AODV, при этом DSDV имеет худшие показатели – его пропускная способность снижается пропорционально увеличению количества узлов.

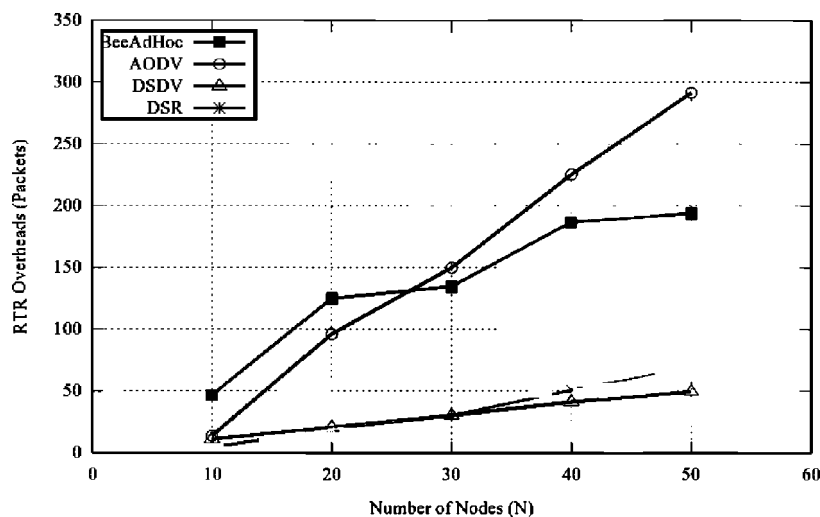


Рис. 6. Соотношение служебного трафика и количества узлов

Из рис. 6 видно, что с ростом числа узлов происходит увеличение накладных расходов на маршрутизацию для всех рассматриваемых протоколов. При этом DSR и DSDV демонстрируют лучшие показатели, а BeeAdHoc в среднем превосходит AODV.

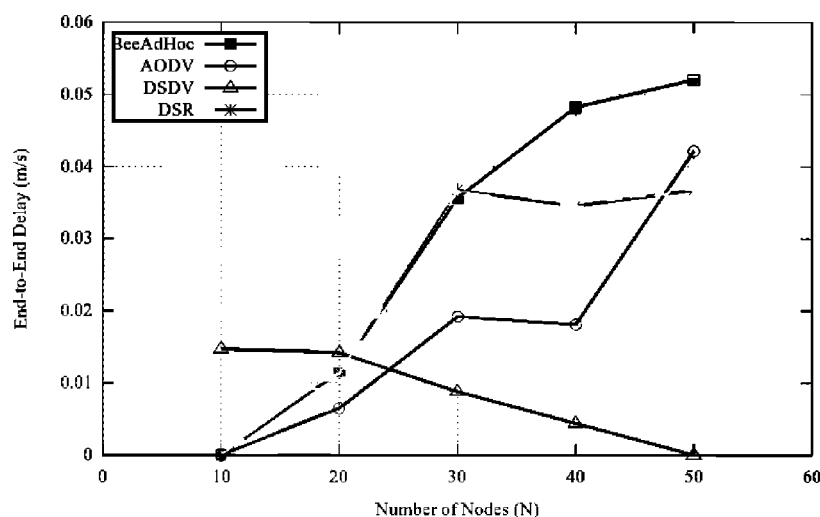


Рис. 7. Соотношение сквозной задержки и количества узлов

Рис. 7 показывает поведение алгоритмов относительно соотношения сквозной задержки к количеству узлов. BeeAdHoc незначительно уступает протоколам AODV и DSR. DSDV имеет наилучшие показатели, т.к. является проактивным/табличным протоколом и в его таблице маршрутизации хранятся маршруты ко всем узлам.

Далее представлены графики, демонстрирующие адаптивность алгоритмов к изменениям топологии и мобильности узлов.

Алгоритмы демонстрируют различное поведение в этом отношении, DSDV отмечается нестабильным поведением. BeeAdHoc является наиболее адаптивным алгоритмом по отношению к изменениям топологии, в целом изменение скорости оказывает незначительное влияние на его пропускную способность. С увеличением скорости алгоритмы BeeAdHoc и AODV быстро адаптируются к изменениям и имеют лучшие показатели по пропускной способности.

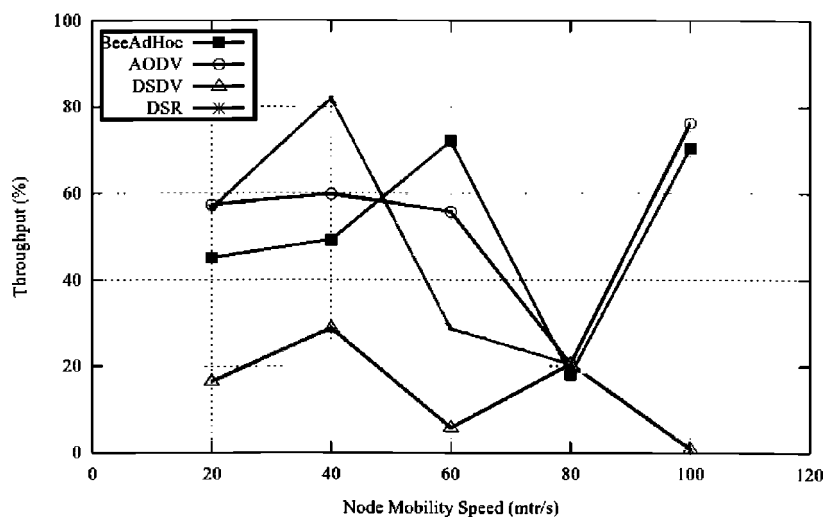


Рис. 8. Отношение пропускной способности к скорости движения узлов

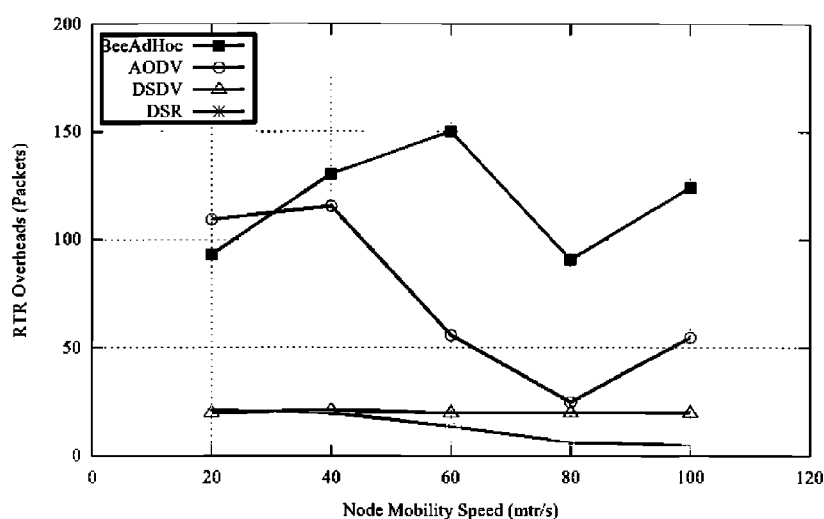


Рис. 9. Отношение служебного трафика к скорости движения узлов

Из рис. 8 видно, что DSDV и DSR не испытывают большой нагрузки в отношении накладных расходов на маршрутизацию с увеличением мобильности узлов, как показано на рис. 9. В то же время BeeAdHoc испытывает повышенную нагрузку. AODV имеет прямо противоположное поведение по сравнению с BeeAdHoc благодаря тому, что AODV использует таблицу маршрутизации для хранения нескольких путей к месту назначения, и альтернативные пути могут быть найдены без необходимости запуска процесса обнаружения маршрута.

BeeAdHoc имеет большие издержки по сравнению с протоколами (см. рис. 11) в связи с необходимостью поиска нового маршрута к узлу назначения, что, в свою очередь, дает преимущество над другими протоколами по пропускной способности.

На основе результатов, полученных в ходе экспериментального исследования, можно сделать следующий вывод: алгоритм BeeAdHoc обеспечивает более высокую пропускную способность по сравнению с DSDV и DSR, но уступает им по задержке. В среднем производительность BeeAdHoc сопоставима с рассматриваемыми протоколами DSR, DSDV и AODV. BeeAdHoc может использоваться для маршрутизации пакетов в сети FANET.

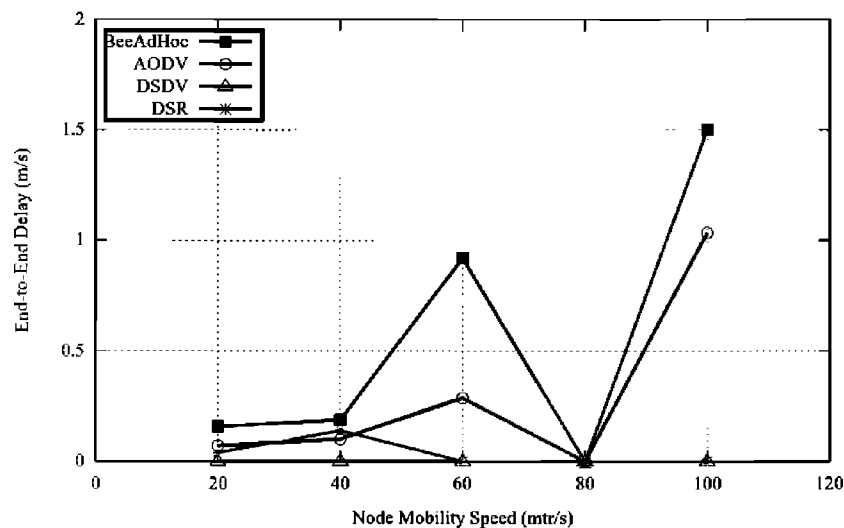


Рис. 10. Отношение сквозной задержки к скорости движения узлов

8. Заключение

На сегодняшний день не существует алгоритма маршрутизации, удовлетворяющего всем требованиям, предъявляемым к FANET, и обеспечивающего высокие показатели эффективности работы сети в различных условиях.

На примере протокола BeeAdHoc был проведен экспериментальный анализ, результаты которого подтверждают целесообразность применения алгоритмов пчелиной колонии для маршрутизации в FANET по сравнению с другими алгоритмами.

Направлением для дальнейших исследований является изучение поведения алгоритма BeeAdHoc при его использовании в различных сценариях. При проведении экспериментальных исследований планируется эмулировать не только различные типы трафика (голос/видео), но и изменять размер пересылаемых пакетов данных.

Кроме того, целесообразно проведение исследований, связанных с разработкой унифицированной методики тестирования протоколов маршрутизации в FANET.

Литература

1. Beni G., Wang J. Swarm intelligence in cellular robotic systems // Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics. Springer, 1993. P. 703–712.
2. Курейчик В. М., Кажаров А. А. Использование роевого интеллекта в решении NP-трудных задач // Известия ЮФУ Технические Науки. 2011. Вып. 7, № 120. С. 30–36.
3. Курейчик В. В., Запорожец Д. Ю. Роевой алгоритм в задачах оптимизации // Известия ЮФУ Технические Науки. 2010. Вып. 7, № 108. С. 28–32.
4. Karaboga D., Akay B. A survey: algorithms simulating bee swarm intelligence // Artif. Intell. Rev. 2009. V. 31, № 1–4. P. 61–85.
5. Maxa J.-A., Mahmoud M.-S.B., Larrieu N. Survey on UAANET Routing Protocols and Network Security Challenges // Ad Hoc Sens. Wirel. Netw. 2017.
6. Lučić P., Teodorović D. Computing with bees: attacking complex transportation engineering problems // Int. J. Artif. Intell. Tools. 2003. V. 12, № 3. P. 375–394.
7. Кальчевская П. И., Леванова Т. В. Алгоритм пчелиного роя для задачи размещения предприятий с ограничениями на объемы поставок. Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ), 2015. С. 1833–1837.

8. Курейчик В. В., Жиленков М. А. Пчелиный алгоритм для решения оптимизационных задач с явно выраженной целевой функцией // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. 2015. Вып. 1, № 21. С. 1–8.
9. Teodorović D. Bee Colony Optimization (BCO) // Innovations in Swarm Intelligence. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. P. 39–60.
10. Pham D. T., Haj Darwish A., Eldukhri E. E. Optimisation of a fuzzy logic controller using the bees algorithm // Int. J. Comput. Aided Eng. Technol. 2009. V. 1, № 2. P. 250–264.
11. Yang X.-S. Engineering optimizations via nature-inspired virtual bee algorithms // Artif. Intell. Knowl. Eng. Appl. Bioinspired Approach. 2005. P. 317–323.
12. Karaboga D., Basturk B. On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm // Appl. Soft Comput. 2008. V. 8, № 1. P. 687–697.
13. Wedde H. F., Farooq M., Zhang Y. BeeHive. An efficient fault-tolerant routing algorithm inspired by honey bee behavior // Lect. Notes Comput. Sci. 2004. V. 3172. P. 83–94.
14. Davidovic T., Teodorovic D., Selmic M. Bee Colony Optimization – part I: The algorithm overview // Yugosl. J. Oper. Res. 2015. V. 25, № 1. P. 33–56.
15. Teodorovic D., Selmic M., Davidovic T. Bee Colony Optimization - part II: The application survey // Yugosl. J. Oper. Res. 2015. V. 25, № 2. P. 185–219.
16. Wei S. et. al. Simulation study of unmanned aerial vehicle communication networks addressing bandwidth disruptions / ed. Pham K.D., Cox J.L. 2014. P. 908500–1–908500–10.
17. Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of Important Issues in UAV Communication Networks // IEEE Commun. Surv. Tutor. 2015. P. 1–32.
18. Bekmezci İ., Sahingoz O. K., Temel Ş. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey // Ad Hoc Netw. 2013. V. 11, № 3. P. 1254–1270.
19. Sahingoz O. K. Networking Models in Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): Concepts and Challenges // J. Intell. Robot. Syst. 2014. V. 74, № 1–2. P. 513–527.
20. Saleem Y., Rehmani M. H., Zeadally S. Integration of Cognitive Radio Technology with unmanned aerial vehicles: Issues, opportunities, and future research challenges // J. Netw. Comput. Appl. 2015. V. 50. P. 15–31.
21. Temel S., Bekmezci İ. On the performance of flying ad hoc networks (FANETs) utilizing near space high altitude platforms (HAPs) // IEEE International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). 2013. P. 461–465.
22. Bee-Inspired Protocol Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. 319 p.
23. Farooq M. Bee-inspired routing protocols for mobile ad hoc and sensor networks // Bee-Inspired Protocol Engineering. Springer, 2009. P. 235–270.
24. H. F. Wedde, M. Farooq, C. Timm. BeeAdHoc: an Efficient, Secure and Scalable Routing Framework for Mobile AdHoc Networks: Technical report PG460. School of Computer Science: University of Dortmund, 2005. P. 263.
25. Боронин П. Н., Кучерявый А. Е. Интернет вещей как новая концепция развития сетей связи // Информационные технологии и телекоммуникации. 2014. Вып. 3, № 7. С. 7–30.
26. Ahmed A., Ogunbiyi O., Aduragba T. Optimal Data Collection from a Network using Probability Collectives (Swarm Based). 2015. V. 3, № 4. P. 49–58.
27. Дорохова А. А., Парамонов А. И. Исследование трафика и качества обслуживания в самоорганизующихся сетях на базе БПЛА // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Вып. 2, № 4. С. 12–25.
28. Singh K., Verma A. K. Experimental analysis of AODV, DSDV and OLSR routing protocol for flying adhoc networks (FANETs) // IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT). 2015. P. 1–4.
29. Qazi S. et al. An Architecture for Real Time Monitoring Aerial Adhoc Network // IEEE International Conference on Frontiers of Information Technology. 2015. P. 154–159.
30. Li Y., St-Hilaire M., Kunz T. Improving routing in networks of UAVs via scoped flooding and mobility prediction // IEEE Wireless Days, IFIP. 2012. P. 1–6.

31. Bettstetter C., Resta G., Santi P. The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks // IEEE Trans. Mob. Comput. 2003. V. 2, № 3. P. 257–269.
32. Bouachir O. et al. A mobility model for UAV Ad hoc network // IEEE International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2014. P. 383–388.
33. Broch J., Maltz D. A., Johnson D. B. Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad hoc networks // Parallel Architectures, Algorithms, and Networks, 1999. (I-SPAN'99) Proceedings. Fourth International Symposium on. IEEE, 1999. P. 370–375.
34. Liu J. et al. End-to-end delay in mobile ad hoc networks with generalized transmission range and limited packet redundancy // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2012. P. 1731–1736.
35. de Moraes R. M., Sadjadpour H. R., Garcia-Luna-Aceves J. J. Throughput-delay analysis of mobile ad-hoc networks with a multi-copy relaying strategy // IEEE Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON). 2004. P. 200–209.
36. Jacquet P., Viennot L. Overhead in Mobile Ad-Hoc Network Protocols. 2000.
37. Broch J., Maltz D. A., Johnson D. B. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols // IEEE International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks (I-SPAN'99). 1999. P. 370–375.

*Статья поступила в редакцию 16.01.2017;
переработанный вариант – 25.12.2017*

Леонов Алексей Викторович

соискатель кафедры средств связи и информационной безопасности ОмГТУ, начальник сектора Internet-технологий центра телекоммуникаций и вычислительной техники ОмГТУ (644077, Омск, Пр. Мира, 11), тел. (3812) 65-31-80, e-mail: kot@omgtu.ru.

Литвинов Георгий Александрович

магистрант кафедры средств связи и информационной безопасности ОмГТУ, инженер-программист центра телекоммуникаций и вычислительной техники ОмГТУ, тел. (3812) 65-31-80, e-mail: litvinov@omgtu.ru.

Application of the BeeAdHoc bee colony algorithm for routing to FANET

A. Leonov, G. Litvinov

FANETs are ad hoc networks based on unmanned aerial vehicles. Design of such a wireless network may vary vastly from existing networks due to aerial network characteristics such as high mobility of UAVs in 3D space. This paper presents experimental performance results that prove the advantages of the effective usage of protocols based on bee colony algorithm to solve routing tasks in FANETs.

Keywords: UAV, FANET, BeeAdHoc, swarm intelligence, routing protocols.