

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛГОРИТМА МУРАВЬИНОЙ КОЛОНИИ
АНТНОСНЕТ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ МАРШРУТИЗАЦИИ В FANET**

А.В. Леонов

Омский государственный технический университет
г. Омск, Российская Федерация

FANET представляют собой беспроводные самоорганизующиеся сети, состоящие из беспилотных летательных аппаратов. Такие сети характеризуются высокой подвижностью узлов, динамически изменяющейся топологией и движением в 3D-пространстве. Маршрутизация в FANET является чрезвычайно сложной задачей. В статье рассмотрены различные методы организации маршрутизации в FANET. Представлен обзор методов организации интеллектуальной маршрутизации, основанных на муравьином алгоритме. В отличие от существующих исследований впервые экспериментально подтверждена возможность эффективного использования протоколов на базе алгоритма муравьиной колонии AntHocNet для решения задачи маршрутизации в сетях FANET.

Ключевые слова: одноранговая самоорганизующаяся сеть БПЛА; FANET; беспилотный летательный аппарат; БПЛА; протоколы маршрутизации; роевой интеллект; алгоритм муравьиной колонии; имитационное моделирование сети.

**THE ANT-COLONY-BASED ROUTING ALGORITHM ANTHOCNET
FOR SOLVING THE ROUTING PROBLEM IN FANET**

A.V. Leonov

Omsk State Technical University
Omsk, Russian Federation

FANET (Flying Ad Hoc Network), similar to mobile peer-to-peer networks MANET and vehicular peer-to-peer networks VANET, represents a special type of peer-to-peer ad hoc network based on UAVs. Such a network has the ability to self-organize and adapt and is characterized by a dynamic changing topology. Special routing algorithms developed due to their specific features are need to organize FANET. The article gives a short overview of the existing FANET algorithms, as well as of the algorithms based on the swarm intelligence algorithms such as ant colony optimization. The experimental analysis was conducted, that proved the possibility of efficient application of ant colony optimization algorithm. The analysis was performed with the AntHocNet protocol simulating the behavior of ants in wildlife to solve the routing problems in FANETs.

Keywords: flying Ad Hoc Network; FANET; unmanned aerial vehicle; UAV; routing protocols; swarm intelligence; ant colony optimization; ACO; network simulation.

FANET (Flying Ad Hoc Network) по аналогии с мобильными одноранговыми сетями MANET (Mobile Ad Hoc Network) и автомобильными одноранговыми сетями VANET (Vehicular Ad Hoc Network) представляет собой разновидность сетей VANET, узлами сети которой являются беспилотные летательные аппараты (БПЛА) (рис. 1) [1]. Сравнительная характеристика этих типов Ad Hoc сетей представлена в табл. 1 [2]. Сети FANET обеспечивают широкий спектр возможностей для гражданского применения. Организация такого вида связи необходима не только для выполнения задач по обеспечению наблюдения, мониторинга, но и, например, для эффективной координации движения транспортных средств, повышения уровня безопасности (например, в качестве средства для предотвращения столкновений)

и т. д. [3].

FANET характеризуются высокой подвижностью узлов, динамически изменяющейся топологией и движением в 3D-пространстве, что создает множество дополнительных трудностей по организации связи в сети и требует применения специализированных протоколов. Взаимодействие узлов ограничено выделенными частотными ресурсами, энергоемкостью узлов, условиями распространения радиосигнала и т. п. Взаимодействие между узлом-отправителем и узлом-получателем осуществляется случайным образом через цепочку промежуточных узлов. Таким образом, узлы сети не только получают данные, но и выполняют функции маршрутизатора, обеспечивая доставку данных к промежуточным узлам. На рис. 2 схематически представлена сеть FANET.

Таблица 1

Сравнение сетей FANET, VANET и MANET

Критерии	Виды Ad Hoc сетей		
	FANET	VANET	MANET
Мобильность узлов	Высокая	Средняя	Низкая
Модель перемещения сетевых узлов	Обычно заранее определенные, используются специальные модели	Неизменное	Произвольное
Плотность размещения узлов	Низкая	Средняя	Высокая
Изменение топологии	Крайне высокое	Среднее	Медленное
Распространение радиоволн	Высоко над землей, линия визирования (Line of Sight, LoS) доступна в большинстве случаев	Близко к земле, LoS доступна	Очень близко к земле, LoS недоступна
Потребляемая мощность и срок службы сети	Критично для мини БПЛА	Некритично	Использование энергоэффективных протоколов
Вычислительные ресурсы	Высокие	Средние	Ограниченные
Определение местоположения	GPS, AGPS, DGPS, IMU	GPS, AGPS, DGPS	GPS

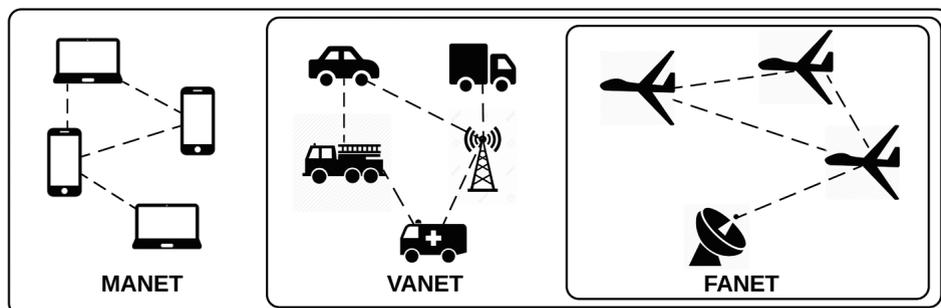


Рис. 1. MANET, VANET и FANET

С учетом особенностей сетей FANET маршрутизация данных между узлом-отправителем, узлом-получателем и транзитными узлами представляет собой чрезвычайно сложную задачу.

За последние 20 лет разработано несколько модификаций алгоритма AntNet, которые позволяют применить его в различных компьютерных сетях, включая мобильные Ad Hoc сети.

В статье представлен анализ применения муравьиных алгоритмов, полученный по результатам экспериментального имитационного моделирования для решения задачи маршрутизации в сетях FANET.

Классификация протоколов динамической маршрутизации в сети FANET

Алгоритмы маршрутизации применяются для нахождения наилучшего пути при передаче данных от узла-источника к

узлу назначения с максимальной производительностью и минимальными затратами. Кроме того, алгоритмы служат основой для любого протокола маршрутизации.

Выбор протокола маршрутизации FANET является нетривиальной задачей, для решения которой необходимо учесть множество факторов и критериев.

Эти протоколы могут быть разделены на пять основных категорий [2]:

- проактивные;
- реактивные;
- гибридные;
- иерархические;
- протоколы геомаршрутизации.

При изменении топологии сети в проактивных протоколах инициируется широковещательная рассылка сообщений об этих изменениях. При этом в памяти каждого узла хранятся маршруты до каждого из узлов сети. Таким образом, каждый узел

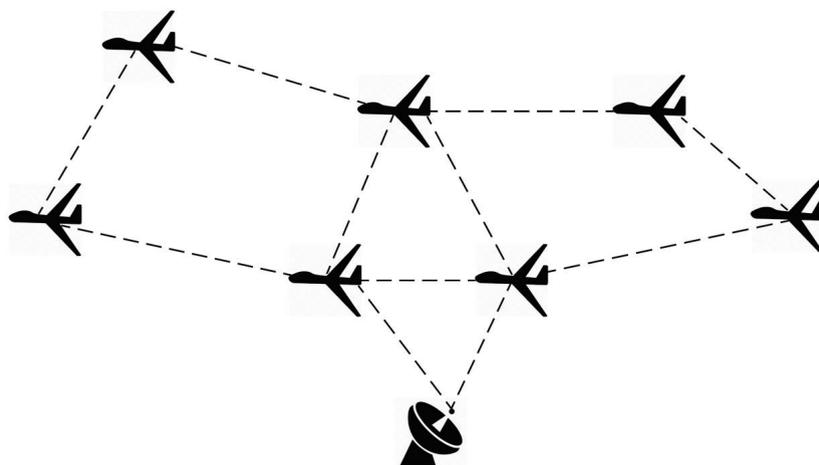


Рис. 2. Самоорганизующаяся сеть на основе БПЛА (FANET)

сети имеет граф связности сети, обеспечивающий решение задачи поиска кратчайшего пути. Проактивными протоколами являются: FSR [4], OLSR [5] и его разновидности (DOLSR [6], M-OLSR [7], P-OLSR [8] или CE-OLSR [9]), DSDV [10] и B.A.T.M.A.N [11], AeroRP [12], MARP/MDP [13], ADS-B [14], BGP-MX [15] и др.

Реактивные протоколы маршрутизации строят маршруты только тогда, когда они необходимы, т. е. непосредственно перед передачей данных. К реактивным протоколам относятся: AODV [16] и его разновидности (AODVSEC [17], Time-slotted on-demand routing [18], MAODV [19]), DSR [20], LMR [21], DYMO [22], OSPF-MDR [23] и др.

Гибридные протоколы представляют собой симбиоз проактивных и реактивных протоколов. Гибридными являются протоколы ZRP [24], SHARP [25], HRPO [26], TORA [27].

В отдельную группу протоколов маршрутизации FANET можно выделить протоколы, использующие данные о местоположении узлов сети. Преимуществом таких протоколов является отсутствие необходимости хранения маршрутной информации на транзитных узлах, а также возможность оптимизации маршрутов благодаря информации о местоположении узлов. К этому семейству принадлежат протоколы GPSR [28], GPMOR [29], USMP [30], MPGR [31], DREAM [32], LAR [33].

Еще одним из решений для маршрутизации в FANET являются иерархические алгоритмы, разработанные для решения проблемы масштабируемости сети. Сеть делится на кластеры (уровни, слои, группы или домены), в каждом кластере выбираются главный узел, шлюзы и внутренние узлы. Один из основных недостатков протоколов этого типа — относительно высокая сложность их реализации и схемы адресации. Примерами иерархических протоколов являются LANMAR [34], DREAM.

Общие положения алгоритма муравьиной колонии

Принципы и архитектуры функционирования биологических систем управления,

обеспечивающие способность животных приспосабливаться и адаптироваться к постоянно меняющимся условиям внешней среды, являются предметом активных исследований в ведущих научных центрах. Среди них особенно активно развиваются методы роевого интеллекта. Понятие роевого интеллекта (Swarm intelligence) введено Херардо Бени и Ван Цзином в 1989 году [35]. Под роевым интеллектом понимают самоорганизующуюся систему, состоящую из множества агентов. Агенты подчиняются простым правилам поведения в окружающей среде. Их простое взаимодействие определяет коллективную адаптацию. Таким образом, на основе «совокупности поведений» простых агентов формируется роевой интеллект. Примерами таких систем могут быть муравьиная колония, пчелиный рой, стая птиц, рыб и т. д. [36, 37].

Муравьиный алгоритм (Ant Colony Optimization — ACO) — это мета-эвристический роевой метод, являющийся одним из эффективных полиномиальных алгоритмов. Применяется для нахождения решений как задачи коммивояжера (Travelling salesman problem — TSP), так и задач комбинаторной оптимизации на графовой модели [38].

Данный алгоритм основывается на поведении муравьев в природе (рис. 3). Различают два вида взаимодействия между особями:

прямое взаимодействие (обмен пищей, визуальный контакт, химический контакт и др.);

косвенное взаимодействие или стигмергия (stigmergy) — две особи взаимодействуют косвенно, когда одна из особей модифицирует окружающую среду, а другая со временем реагирует на это изменение. В природе косвенное взаимодействие осуществляется через феромон (pheromone) — специальный, довольно стойкий секрет, оставляемый как след при перемещении насекомого. Чем больше концентрация феромона на тропе, тем больше муравьев будет по ней двигаться. Со временем феромон испаряется, что позволяет муравьям адаптировать свое поведение под изменения внешней среды [39].

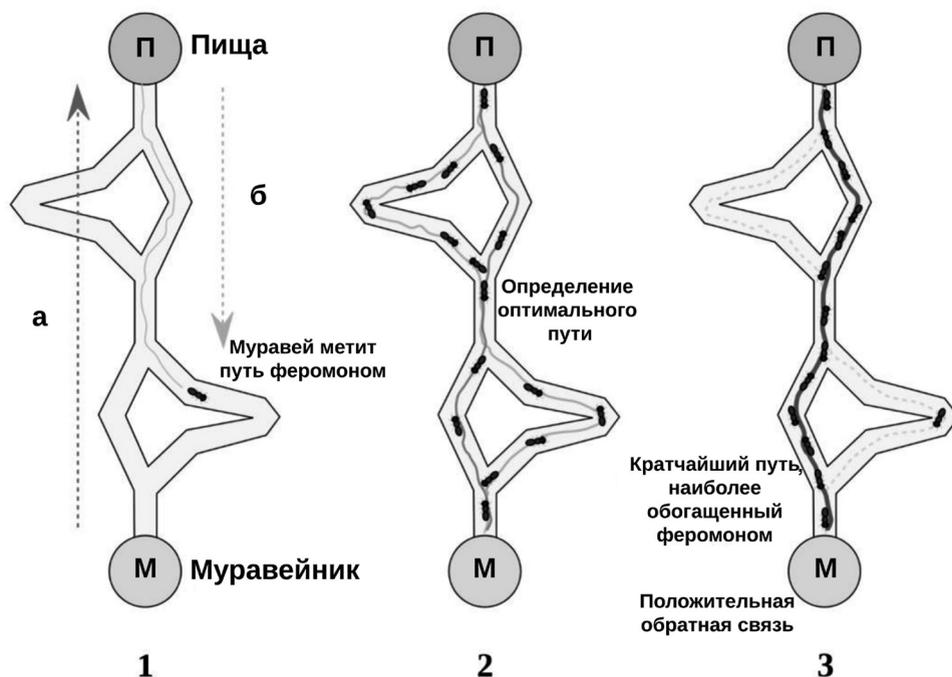


Рис. 3. Принцип работы алгоритма муравьиной колонии

На рис. 4 представлена блок-схема муравьиного алгоритма.

Протоколы маршрутизации на основе алгоритма муравьиной колонии

Подход, заложенный в основу муравьиного алгоритма, продемонстрировал высокую эффективность при решении задач оптимизации распределенных нестационарных систем, допускающих графовую интерпретацию. Примерами может служить нахождение оптимальных маршрутов в телекоммуникационных сетях. Рассмотрим несколько реализаций на основе АСО.

Алгоритм ABC. Одним из первых алгоритмов, разработанных для решения задачи балансировки нагрузки в телекоммуникационных сетях, стал метод ABC [40]. Сеть представляется в виде графа. Телекоммуникационные станции являются узлами этого графа, а линии связи между ними – его ребрами.

Каждый узел содержит феромонную таблицу, состоящую из $N-1$ колонок и N_k строк, где N – количество узлов сети, N_k – количество узлов, смежных с узлом k . Периодически из каждого узла запуска-

ются муравьи, имеющие случайные узлы-получатели. Муравьи в процессе движения выбирают промежуточные узлы на основе данных из феромонной таблицы. Таким образом, если j – узел-получатель, тогда P_{ij} – это вероятность перехода муравья в соседний узел i . При достижении муравьем очередного промежуточного узла происходит обновление феромонной таблицы этого узла:

$$\begin{cases} P'_{n,src} = \frac{P_{n,src} + \Delta P}{1 + \Delta P} \\ P'_{i,src} = \frac{P_{i,src}}{1 + \Delta P}, i = 1..N_k, i \neq n \end{cases} \quad (1)$$

где n – узел, из которого пришел муравей; src – узел-источник, сгенерировавший муравья; $P_{n,src}$, $P'_{n,src}$ – старое и новое значения ячеек феромонной таблицы; ΔP – увеличение феромона.

При достижении узла назначения муравей уничтожается.

Муравей имеет возраст, равный длине пути, т. е. количеству пройденных узлов. Возраст муравья age влияет на ΔP :

$$\Delta P = \frac{0,08}{age} + 0,005. \quad (2)$$

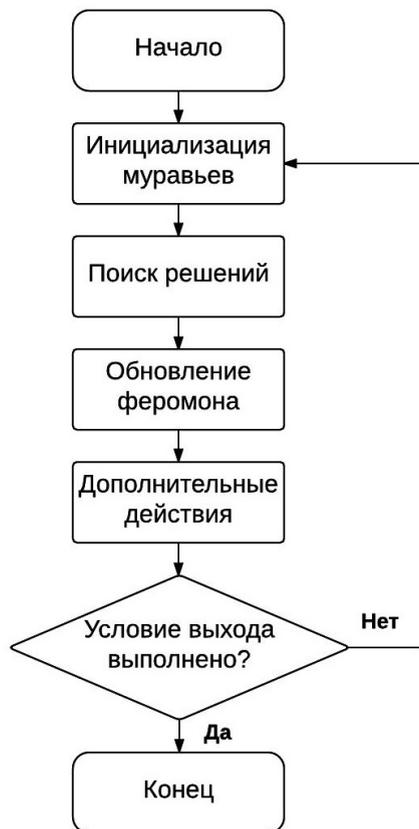


Рис. 4. Блок-схема муравьиного алгоритма АСО алгоритма

На вероятность выбора маршрута в большей степени влияют муравьи, выбирающие наиболее короткий и менее загруженный путь. Это объясняется тем, что эти муравьи быстрее достигают узел назначения и имеют меньший возраст и, следовательно, большее значение ΔP . Таким образом, данные будут идти по маршрутам с наименьшей длиной и степенью загруженности, что позволяет в свою очередь осуществить балансировку нагрузки [41].

Алгоритм AntNet. Алгоритм AntNet [42] предусматривает исследование состояния сети с помощью агентов (муравьев), использующих вероятностные правила выбора маршрута. Рассматриваемый алгоритм позволяет уменьшить вероятность перегрузки сети.

Агентом в AntNet является специальный пакет, который содержит информацию о состоянии пройденных сетевых каналов. Муравьи подразделяются на два вида:

F-муравьи (Forward ants) направляются по сети от узла-источника к узлу назначения, В-муравьи (Backward ants) направляются в обратном направлении. Оба множества агентов имеют одинаковую структуру, но при этом различаются своим поведением в сети. F-муравьи собирают статистику о состоянии сети, они не изменяют таблицу маршрутизации. После достижения агентом узла назначения, на основе F-муравья создается и отправляется В-муравей. В него помещается информация, полученная F-муравьем, после чего F-муравей уничтожается. При прохождении В-муравья по обратному пути узлы сети обновляют свои таблицы маршрутизации. Каждый узел сети осуществляет рассылку F-муравьев с заданной периодичностью Δt .

Каждый узел сети k содержит таблицу маршрутизации T_k и структуру локальной модели трафика M_k . Таблица T_k представляет собой матрицу, в которой каждая строка соответствует узлу сети, а столбец – сетевому интерфейсу узла. Кроме этого, для каждого возможного узла d и для каждого соседнего узла n , таблица T_k хранит вероятность P_{nd} выбора узла n при условии, что d – узел-приемник:

$$\sum_{n \in N_k} P_{nd} = 1, d \in [1, N], \quad (3)$$

$$N_k = \{k \text{ node neighbors}\}.$$

Структура M_k представляет собой массив, определяющий локальную параметрическую модель распределения трафика с точки зрения узла k .

Модель является адаптивной, формируется для каждого узла d с математическим ожиданием μ_d и дисперсией σ_d времени обхода сети агентами и массивом скользящего окна наблюдений W_d . В момент времени, когда В-муравей приходит в узел k , время достижения узла d из узла k $o_{k \rightarrow d}$ помещается в массив W_d .

Для расчета характеристик в алгоритме используется экспоненциальная модель:

$$\mu_d := \mu_d + \eta(o_{k \rightarrow d} - \mu_d), \quad (4)$$

$$\sigma_d^2 := \sigma_d^2 + \eta(o_{k \rightarrow d} - \mu_d)^2 - \sigma_d^2, \quad (5)$$

где η – весовой коэффициент.

Массив скользящего окна наблюдений W_d используется для расчета значения W_{bestd} — экспериментальной оценки нижней границы времени достижения узла d из текущего узла k .

$\{T_k\}$ и $\{M_k\}$ образуют локальную память узлов. Модель M_k содержит абсолютные оценки расстояния/времени ко всем узлам, таблица маршрутизации T_k содержит относительные вероятностные оценки полезности перехода для каждой пары «линия связи — узел-получатель».

Муравьи адаптируют свои перемещения к изменяющемуся распределению трафика данных. Узлы-приемники для F-муравья выбираются в зависимости от модели трафика: если $f_{src,d}$ — величина потока передачи данных (в битах или количестве пакетов) от узла s к узлу d , то вероятность создания в узле src F-муравья с узлом-приемником d :

$$p_d = \frac{f_{src,d}}{\sum_{d'=1}^N f_{src,d'}}. \quad (6)$$

В каждом узле k F-муравей выбирает промежуточный узел n из множества тех узлов, которые он еще не посещал. Если агент посещал все узлы, смежные с узлом k , то по всем смежным узлам выбирается узел n с вероятностью:

$$P_{nd} = \frac{P_{nd} + \alpha \cdot l_n}{1 + \alpha(N_k - 1)}, \quad (7)$$

где P_{nd} — элемент таблицы маршрутизации; α — весовой коэффициент; l_n учитывает длину в битах очереди q_n к линии связи между узлами k и n :

$$l_n = 1 - \frac{q_n}{\sum_{n'=1}^{|N_k|} q_{n'}}. \quad (8)$$

Если в стеке F-муравья обнаружен цикл, т. е. муравей вернулся в уже пройденный узел, то информация об узлах цикла выталкивается из стека.

В-муравьи используют приоритетные очереди, чтобы как можно быстрее распространить между узлами информацию, собранную F-муравьями.

Когда В-муравей достигает узла k из

соседнего узла f , в узле k происходит обновление модели трафика M_k и элементов таблицы маршрутизации T_k , соответствующих узлу-приемнику d . M_k модифицируется по формулам (4), (5).

В таблице T_k увеличиваются вероятности P_{fd} (т. е. вероятности выбора соседнего узла f , если узел-приемник d) и уменьшаются другие вероятности P_{nd} путем нормирования:

$$P_{fd}' := P_{fd} + r(1 - P_{fd}), \quad (9)$$

$$P_{nd}' := P_{nd} - rP_{nd}, \quad n \in N_k, n \neq f, \quad (10)$$

где $r \in [0, 1]$ — коэффициент стабилизации, аналог феромонов.

Использование в алгоритме вероятностных маршрутных таблиц увеличивает производительность на 30–40 % [41].

Применение протоколов маршрутизации на основе алгоритма муравьиной колонии в самоорганизующихся сетях

Муравьиные оптимизационные алгоритмы отличаются от большинства традиционных алгоритмов маршрутизации. Для решения проблемы маршрутизации в самоорганизующихся сетях исследователями были предложены различные алгоритмы ACO: AntNet, ANTMANET [43], ARA [44], AntNet-RSLR [45], ACODV [46], MRAA [47], AntHocNet [48], ANT-DSR [49], ANT-DYMO [50], HOPNET [51] и др.

Маршрутная информация хранится в феромонных таблицах, которые представляют собой дистанционно-векторные двумерные матрицы. В природе роль таких таблиц выполняют феромоны. Пересылка контрольных пакетов и данных происходит стохастически с помощью этих таблиц (рис. 5). Представленный узел сети имеет в качестве своих соседей узлы X , Y и Z , узлами назначения являются все узлы сети. Сеть состоит из N узлов.

Муравьиные алгоритмы собирают маршрутную информацию посредством метода повторяющегося сэмпирования возможных маршрутов между узлом-источником и узлом-получателем, используя контрольные пакеты — муравьев. В высоко динамичных сетях, таких как FANET, для повышения эффективности и надежности используют

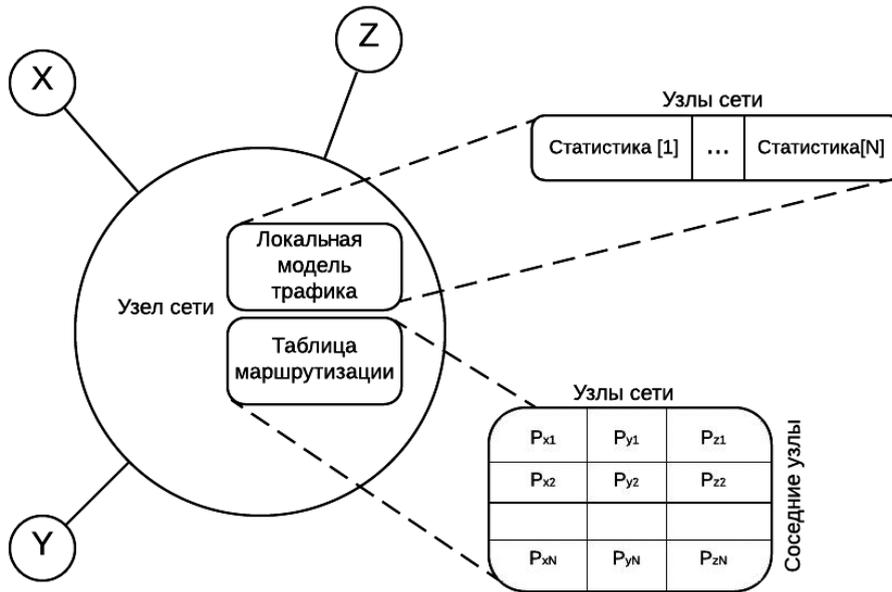


Рис. 5. Структура феромонной таблицы

ся механизмы создания резервных маршрутов, не имеющих общих сетевых узлов, процедуры «ремонта» маршрута, по которым передавались данные, в момент разрыва соединения и т. д.

Наибольшую эффективность продемонстрировали гибридные алгоритмы [52]. Рассмотрим гибридный многопутевой алгоритм AntHocNet. Данный алгоритм использует три множества муравьев: реактивные RF-муравьи (reactive forward ants), проактивные PF-муравьи (proactive forward ants) (рис. 6) и В-муравьи (backward ants). RF-муравей ищет путь к узлу назначения и превращается в В-муравья, когда достигает его. Когда начинается передача данных, запускаются проактивные PF-муравьи, контролирующие качество используемых путей. Такие агенты могут быть отправлены с малой вероятностью по широковещательной рассылке для исследования новых путей

Путь $Path$, который прошел RF-муравей, записывается в стек и используется В-муравьем для возврата в узел-источник (рис. 7). В-муравей пошагово вычисляет время \hat{T}_{Path} , которое понадобится пакету данных для достижения узла назначения при передвижении по пути $Path$. Это время используется для обновления таблицы маршрутизации:

$$\hat{T}_{Path} = \sum_{i=1}^{n-1} \hat{T}_{i \rightarrow i+1}, \quad i \in Path, \quad (11)$$

где $\hat{T}_{i \rightarrow i+1}$ – локальная оценка времени перехода из узла i в узел $i + 1$, $\hat{T}_{i \rightarrow i+1} = (Q_{mac}^i + 1) \cdot \hat{T}_{mac}^i$; \hat{T}_{mac} – среднее время отправки одного пакета; Q_{mac}^i – текущее количество пакетов в очереди для отправки на MAC-уровне.

\hat{T}_{mac}^i вычисляется как скользящее среднее время, прошедшее между прибытием пакета на MAC-уровне и окончанием успешной отправки:

$$\hat{T}_{mac}^i = \alpha \hat{T}_{mac}^i + (1 + \alpha) t_{mac}^i, \quad (12)$$

где $\alpha \in [0, 1]$, t_{mac}^i – время, затрачиваемое на отправку пакета из узла i .

В каждом промежуточном узле $i \in Path$ В-муравей настраивает путь по направлению к узлу-приемнику d , создавая или обновляя записи T_{nd}^i таблицы маршрутизации. По прибытии в узел i из соседнего узла n муравьи создают запись в таблице маршрутизации T_p , помечая n как следующий ретрансляционный участок достижения узла d . Запись i содержит значение феромона T_{nd}^i , которое определяет полезность пути в узел d через узел n . Если $\hat{T}_{i \rightarrow d}$ время движения, полученное муравьем, и h – ко-

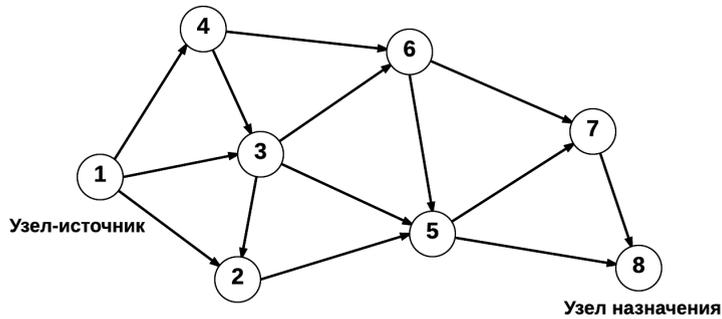


Рис. 6. Установление реактивного соединения. RF-муравей ищет путь к узлу назначения

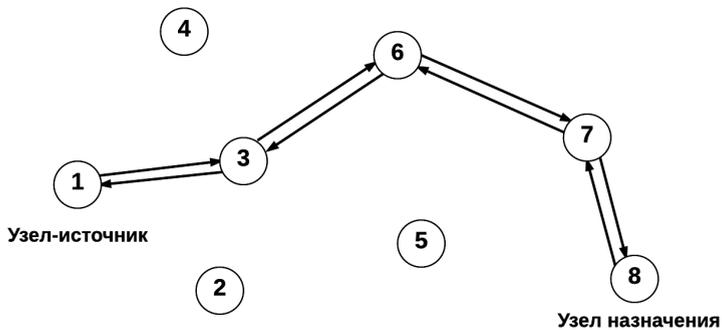


Рис. 7. RF-муравей превращается в В-муравья для возврата в узел-источник

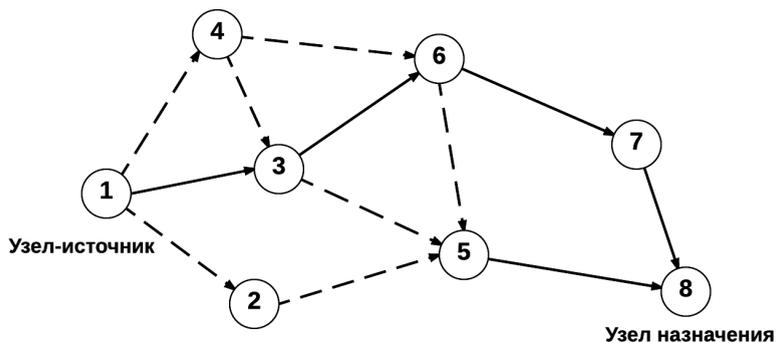


Рис. 8. Контроль качества путей с использованием проактивных RF-муравьев

личество ретрансляционных участков, то значение феромона определяется как

$$\tau_{id} = \left(\frac{(\hat{T}_{i \rightarrow d} + hT_{hop})}{2} \right)^{-1}, \quad (13)$$

где T_{hop} – фиксированное значение времени нахождения одного ретрансляционного участка в незагруженном состоянии. Если в T уже находится запись T_{nd}^i , то ее значение обновляется с помощью взвешенного среднего:

$$T_{nd}^i = \gamma T_{nd}^i + (1 - \gamma)\tau_{id}, \quad \gamma \in [0,1]. \quad (14)$$

Узлы в AntHocNet маршрутизируют данные стохастически. Если на пути к узлу d узел k имеет множество вероятных ретрансляционных участков n , то один из них выбирается с вероятностью P_{nd} :

$$P_{nd} = \frac{T_{nd}^2}{\sum_{i \in N_d} T_{id}^2}. \quad (15)$$

PF-муравьи используются для периоди-

ческого контроля качества путей (рис. 8). Эти агенты перемещаются по следу феромона по тому же пути, что и пакеты данных, и могут быть отправлены по ширококвещательной рассылке. Число ширококвещательных рассылок не превышает двух. Если F-муравей не находит маршрутной информации на расстоянии двух ретрансляционных участков, он удаляется.

Для улучшения маршрутизации RF-муравьев и PF-муравьев в AntHocNet используются Hello-пакеты. С их помощью узлы собирают информацию о своих текущих соседях и хранят ее в феромонных таблицах. Если узлом-приемником является соседний узел, то муравей отправляется в него без использования ширококвещательной рассылки.

Узлы могут обнаруживать отказы линий связи. Потерянная линия считается «важной», если она часто использовалась для отправки данных, или если нет альтернативных путей к соседнему узлу. В этом случае узел должен попытаться восстановить путь.

После отказа узел отправляет по ширококвещательной рассылке восстанавливающего муравья (route repair ant), который движется к узлу-цели как RF-муравей. Он использует маршрутную информацию, когда это возможно. В остальных случаях он использует ширококвещательную рассылку. Узел ожидает возвращения восстанавливающего муравья в течение времени, равного $5 \cdot T_{k \rightarrow d}$, где $T_{k \rightarrow d}$ – последняя оценка времени достижения узла d из узла k . Если восстанавливающий муравей не возвращается, то считается, что найти альтернативный путь невозможно, и запись о потерянном пути (узле) удаляется из таблицы маршрутизации [41].

Имитационное моделирование

Проведение сравнительного анализа протоколов маршрутизации затруднено прежде всего тем, что на процесс передачи данных в самоорганизующихся Ad Hoc сетях влияет большое количество различных факторов, многие из которых носят случайный характер и слабо поддаются строгому математическому анализу.

Моделирование протоколов маршрутизации осуществляется посредством программных симуляторов сетей, к ним относятся ns-2 [53], ns-3 [54], RIVERBED MODELER [55], OMNET++ [56], QualNet [57].

В данной работе исследования протоколов маршрутизации проводились в сетевом симуляторе ns-2. Для моделирования была использована версия 2.35, а также предусмотрен протокол AntHocNet. Сравнение проводилось с протоколами, модели которых реализованы в ns-2: AODV, DSDV, DSR. Параметры для проведения имитационного моделирования, представленные в табл. 2, были одинаковыми для всех протоколов маршрутизации.

Для выполнения анализа производительности протоколов маршрутизации AODV, DSDV, DSR и AntHocNet использованы следующие параметры:

1. Процент доставленных пакетов (Packet Delivery Ratio – PDR). Этот параметр определяется соотношением между количеством пакетов, отправленных от узла-источника к узлу назначения, и количеством пакетов, фактически полученных узлом назначения:

$$PDR = \frac{R_x}{T_x}, \quad (16)$$

где R_x – количество пакетов, полученных узлом-получателем; T_x – количество пакетов, отправленных узлом-источником [58].

2. 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 [59].

3. Пропускная способность (Throughput) определяет скорость успешной доставки пакетов по каналу связи. На производительность пропускной способности влияет ряд факторов, в том числе объем трафика, тип трафика, время ожидания между узлом-источника и узлом назначения [60].

4. Полезная пропускная способность (Goodput) определяется из производительности полосы пропускания канала минус потери трафика для создания сеансов, подтверждений и инкапсуляции [61].

5. Накладные расходы на маршрутиза-

Таблица 2

Параметры имитационного моделирования

Параметры	Значение
Simulated area	1500 × 1500 м
Mobility model	Random waypoint (пауза 0 с)
UAV number	10, 20, 50, 100
Simulation runs	10
Simulation duration	100 с
Maximum nodes velocity	30 м/с
Traffic type	CBR
CBR packets per second	10
MAC layer protocol	802.11
Connections number	10, 20, 25, 50
Signal Propagation Model	Friis
Data links antenna	Omni
Transport Protocol	UDP
Packet size	512 Bytes

цию (Routing Overhead): накладные расходы на поиск маршрутов и построение таблицы маршрутизации [62].

Результаты имитационного моделирования

В данном разделе представлен экспериментальный анализ протоколов маршрутизации AODV, DSDV, DSR и AntHocNet.

Было предположено, что с ростом количества узлов и с увеличением их подвижности протокол AntHocNet будет вести себя

лучше, чем другие протоколы, такие как AODV, DSDV и DSR. Для того чтобы проверить данную гипотезу, было проведено компьютерное моделирование мобильной сети с данными протоколами и с изменяемыми значениями количества узлов и скорости узлов.

На рис. 9 видно, что для малого количества узлов разница в значении задержки для всех протоколов малозаметна, но с ростом размерности задачи задержки для про-

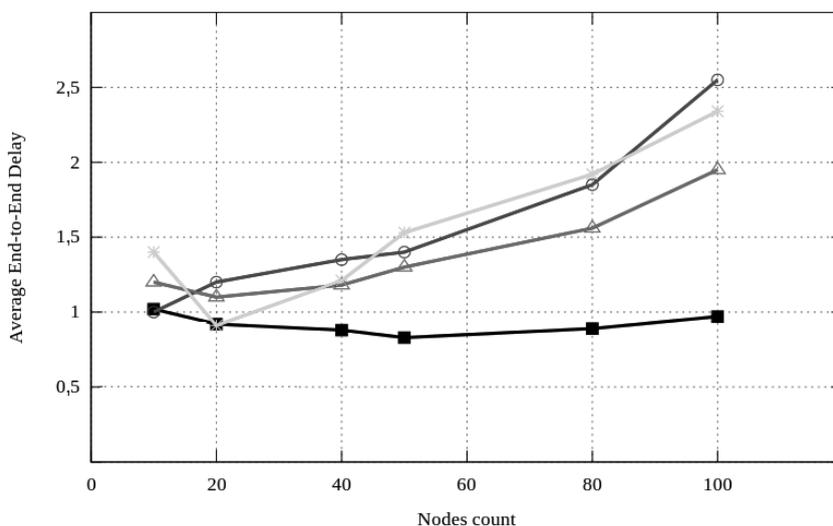


Рис. 9. Соотношение сквозной задержки и количества узлов (■) AntHocNet; (○) AODV; (△) DSR; (☆) DSDV

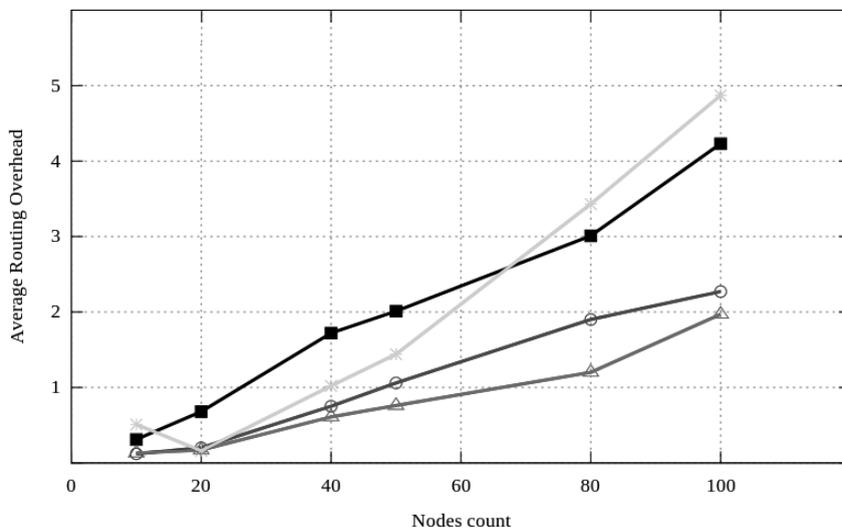


Рис. 10. Соотношение служебного трафика и количества узлов (■) AntHocNet; (○) AODV; (△) DSR; (×) DSDV

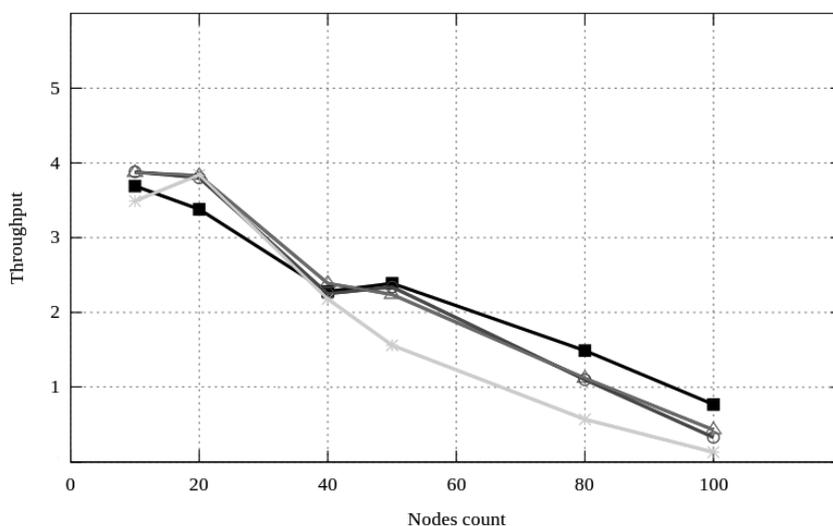


Рис. 11. Соотношение пропускной способности и количества узлов (■) AntHocNet; (○) AODV; (△) DSR; (×) DSDV

токолов AODV DSDV и DSR значительно растут, тогда как у протокола AntHocNet задержки либо растут незначительно, либо остаются такими же.

На рис. 10 отражены значения издержек маршрутизации относительно количества узлов. AntHocNet имеет большие издержки по сравнению с AODV и DSDV и сопоставимую, иногда меньшую, издержку по сравнению с DSR. С ростом числа узлов издержки протоколов AODV и DSDV растут, тогда как издержки AntHocNet остаются

прежними либо растут незначительно.

На рис. 11 видно, что пропускная способность AntHocNet лучше, чем у AODV, DSDV и DSR при большом количестве узлов. Можно сказать, что протокол AntHocNet имеет большую стабильность по отношению к другим протоколам, упомянутым в статье. Несмотря на то, что у протокола DSR были такие же или большие издержки, чем у AntHocNet, пропускная способность DSR немного лучше т. к. большие пакеты маршрутизации AntHocNet заполняют всю

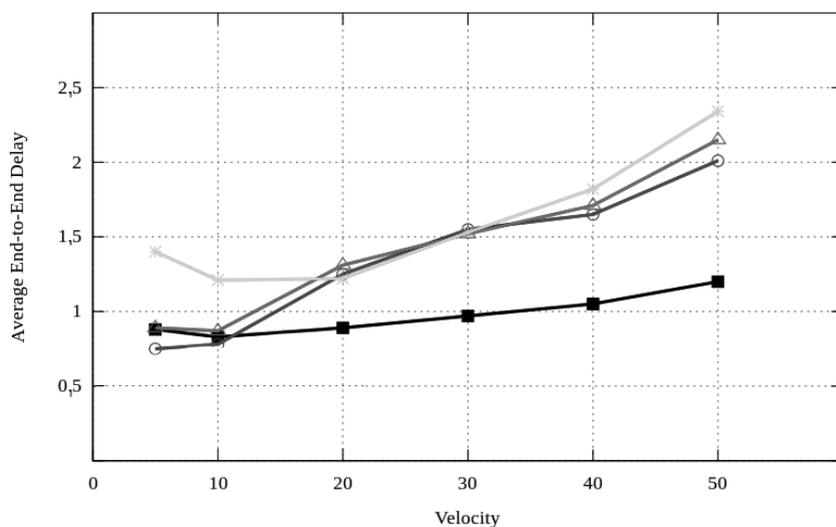


Рис. 12. Соотношение сквозной задержки и скорости движения узлов (■) AntHocNet; (○) AODV; (△) DSR; (*) DSDV

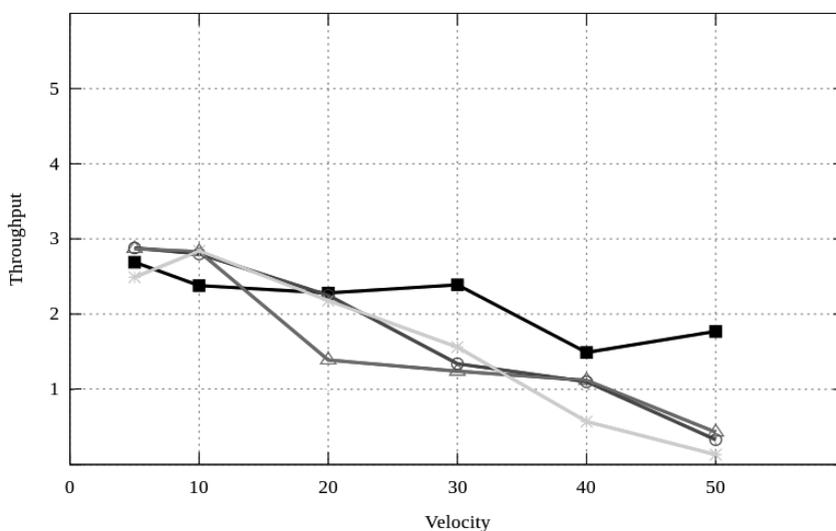


Рис. 13. Соотношение пропускной способности и скорости движения узлов (■) AntHocNet; (○) AODV; (△) DSR; (*) DSDV

пропускную способность канала.

На рис. 12–14 представлены результаты моделирования для постоянного числа узлов, но для различных скоростей. На них прослеживаются те же тенденции, что и на предыдущих рисунках.

На рис. 12 показано, что рост подвижности узлов почти не влияет на задержки сети для протокола AntHocNet, однако другие протоколы чувствительны к большим скоростям, особенно AODV.

На рис. 13 видно, что несмотря на боль-

шие издержки AntHocNet показывает лучшие результаты пропускной способности сети по сравнению с другими протоколами.

На рис. 14 видно, что AntHocNet более стабилен по сравнению с другими протоколами в условиях большой мобильности узлов.

На основе результатов исследования, полученных в ходе проведения серии тестов, можно сделать вывод, что протокол AntHocNet имеет в целом лучшие показатели по the metric like end-to-end delay,

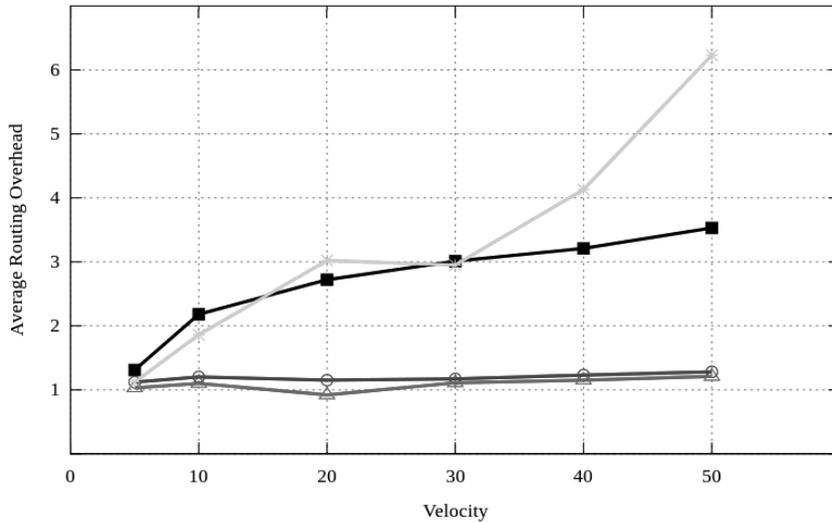


Рис. 14. Соотношение служебного трафика и скорости движения узлов
(—■—) AntHocNet; (---○---) AODV; (····△····) DSR; (-·-·-◇-·-·-) DSDV

throughput and goodput по сравнению с протоколами AODV, DSDV и DSR. Рассмотренный протокол маршрутизации AntHocNet имеет хорошую масштабируемость и может быть рекомендован для организации сетей FANET, характеризующихся высокой скоростью передачи данных и высокой подвижностью узлов.

Отдельно стоит отметить тот факт, что в отличие от ранее проведенных исследований нами впервые было реализовано сравнение протоколов маршрутизации AODV, DSDV, DSR и AntHocNet с целью получения экспериментального подтверждения возможности эффективного использования протоколов на базе алгоритма муравьиной колонии в сетях FANET.

Маршрутизация в сетях FANET является сложной задачей из-за динамически изменяющейся топологии и высокой мобильности узлов. Рассмотренные методы маршрутизации дают представление о разнообразии и специфике способов обмена данными в FANET.

Существуют различные подходы к решению задачи маршрутизации на основе применения муравьиных алгоритмов, которые были проанализированы в ходе подготовки научной статьи. Применение муравьиных алгоритмов, основанных на

вероятностных правилах и использующих эвристически задаваемые параметры, позволяет снизить вероятность возникновения отказов в обслуживании и перегрузок в сети, что подтверждается результатами исследования.

В проведенном экспериментальном исследовании проанализированы протоколы маршрутизации AODV, DSDV, DSR и AntHocNet. Протокол AntHocNet имеет преимущество в работе над протоколами AODV и DSDV с точки зрения соотношения доставки пакетов, end-to-end delay, особенно в условиях большого количества узлов. Это связано с тем, что AODV и DSDV плохо работают в ситуациях с высокой подвижностью узлов. Из эксперимента видно, что для сети с высокой динамичностью узлов лучше подходят протоколы DSR и AntHocNet. Однако AntHocNet менее эффективен из-за высоких накладных расходов по передаче служебной информации о маршрутизации.

На сегодняшний день не существует универсального решения для задачи передачи данных, тем не менее решения, базирующиеся на методах муравьиной колонии, демонстрируют свою эффективность. Дальнейшим перспективным направлением исследований в рассматриваемой области является разработка и реализация гибрид-



ного алгоритма на основе муравьиного и пчелиного алгоритмов, что позволит нивелировать недостатки одного алгоритма преимуществами другого, увеличить произ-

водительность сети, сократить требования к аппаратным ресурсам узлов и уменьшить накладные расходы (количество передаваемой служебной информации).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bekmezci I., Sahingoz O.K., Temel S.** Flying Ad Hoc Networks (FANETs) // A Survey. *Ad Hoc Netw.* 2013. Vol. 11. No. 3. Pp. 1254–1270.
2. **Tareque M.H., Hossain M.S., Atiquzzaman M.** On the Routing in Flying Ad Hoc Networks // Proc. of the Federated Conf. on Computer Science and Information Systems. 2015. Vol. 5. Pp. 1–9.
3. **Vasiliev D.S., Meitis D.S., Abilov A.** Simulation-based Comparison of AODV, OLSR and HWMP Protocols for Flying Ad Hoc Networks // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. 2014. Vol. 8638. Pp. 245–252.
4. **Pei G., Gerla M., Chen T.-W.** Fisheye State Routing: A Routing Scheme for Ad Hoc Wireless Networks // Communications. 2000. Vol. 1. Pp. 70–74.
5. **Clausen T., Jacquet P.** Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) RFC 3626. URL: <https://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>. (Дата обращения: 23.03.2016).
6. **Alshbatat A.I., Dong L.** Cross Layer Design for Mobile Ad Hoc Unmanned Aerial Vehicle Communication Networks // Networking, Sensing and Control. 2010. Pp. 331–336.
7. **Paul A.B., Nandi S.** Modified Optimized Link State Routing (M-OLSR) for Wireless Mesh Networks // Internat. Conf. on Information Technology. 2008. Pp. 147–152.
8. **Sharma S.** P-OLSR: Position-based Optimized Link State Routing for Mobile Ad Hoc Networks // Local Computer Networks. 2009. Pp. 237–240.
9. **Belhassen M., Belghith A., Abid M.A.** Performance Evaluation of a Cartography Enhanced OLSR for Mobile Multi-Hop Ad Hoc Networks // Wireless Advanced. 2011. Pp. 149–155.
10. **Perkins C.E., Bhagwat P.** Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 1994. Vol. 24. Pp. 234–244.
11. WikiStart – Open-Mesh – Open Mesh. URL: <https://www.open-mesh.org/projects/open-mesh/wiki>. (Дата обращения: 11.02.2016).
12. **Narra H., Cetinkaya E.K., Sterbenz J.P.** Performance Analysis of AeroRP with Ground Station Advertisements // Proc. of the 1st ACM MobiHoc Workshop on Airborne Networks and Communications. 2012. Pp. 43–47.
13. **Tiwari A.** Mobility Aware Routing for the Airborne Network Backbone // Military Communications Conf. 2008. Pp. 1–7.
14. **Zhou Q., Gu W., Li J., Sun Q., Yang F.** A Topology Aware Routing Protocol Based ADS-B System for Aeronautical Ad Hoc Networks // Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. 2012. Pp. 1–4.
15. **Kaddoura M., Trent B., Ramanujan R., Hadynski G.** BGP-MX: Border Gateway Protocol with Mobility Extensions // Military Communications Conf. 2011. Pp. 687–692.
16. RFC 3561 – Ad Hoc on-Demand Distance Vector (AODV) Routing. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc3561>. (Дата обращения: 11.02.2016).
17. **Aggarwal A.** AODVSEC: A Novel Approach to Secure Ad Hoc on-Demand Distance Vector (AODV) Routing Protocol from Insider Attacks in MANETs. // Int. J. Comput. Netw. Commun. 2012. Vol. 4. No. 4. Pp. 191–210.
18. **Forsmann J.H., Hiromoto R.E., Svoboda J.** A Time-Slotted on-Demand Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Unmanned Vehicle Systems // Defense and Security Symp. 2007. Vol. 6561. Pp. 6561P–65611P.
19. Multicast Ad Hoc On-Demand Distance Vector (MAODV) Routing. URL: <https://www.ietf.org/proceedings/48/I-D/manet-maodv-00.txt>. (Дата обращения: 12.02.2016).
20. RFC 4728 – The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4. URL: <http://www.rfc-base.org/rfc-4728.html>. (Дата обращения: 12.02.2016).
21. **Hou X., Tipper D., Kabara J.** Label-Based Multipath Routing (LMR) in Wireless Sensor Networks // Proc. 6th Internat. Symp. on Advanced Radio Technologies. 2004. Pp. 113–118.
22. **Billington J., Yuan C.** On Modelling and Analysing the Dynamic MANET on-Demand (DYMO) Routing Protocol // Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency. 2009. Pp. 98–126.
23. **Kuperman G., Veytser L., Cheng B.-N.,**

- Moore S., Narula-Tam A.** A Comparison of OLSR and OSPF-MDR for Large-Scale Airborne Mobile Ad Hoc Networks // Proc. of the 3rd ACM Workshop on Airborne Networks and Communications. 2014. Pp. 17–22.
24. **ZRP.** URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=374554>. (Дата обращения: 11.02.2016).
25. **Ramasubramanian V., Haas Z.J., Sireer E.G.** SHARP: A Hybrid Adaptive Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks // Proc. of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. 2003. Pp. 303–314.
26. **Pei G., Gerla M., Hong X., Chiang C.-C.** A Wireless Hierarchical Routing Protocol with Group Mobility // Wireless Communications and Networking Conf. 1999. Pp. 1538–1542.
27. **The Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA).** URL: <http://www.ietf.org/proceedings/40/slides/manet-tora/> (Дата обращения: 11.02.2016).
28. **Karp B., Kung H.-T.** GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks // Proc. of the 6th Annual Internat. Conf. on Mobile Computing and Networking. 2000. Pp. 243–254.
29. **Lin L., Sun Q., Li J., Yang F.** A Novel Geographic Position Mobility Oriented Routing Strategy for UAVs // J. Comput. Inf. Syst. 2012. Vol. 8. No. 2. Pp. 709–716.
30. **Lidowski R.L., Mullins B.E., Baldwin R.O.** A Novel Communications Protocol Using Geographic Routing for Swarming Uavs Performing a Search Mission // Pervasive Computing and Communications. 2009. Pp. 1–7.
31. **Lin L., Sun Q., Wang S., Yang F.** A geographic mobility prediction routing protocol for Ad Hoc UAV Network // Globecom Workshops. 2012. Pp. 1597–1602.
32. **Basagni S., Chlamtac I., Syrotiuk V.R., Woodward B.A.** A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM) // Proc. of the 4th Annual ACM/IEEE Internat. Conf. on Mobile Computing and Networking. 1998. Pp. 76–84.
33. **Ko Y.-B., Vaidya N.H.** Location-Aided Routing (LAR) in Mobile Ad Hoc Networks // Wirel. Netw. 2000. Vol. 6. No. 4. Pp. 307–321.
34. **Pei G., Gerla M., Hong X.** LANMAR: Landmark Routing for Large Scale Wireless Ad Hoc Networks with Group Mobility // Proc. of the 1st ACM Internat. Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. 2000. Pp. 11–18.
35. **Beni G., Wang J.** Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems. Robots and Biological Systems // Towards a New Bionics. 1993. Pp. 703–712.
36. **New Ideas in Optimization.** URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=329055> (Дата обращения: 11.02.2016).
37. **Кажаров А.А., Курейчик В.М.** Использование шаблонных решений в муравьиных алгоритмах // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 7 (144). С. 17–22.
38. **Blum C.** Ant colony optimization: Introduction and recent trends // Phys. Life Rev. 2005. Vol. 2. No. 4. Pp. 353–373.
39. **Моделирование мультиагентных систем. Доклады ученых и специалистов по проблемам разработки и исследования систем.** URL: <http://torreferat.znate.ru/docs/index-3295.html?page=54> (Дата обращения: 03.12.2016).
40. **Schoonderwoerd R., Holland O.E., Bruten J.L., Rothkrantz L.J.M.** Ant-Based Load Balancing in Telecommunications Networks // Adapt. Behav. 1997. Vol. 5. No. 2. Pp. 169–207.
41. **Ладыженский Ю.В., Мирецкая В.А., Мирецкий А.В.** Применение муравьиных алгоритмов для решения задачи маршрутизации в компьютерных сетях // Наукові Праці Донецького Національного Технічного Університету. 2007. № 8(120). С. 178–192.
42. **Di Caro G., Dorigo M.** AntNet: Distributed Stigmergetic Control for Communications Networks // J. Artif. Intell. Res. 1998. Pp. 317–365.
43. **Abuhmida M., Radhakrishnan K., Wells I.** ANTMANET: A Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks // Computational Intelligence, Communication Systems and Networks. 2015. Pp. 210–215.
44. **Günes M., Bouazizi I., Sorges U.** ARA – The Ant-Colony Based Routing Algorithm for MANETs // Proc. 2002 ICCP Workshop Ad Hoc Netw. 2002. Pp. 79–85.
45. **Radwan A.A., Mahmoud T.M., Hussein E.H.** AntNet-RSLR: a Proposed Ant Routing Protocol for MANETs // Electronics, Communications and Photonics Conf. 2011. Pp. 1–6.
46. **Du Plessis J.** ACODV: Ant Colony Optimisation Distance Vector Routing Ad Hoc Networks. University of Pretoria South Africa, 2005.
47. **Abd Elmoniem A.M., Ibrahim H.M., Mohamed M.H., Hedar A.-R.** Ant Colony and Load Balancing Optimizations for AODV Routing Protocol // Int. J. Sens. Netw. Data Commun. 2011. Vol. 1. Pp. 1–14.

48. **Di Caro G., Ducatelle F., Gambardella L.M.** AntHocNet: an Ant-based Hybrid Routing Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks // *Parallel Problem Solving from Nature-PPSN VIII*. 2004. Pp. 461–470.
49. **Aissani M., Fenouche M., Sadour H., Mellouk A.** Ant-DSR: Cache Maintenance Based Routing Protocol for Mobile Ad-Hoc Networks // *Telecommunications*. 2007. The 3rd Advanced Internat. Conf. 2007. Pp. 35–35.
50. **Martins J.A.P., Correia S.L.O., Celestino J.** Ant-DYMO: a Bio-Inspired Algorithm for MANETS // *Telecommunications*, 2010 IEEE 17th Internat. Conf. 2010. Pp. 748–754.
51. **Wang J., Osagie E., Thulasiraman P., Thulasiram R.K.** HOPNET: A Hybrid Ant Colony Optimization Routing Algorithm for Mobile Ad Hoc Network // *Ad Hoc Netw.* 2009. Vol. 7. No. 4. Pp. 690–705.
52. **Боронин П.Н., Кучерявый А.Е.** Интернет вещей как новая концепция развития сетей связи // *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2014. № 3 (7). С. 7–30.
53. The Network Simulator – ns-2. URL: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> (Дата обращения: 03.12.2016).
54. What is ns-3. URL: <https://www.nsnam.org/overview/what-is-ns-3/> (Дата обращения: 03.12.2016).
55. SteelCentral Riverbed Modeler | Riverbed | GB. URL: <https://www.riverbed.com/gb/products/steelcentral/steelcentral-riverbed-modeler.html>. (Дата обращения: 03.12.2016).
56. OMNeT++ Discrete Event Simulator – Home. URL: <https://omnetpp.org/> (Дата обращения: 03.12.2016).
57. Qualnet – Packet Trace | SCALABLE Networks. URL: <http://web.scalable-networks.com/qualnet-network-simulator> (Дата обращения: 03.12.2016).
58. **Gulati M.K., Kumar K.** Performance Comparison of Mobile Ad Hoc Network Routing Protocols // *Int. J. Comput. Netw. Commun.* 2014. Vol. 6. No. 2. Pp. 127–142.
59. **Liu J., Jiang X., Nishiyama H., Kato N., Shen X.** End-to-end Delay in Mobile Ad Hoc Networks with Generalized Transmission Range and Limited Packet Redundancy // *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conf.* 2012. Pp. 1731–1736.
60. **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 // *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*. 1st Annual IEEE Communications Society Conf. 2004. Pp. 200–209.
61. **Seddik-Ghaleb A., Ghamri-Doudane Y., Senouci S.-M.** Effect of Ad Hoc Routing Protocols on TCP Performance within MANETs // *3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*. 2006. Vol. 3. Pp. 866–873.
62. **Jacquet P., Viennot L.** Overhead in Mobile Ad-Hoc Network Protocols // *Research Report-3965*. INRIA, France, 2000.

REFERENCES

1. **Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel S.** Flying Ad Hoc Networks (FANETs): A Survey. *Ad Hoc Netw.*, 2013, Vol. 11, No. 3, Pp. 1254–1270.
2. **Tareque M.H., Hossain M.S., Atiquzzaman M.** On the Routing in Flying Ad Hoc Networks. *Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, 2015, Vol. 5, Pp. 1–9.
3. **Vasiliev D.S., Meitis D.S., Abilov A.** Simulation-Based Comparison of AODV, OLSR and HWMP Protocols for Flying Ad Hoc Networks. *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*, 2014, Vol. 8638, Pp. 245–252.
4. **Pei G., Gerla M., Chen T.-W.** Fisheye State Routing: A Routing Scheme for Ad Hoc Wireless Networks. *Communications*, 2000, Vol. 1, Pp. 70–74.
5. **Clausen T., Jacquet P.** *Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) RFC 3626*. Available: <https://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>. (Accessed: 23.03.2016).
6. **Alshbatat A.I., Dong L.** Cross Layer Design for Mobile Ad Hoc Unmanned Aerial Vehicle Communication Networks. *Networking, Sensing and Control*, 2010, Pp. 331–336.
7. **Paul A.B., Nandi S.** Modified Optimized Link State Routing (M-OLSR) for Wireless Mesh Networks. *International Conference on Information Technology*, 2008, Pp. 147–152.
8. **Sharma S.** P-OLSR: Position-Based Optimized Link State Routing for Mobile Ad Hoc Networks. *Local Computer Networks*, 2009, Pp. 237–240.
9. **Belhassen M., Belghith A., Abid M.A.** Performance Evaluation of a Cartography Enhanced OLSR for Mobile Multi-Hop Ad Hoc Networks. *Wireless Advanced*, 2011, Pp. 149–155.

10. Perkins C.E., Bhagwat P. Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 1994, Vol. 24, Pp. 234–244.
11. WikiStart – Open-Mesh – Open Mesh. Available: <https://www.open-mesh.org/projects/open-mesh/wiki>. (Accessed: 11.02.2016).
12. Narra H., Cetinkaya E.K., Sterbenz J.P. Performance Analysis of AeroRP with Ground Station Advertisements. *Proceedings of the 1st ACM MobiHoc Workshop on Airborne Networks and Communications*, 2012, Pp. 43–47.
13. Tiwari A. Mobility Aware Routing for the Airborne Network Backbone. *Military Communications Conference*, 2008, Pp. 1–7.
14. Zhou Q., Gu W., Li J., Sun Q., Yang F. A Topology Aware Routing Protocol Based ADS-B System for Aeronautical Ad Hoc Networks. *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 2012, Pp. 1–4.
15. Kaddoura M., Trent B., Ramanujan R., Hadynski G. BGP-MX: Border Gateway Protocol with Mobility Extensions. *Military Communications Conference*, 2011, Pp. 687–692.
16. RFC 3561 – Ad Hoc on-Demand Distance Vector (AODV) Routing. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc3561> (Accessed: 11.02.2016).
17. Aggarwal A. AODVSEC: A Novel Approach to Secure Ad Hoc on-Demand Distance Vector (AODV) Routing Protocol from Insider Attacks in MANETs. *Int. J. Comput. Netw. Commun.*, 2012, Vol. 4, No. 4, Pp. 191–210.
18. Forsmann J.H., Hiromoto R.E., Svoboda J. A Time-Slotted on-Demand Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Unmanned Vehicle Systems. *Defense and Security Symposium*, 2007, Vol. 6561, Pp. 6561P–65611P.
19. Multicast Ad Hoc on-Demand Distance Vector (MAODV) Routing. Available: <https://www.ietf.org/proceedings/48/1-D/manet-maodv-00.txt>. (Accessed: 12.02.2016).
20. RFC 4728 – The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4. Available: <http://www.rfc-base.org/rfc-4728.html>. (Accessed: 12.02.2016).
21. Hou X., Tipper D., Kabara J. Label-Based Multipath Routing (LMR) in Wireless Sensor Networks. *Proc. 6th International Symposium on Advanced Radio Technologies*, 2004, Pp. 113–118.
22. Billington J., Yuan C. On Modelling and Analysing the Dynamic MANET on-Demand (DYMO) Routing Protocol. *Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency*, 2009, Pp. 98–126.
23. Kuperman G., Veytser L., Cheng B.-N., Moore S., Narula-Tam A. A Comparison of OLSR and OSPF-MDR for Large-Scale Airborne Mobile Ad Hoc Networks. *Proceedings of the 3rd ACM Workshop on Airborne Networks and Communications*, 2014, Pp. 17–22.
24. ZRP. Available: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=374554> (Accessed: 11.02.2016).
25. Ramasubramanian V., Haas Z.J., Siring E.G. SHARP: A hybrid adaptive routing protocol for mobile ad hoc networks. *Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing*, 2003, Pp. 303–314.
26. Pei G., Gerla M., Hong X., Chiang C.-C. A Wireless Hierarchical Routing Protocol with Group Mobility. *Wireless Communications and Networking Conference*, 1999, Pp. 1538–1542.
27. *The Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA)*. Available: <http://www.ietf.org/proceedings/40/slides/manet-tora/> (Accessed: 11.02.2016).
28. Karp B., Kung H.-T. GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks. *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, 2000, Pp. 243–254.
29. Lin L., Sun Q., Li J., Yang F. A Novel Geographic Position Mobility Oriented Routing Strategy for UAVs. *J. Comput. Inf. Syst.*, 2012, Vol. 8, No. 2, Pp. 709–716.
30. Lidowski R.L., Mullins B.E., Baldwin R.O. A Novel Communications Protocol Using Geographic Routing for Swarming Uavs Performing a Search Mission. *Pervasive Computing and Communications*, 2009, Pp. 1–7.
31. Lin L., Sun Q., Wang S., Yang F. A Geographic Mobility Prediction Routing Protocol for Ad Hoc UAV Network. *Globecom Workshops*, 2012, Pp. 1597–1602.
32. Basagni S., Chlamtac I., Syrotiuk V.R., Woodward B.A. A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM). *Proceedings of the 4th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, 1998, Pp. 76–84.
33. Ko Y.-B., Vaidya N.H. Location-Aided Routing (LAR) in Mobile Ad Hoc Networks. *Wirel. Netw.*, 2000, Vol. 6, No. 4, Pp. 307–321.
34. Pei G., Gerla M., Hong X. LANMAR: Landmark Routing for Large Scale Wireless Ad Hoc Networks with Group Mobility. *Proceedings of the 1st ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing*, 2000, Pp. 11–18.
35. Beni G., Wang J. Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems. *Robots and*

Biological Systems: Towards a New Bionics, 1993, Pp. 703–712.

36. *New Ideas in Optimization*. Available: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=329055> (Accessed: 11.02.2016).

37. **Kazharov A.A., Kureychik V. M.** Ispolzovaniye shablonnykh resheniy v muravinykh algoritmakh [Template using for ant colony algorithms]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskkiye nauki*, 2013, No. 7 (144), Pp. 17–22. (rus)

38. **Blum C.** Ant colony optimization: Introduction and recent trends. *Phys. Life Rev.*, 2005, Vol. 2, No. 4, Pp. 353–373.

39. *Modelirovaniye multiagentnykh system. Doklady uchenykh i spetsialistov po problemam razrabotki i issledovaniya system [Modeling of Multi-Agent Systems - Reports of Scientists and Specialists on Problems of System Development and Research]*. Available: <http://topreferat.znate.ru/docs/index-3295.html?page=54> (Accessed: 03.12.2016). (rus)

40. **Schoonderwoerd R., Holland O.E., Bruten J.L., Rothkrantz L.J.M.** Ant-Based Load Balancing in Telecommunications Networks. *Adapt. Behav.*, 1997, Vol. 5, No. 2, Pp. 169–207.

41. **Ladyzhenskij Ju.V., Mireckaja V.A., Mireckij A.V.** Primenenie murav'inykh algoritmov dlja reshenija zadachi marshrutizacii v komp'yuternykh setjah [Usage of Ant-Based Algorithms for Solving Routing Problem in the Computer Networks]. *Naukovi Praci Donec'kogo Nacional'nogo Tehnichnogo Universitetu*, 2007, No. 8 (120), Pp. 178–192. (rus)

42. **Di Caro G., Dorigo M.** AntNet: Distributed stigmergetic control for communications networks. *J. Artif. Intell. Res.*, 1998, Pp. 317–365.

43. **Abuhmida M., Radhakrishnan K., Wells I.** ANTMANET: A Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks. *Computational Intelligence, Communication Systems and Networks*, 2015, Pp. 210–215.

44. **Günes M., Bouazizi I., Sorges U.** ARA – The Ant-Colony Based Routing Algorithm for MANETs. *Proc 2002 ICPP Workshop Ad Hoc Netw.*, 2002, Pp. 79–85.

45. **Radwan A.A., Mahmoud T.M., Hussein E.H.** AntNet-RSLR: a Proposed Ant Routing Protocol for MANETs. *Electronics, Communications and Photonics Conference*, 2011, Pp. 1–6.

46. **Du Plessis J.** *ACODV: Ant Colony Optimisation Distance Vector Routing Ad Hoc Networks*. University of Pretoria South Africa, 2005.

47. **Abd Elmoniem A.M., Ibrahim H.M., Mohamed M.H., Hedar A.-R.** Ant Colony and Load Balancing Optimizations for AODV Routing Protocol. *Int. J. Sens. Netw. Data Commun.*, 2011,

Vol. 1, Pp. 1–14.

48. **Di Caro G., Ducatelle F., Gambardella L.M.** AntHocNet: an Ant-Based Hybrid Routing Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks. *Parallel Problem Solving from Nature-PPSN VIII*, 2004, Pp. 461–470.

49. **Aissani M., Fenouche M., Sadour H., Mellouk A.** Ant-DSR: Cache Maintenance Based Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks. *Telecommunications, The 3rd Advanced International Conference*, 2007, Pp. 35–35.

50. **Martins J.A.P., Correia S.L.O., Celestino J.** Ant-DYMO: a Bio-Inspired Algorithm for MANETS. *Telecommunications, 2010 IEEE 17th International Conference*, 2010, Pp. 748–754.

51. **Wang J., Osagie E., Thulasiraman P., Thulasiram R.K.** HOPNET: A Hybrid Ant Colony Optimization Routing Algorithm for Mobile Ad Hoc Network. *Ad Hoc Netw.*, 2009, Vol. 7, No. 4, Pp. 690–705.

52. **Boronin P.N., Kucheryavyy A.Ye.** Internet veshchey kak novaya kontseptsiya razvitiya setey svyazi [Internet of Things as a New Concept of the Telecommunication Networks Development]. *Informatsionnyye tekhnologii i telekommunikatsii*, 2014, No. 3 (7), Pp. 7–30. (rus)

53. *The Network Simulator – ns-2*. Available: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> (Accessed: 03.12.2016).

54. *What is ns-3*. Available: <https://www.nsnam.org/overview/what-is-ns-3/> (Accessed: 03.12.2016).

55. *SteelCentral Riverbed Modeler | Riverbed | GB*. Available: <https://www.riverbed.com/gb/products/steelcentral/steelcentral-riverbed-modeler.html>. (Accessed: 03.12.2016).

56. *OMNeT++ Discrete Event Simulator – Home*. Available: <https://omnetpp.org/> (Accessed: 03.12.2016).

57. *Qualnet – Packet Trace | SCALABLE Networks*. Available: <http://web.scalable-networks.com/qualnet-network-simulator> (Accessed: 03.12.2016).

58. **Gulati M.K., Kumar K.** Performance Comparison of Mobile Ad Hoc Network Routing Protocols. *Int. J. Comput. Netw. Commun.*, 2014, Vol. 6, No. 2, Pp. 127–142.

59. **Liu J., Jiang X., Nishiyama H., Kato N., Shen X.** End-to-end Delay in Mobile Ad Hoc Networks with Generalized Transmission Range and Limited Packet Redundancy. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2012, Pp. 1731–1736.

60. **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. *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. First Annual IEEE Communications Society Conference*, 2004, Pp. 200–209.

61. **Seddik-Ghaleb A., Ghamri-Doudane Y., Senouci S.-M.** Effect of Ad Hoc Routing Protocols on TCP Performance within MANETs. *3rd Annual*

IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2006, Vol. 3, Pp. 866–873.

62. **Jacquet P., Viennot L.** Overhead in Mobile Ad Hoc Network Protocols. *Research Report-3965*, INRIA, France, 2000.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ЛЕОНОВ Алексей Викторович

LEONOV Alexey V.

E-mail: kot@omgtu.ru

Статья поступила в редакцию 12.01.2017

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2017