

КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

DOI: 10.61726/8503.2025.41.80.001

УДК 65.011.8

СЕТИ ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ БПЛАВ.А. ВИШНЯКОВ¹, А.В. ВЕРЕМЕЕВ²

¹Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»,

ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Беларусь
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2929-8958>

²Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»,

ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Беларусь
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4380-758X>

Поступила в редакцию 4 марта 2025

Цель статьи – провести анализ сетей Интернет вещей для организации управления беспилотными летательными аппаратами. Рассмотрены летающие сенсорные сети FANET. Приведена классификация протоколов динамической маршрутизации в сети FANET (проактивные, реактивные, гибридные, иерархические, геомаршрутизации). Приведены особенности одноранговых и иерархических (кластерных) сетей. Рассмотрены три вида управления в FANET: централизованное, децентрализованное и гибридное. Сделан вывод, что перспектива управления БПЛА связана с алгоритмами искусственного интеллекта, таких как машинное обучение и swarm intelligence. Определены дальнейшие направления исследований.

Ключевые слова: сети FANET, беспилотные летательные аппараты, сети управления, протоколы, алгоритмы ИИ, машинное обучение, swarm intelligence.

Введение. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА, дроны) становятся все более востребованными в повседневной жизни, предлагая широкий спектр возможностей для их применения в различных сферах – от безопасности и мониторинга до доставки товаров и развлечений. Оптимизация механизированных операций и возможность контролировать процессы удаленно открывают новые перспективы для совершенствования технологии беспилотных авиационных систем, а также становятся неотъемлемой частью современного общества, улучшая качество жизни людей и повышая интерес бизнеса к данной отрасли.

БПЛА представляют собой аэродинамические устройства, способные выполнять задачи без прямого участия пилота. Они оснащены датчиками, камерами и другим оборудованием для сбора данных и выполнения определенных функций. Основные преимущества дронов заключаются в возможности проведения работ в труднодоступных или опасных местах для человека, а также в автоматизации многих технологических процессов. БПЛА имеют широкое гражданское применение в различных отраслях: медицине, науке, логистике, сельском хозяйстве и сфере добычи полезных ископаемых.

При всей эффективности эксплуатации БПЛА в гражданских или иных целях и отсутствии реального пилота, управление все же осуществляется не машиной, а специально обученными операторами. Управление беспилотными летательными аппаратами является важным аспектом их безопасного использования [2]. Для управления БПЛА используются сети интернета вещей, анализ которых является целью данной статьи.

Развитие систем коммуникаций и сетей связи позволит реализовать эффективное управление и координацию группы БПЛА, а также обмениваться информацией между ними и другими участниками системы. Это открывает новые возможности в области разведки, мониторинга, связи и транспортировки [3]. Использование беспроводной связи позволяет БЛА обмениваться данными и командами с оператором или другими устройствами в режиме реального времени. Это также открывает возможности для использования БЛА в системах интернета вещей и создания сети БЛА [4].

Летающие сенсорные сети. FANET (Flying Ad Hoc Network) [5, 6] по аналогии с автомобильными одноранговыми сетями VANET (Vehicular Ad Hoc Network) представляет собой разновидность сетей VANET, узлами сети которой являются беспилотные летательные аппараты (рис. 1). FANET обеспечивают широкий спектр возможностей для гражданского применения. Организация такого вида связи необходима не только для выполнения задач по обеспечению наблюдения, мониторинга, но и для координации движения средств, повышения безопасности (в качестве средства для предотвращения столкновения).

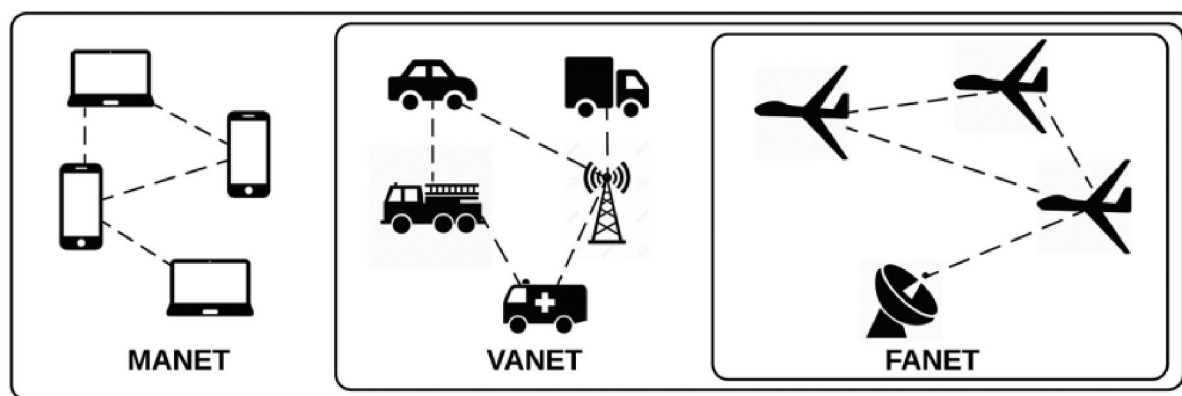


Рис. 1. MANET, VANET и FANET

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.

С учетом особенностей сетей FANET маршрутизация данных между узлом-отправителем, узлом-получателем и транзитными узлами представляет собой чрезвычайно сложную задачу. 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. Однако для дальнейшего развития FANETs необходимо решить ряд проблем, таких как обеспечение безопасности, оптимизация энергопотребления и повышение устойчивости к помехам.

Классификация протоколов динамической маршрутизации в сети FANET [7]. Эти протоколы могут быть разделены на пять основных категорий: проактивные, реактивные, гибридные, иерархические, 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 сети имеет граф связности сети, обеспечивающий решение задачи поиска кратчайшего пути.

Проактивными протоколами являются: FSR, OLSR и его разновидности (DOLSR, M-OLSR, P-OLSR или CE-OLSR), DSDV и AeroRP, MARP/MDP, ADS-B, BGP-MX.

Реактивные протоколы маршрутизации строят маршруты только тогда, когда они необходимы, т. е. непосредственно перед передачей данных. К ним относятся протоколы: AODV и его разновидности (AODVSEC, Time-slotted on-demand routing, MAODV), DSR, LMR, DYMO, OSPF-MDR и др.

Гибридные протоколы представляют собой симбиоз проактивных и реактивных протоколов. К ним относятся протоколы ZRP, SHARP, HRPO, TORA.

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, GPMOR, USMP, MPGR, DREAM, LAR.

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, DREAM [8].

Архитектура построения летающих сенсорных сетей (ЛСС) делится [8] на одноранговые и иерархические (кластерные) сети. Кроме того, ЛСС включают, по крайней мере, два сегмента сети: наземный и летающий. Естественно, что каждый из них также может быть построен не только с иерархией, но и без нее.

На рис. 2 приведен один из вариантов построения ЛСС, когда летающая сеть состоит из одного беспилотного летающего аппарата, периодически собирающего информацию с наземной всепроникающей сенсорной сети (ВСС).

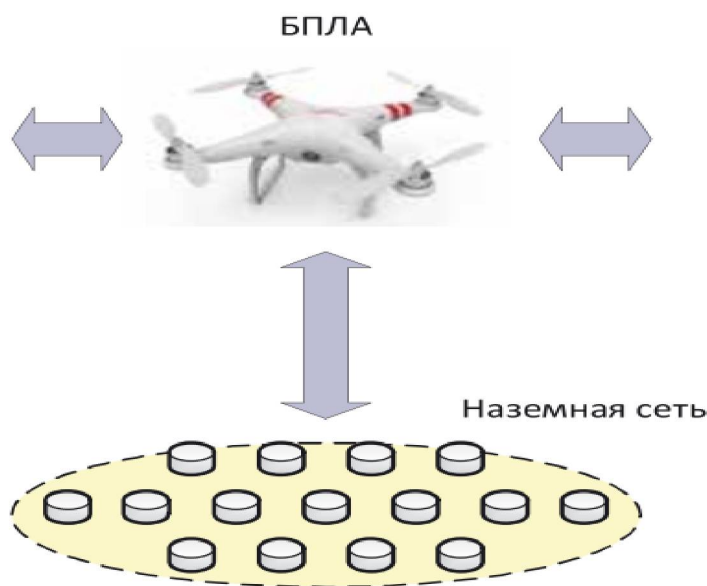


Рис. 2. ЛСС с одним БЛА и одноранговой наземной сетью

Такая ЛСС относится к классу сетей DTN (Delay Tolerant Network), т. е. сетей, толерантных к задержкам. Особенностью ЛСС даже в этом простейшем случае является очень большое число сенсорных узлов наземной сети. Действительно, только одно сенсорное поле при использовании протокола ZigBee может содержать более 64 000 тыс. сенсорных узлов. Поэтому целесообразно, как и в существующих структурах ВСС, кластеризовать наземный сегмент сети с той разницей, что в качестве головного узла кластера резонно использовать БПЛА. При этом в момент времени t_1 БПЛА будет головным узлом для первого кластера, а в момент t_n – для n -го (рис. 3).

БПЛА тогда должен быть оснащен техническими и программными средствами, позволяющими выполнять функции головного узла кластера ВСС, т. е. реализовывать физический и канальный уровни протокола IEEE 802.15.4, поддерживать обмен информацией по протоколам ZigBee, 6LoWPAN, RPL, обеспечивать реконфигурацию кластера, особенно для мобильного наземного сегмента ЛСС и т. д. На

рис. 4 приведена архитектура ЛСС с несколькими БПЛА, которые могут взаимодействовать между собой и с наземным сегментом ВСС.

Для такой архитектуры сети актуальным становится вопрос об организации кластерной сети для летающего сегмента ВСС, тем более что использование множества БПЛА позволяет избавиться от ограничений, налагаемых структурой сетей, толерантных к задержкам. Естественно, что кластеризация возможна и для наземного сегмента.

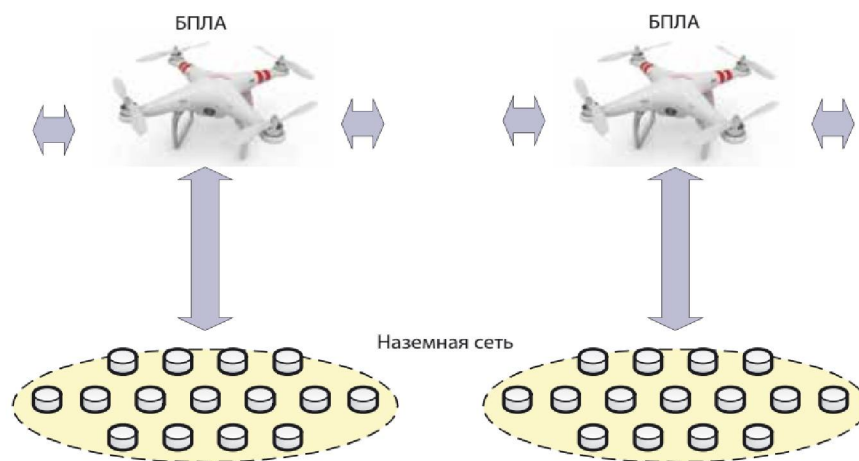


Рис. 3. КСС с одним БЛА и кластерной наземной сетью

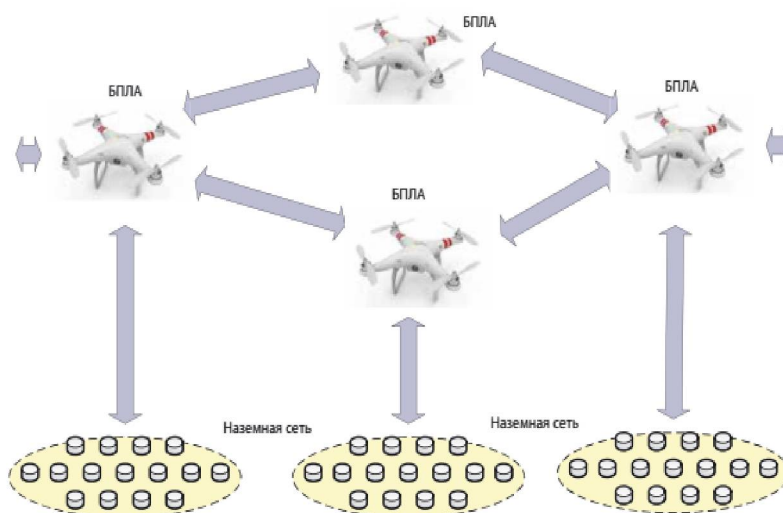


Рис. 4. ЛСС с несколькими БЛА и наземной кластерной сетью

В качестве алгоритма кластеризации для летающего сегмента ЛСС можно предложить имеющий хорошие характеристики для трехмерного пространства алгоритм максимального покрытия MCA (Maximum Coverage Algorithm), а для наземного сегмента – один из эффективных алгоритмов кластеризации ВСС для плоскостных моделей, например, алгоритм, основанный на диаграммах Вороного и методах нечеткой логики.

Важнейшим вопросом для всех указанных выше архитектурных решений по построению ЛСС является вопрос о том, в какой точке пространства наиболее эффективно собирать информацию от сенсорных узлов наземной сети [5].

Протоколы связи. Для обеспечения надежной связи в FANETs используются различные протоколы, адаптированные к особенностям летающих сетей [7].

Протоколы маршрутизации: AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) – протокол для динамического поиска маршрутов.

OLSR (Optimized Link State Routing) – протокол, оптимизированный для сетей с высокой мобильностью.

Протоколы передачи данных: MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) – легкий протокол для обмена сообщениями между устройствами IoT; CoAP (Constrained Application Protocol) – протокол, разработанный для устройств с ограниченными ресурсами.

В качестве алгоритма кластеризации для летающего сегмента ЛСС можно предложить имеющий хорошие характеристики для трехмерного пространства алгоритм максимального покрытия MCA (Maximum Coverage Algorithm), а для наземного сегмента – один из эффективных алгоритмов кластеризации ВСС для плоскостных моделей, например, алгоритм, основанный на диаграммах Вороного и методах нечеткой логики.

Важнейшим вопросом для всех указанных выше архитектурных решений по построению ЛСС является вопрос о том, в какой точке пространства наиболее эффективно собирать информацию от сенсорных узлов наземной сети [5].

Протоколы связи. Для обеспечения надежной связи в FANETs используются различные протоколы, адаптированные к особенностям летающих сетей [7]. Протоколы маршрутизации: AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) – протокол для динамического поиска маршрутов.

OLSR (Optimized Link State Routing) – протокол, оптимизированный для сетей с высокой мобильностью. Протоколы передачи данных: MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) – легкий протокол для обмена сообщениями между устройствами IoT; CoAP (Constrained Application Protocol) – протокол, разработанный для устройств с ограниченными ресурсами.

Протоколы безопасности: DTLS (Datagram Transport Layer Security) – для защиты данных при передаче. Эти протоколы обеспечивают эффективную коммуникацию между дронами и наземными станциями, а также защиту данных от несанкционированного доступа [7].

Организация управления. Управление дронами в FANETs требует решения ряда задач, таких как планирование маршрутов, координация движений и обработка данных. Для этого используются следующие подходы.

Централизованное управление: все решения принимаются на наземной станции, что упрощает контроль, но создает риск единой точки отказа.

Распределенное управление: дроны самостоятельно принимают решения на основе локальных данных, что повышает устойчивость системы.

Гибридное управление: сочетание централизованного и распределенного подходов для баланса между надежностью и автономностью.

Для реализации управления используются алгоритмы искусственного интеллекта, такие как машинное обучение и swarm intelligence, которые позволяют дронам адаптироваться к изменяющимся условиям [7].

Для дальнейшего исследования будут рассмотрены математические модели, структуры трех систем управления дронами.

Заключение. 1. Рассмотрены летающие сенсорные сети FANET. Приведена классификация протоколов динамической маршрутизации в сети FANET (проактивные, реактивные, гибридные, иерархические, геомаршрутизации). Приведены особенности одноранговых и иерархических (кластерных) сетей.

2. Летающие сети Интернет вещей представляют собой перспективное направление для управления дронами в различных сферах. Их структура, протоколы и организация управления обеспечивают высокую надежность, мобильность и автономность. Однако для дальнейшего развития FANETs необходимо решить ряд проблем, таких как обеспечение безопасности, оптимизация энергопотребления и повышение устойчивости к помехам. Внедрение летающих сетей открывает новые возможности для IoT, делая дроны более интеллектуальными и эффективными инструментами.

THE INTERNET OF THINGS FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES CONTROL

U.A. VISHNIAKOU, A.V. VEREMEEV

Abstract

The purpose of the article is to analyze the Internet of Things networks for the organization of control of unmanned aerial vehicles. FANET flying sensor networks are considered. The classification of dynamic routing protocols in the FANET network (proactive, reactive, hybrid, hierarchical, geo-

routing) is given. The features of peer-to-peer and hierarchical (cluster) networks are given. Three types of management in FANET are considered: centralized, decentralized and hybrid. It was concluded that the management perspective was related to artificial intelligence algorithms such as machine learning and swarm intelligence. Research directions have been identified.

Список литературы

1. Гражданские беспилотники в повседневной жизни. – URL: <https://repost.press/news/grazhdanskie-bespilotniki-v-povsednevnoj-zhizni> (дата обращения: 15.01.2025).
2. Блог об использовании дронов в различных сферах. – URL: <https://sky-space.ru/blog/razvitie-bespilotnykh-aviatsionnykh-sistem> (дата обращения: 17.01.2025).
3. Варламов, А. С. Перспективы развития систем и средств комплексов с беспилотными летательными аппаратами / А. С. Варламов, А. В. Седых, Д. С. Бачурин // Молодой ученый. – 2023. – № 47 (494). – С. 25–27.
4. Варламов, А. С. Обобщенный анализ существующих тенденций и достижений в области перспектив развития систем и средств беспилотных летательных аппаратов / А. С. Варламов, А. В. Седых, Д. С. Бачурин // Молодой ученый. – 2023. – № 47 (494). – С. 27–31.
5. Кучерявый, А. Е. Летающие сенсорные сети / А. Е. Кучерявый, А. Г. Владыко // Электросвязь. – 2014. – № 9. – С. 2–5.
6. Bekmezci, I. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs) / I. Bekmezci [et al.] // A survey Ad Hoc Networks. – 2013. – № 11 (3). – С. 1254–1270.
7. Al-Karaki, J. N. Routing techniques in wireless sensor networks : A survey / J. N. Al-Karaki [et al.] // IEEE Wireless Communications. – 2004. – № 11 (6). – P. 6–28.
8. Кузнецов, С. В. Анализ бортовой беспроводной сенсорной сети как альтернативы традиционной проводной сети / С. В. Кузнецов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2020. – № 23 (1). – С. 49–58.
9. Леонов, А. В. Экспериментальная оценка возможности использования алгоритма муравьиной колонии AntHocNet для решения задачи маршрутизации в FANET / А. В. Леонов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2017. – Том 10, № 1. – С. 7–26.
10. Gupta, L. Survey of important issues in UAV communication networks / L. Gupta [et al.] // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2016. – № 18 (2). – С. 1123–1152.