

ПРИНЦИПЫ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СЕТИ ОБМЕНА ДАННЫМИ БОЛЬШОЙ ГРУППЫ БПЛА НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ЕЁ СТРУКТУРЫ

Деркач А. Е.¹, Лиманцева Е. В.², Чуднов А. М.³

DOI:10.21681/3034-4050-2026-1-2-7

Ключевые слова: сеть с коммутацией пакетов, пропускная способность сети устойчивость сети, управление маршрутизацией пакетов, таблицы маршрутизации пакетов, самоорганизация сетевого обмена.

Аннотация

Цель работы: повышение устойчивости сети обмена данными большой группы беспилотных летательных аппаратов (БпЛА) к дестабилизирующим воздействиям за счет динамической оптимизации ее структуры.

Методы исследования: теории сетей массового обслуживания, теория управления, динамическое программирование.

Результаты исследования: разработаны принципы анализа и оптимизации структуры системы обмена данными большой группы (роя) БпЛА с кластеризованной структурой маршрутизации пакетов. Показано, что повышение эффективности функционирования сети обмена данными (СОД) может быть обусловлено за счет сокращения трафика, необходимого для сбора данных

Научная новизна результатов состоит в разработке новой модели обмена данными в крупномасштабной СОД, учитывающей в процессе управления маршрутизацией кластеризованную структуру, а также постановке и разработки метода решения задачи оптимизации кластеризованной сетевой структуры.

Введение

Проблема обеспечения устойчивой работы сетей обмена данными (СОД) в условиях случайных сбоев и целенаправленных дестабилизирующих воздействий является одной из наиболее актуальных в современной телекоммуникационной отрасли [1–21]. Под устойчивостью сети понимается ее способность сохранять достаточно эффективное функционирование в определенном классе дестабилизирующих воздействий, под которыми для СОД БпЛА понимаются факторы, приводящие к полному или частичному нарушению работоспособности объектов системы (отказы, уничтожение, случайные и преднамеренные помехи...). При этом в качестве базовых показателей, характеризующих эффективность функционирования системы и определяющих ее работоспособность, как правило, выступают вероятностно-временные характеристики процесса передачи сообщений.

Вопросы разработки методов анализа и оптимизации показателей вероятностно-временных характеристик СОД в условиях различного рода случайных и преднамеренных воздействий изучались в весьма большом числе работ (см., например, [1–10] и библиографию к ним). В [1–9, 11–22] рассматривались задачи, ориентированные на обеспечение связности СОД, в [11–16] для частных примеров результаты основывались на проведении вычислительного эксперимента с использованием статистических оценок. Одно из первых исследований по анализу и оптимизации вероятностно-временных характеристик (ВВХ) прохождения сообщений в сети передачи данных с ограничениями на ресурс приемо-передающих средств было проведено в⁴ и в дальнейшем развито в [1] – в индифферентной по отношению к СОД БпЛА среде и в [2] – в условиях преднамеренных (оптимизированных) помех. Вместе с тем в [1, 2], как

1 Деркач Алексей Евгеньевич, аспирант Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: alder2000@inbox.ru

2 Лиманцева Елена Владимировна, аспирант Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: lena.limantseva@mail.ru

3 Чуднов Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор, профессор Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: chudnow@yandex.ru

4 Чуднов А. М. и др. Комплексное управление маршрутизацией пакетов и режимами работы радиосредств в неоднородной сети передачи данных // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2019. № 1(33). С. 46–56.

и в исходной статье расчеты производились без учета дополнительного трафика, обусловленного потребностью системы управления СОД, в частности, маршрутизацией пакетов. Для сетей с малым числом узлов это не приводит к большим погрешностям расчетных величин, однако для крупномасштабных сетей оперативный сбор данных о состоянии сети и доведение их в конечном счете до исполнительных элементов системы управления погрешности могут оказаться значительными и приводить к несостоительным выводам. Более того, без должной организации процесса обмена служебной информацией элементов СОД большой группы БпЛА потоки таких данных могут перегрузить сеть и полностью заблокировать ее работу.

Из рассмотренного следует актуальность задачи организации сбора данных о состоянии СОД (в частности, структуре, характеристиках возможных направлений связи, потоках данных в информационных направлениях) и осведомления необходимой информацией объектов подсистемы управления сетью. Это задача решается на основе кластеризации (сегментирования) сетевой структуры, под которой понимается разделение множества узлов сети на фрагменты с выделенными в каждом фрагменте (кластере, сегменте) одним или несколькими центральными элементами [17, 18]. При этом общая задача управления маршрутизацией в СОД декомпозируется на частные:

- задачи управления маршрутизацией в кластерах СОД;
- задачу управления маршрутизацией в межкластерной сети, образованной центральными элементами кластеров.

Заметим, что для крупномасштабных сетей с динамически изменяющейся структурой кластеризация структуры выступает не только как средство повышения эффективности, но и как принципиально необходимое условие обеспечение работоспособности сети связи.

В дальнейшей части работы в формализованном виде дается постановка задачи анализа ВВХ СОД с сегментированной структурой, приводится вариант иерархической кластеризации СОД и методика оценки ее устойчивости, приведены примеры расчета показателей устойчивости с оценкой выигрыша, обеспечиваемого за счет сетевой кластеризации.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу анализа и оптимизации алгоритма маршрутизации в кластеризованной сети. В формализованном виде она задается на наборе исходных данных, аналогичном описанному в [1, 2], но с учетом кластерной структуры.

Исходные данные:

$G = (V, E)$ – граф сети, где V – множество узлов (объектов СОД), E – множество возможных связей;

$C = (c_{k,l})$ – матрица пропускных способностей линий связи;

$\Lambda = (\lambda_{i,j})$ – матрица интенсивностей потоков пакетов в информационных направлениях.

U^*, V^* – векторы ресурсов передающих и приемных средств узлов;

$\mathcal{P} = \langle P^k \rangle_{k \in \mathbb{N}_n}$ – набор таблиц маршрутизации пакетов (ТМП), где $P^k = (p_{l,j}^k)$ – вероятность направления пакета, адресованного j -узлу на l -порт.

В кластеризованной сети множество узлов V разбито на K кластеров:

$$V = \bigcup_{m=1}^K V_m,$$

где каждый кластер V_m имеет выделенный центральный узел (хаб) h_m .

Множества маршрутов:

$M_{\langle i,j \rangle}$ – множество маршрутов из i в j ;

$M_{\langle k,l \rangle}$ – множество маршрутов, проходящих через линию $\langle k,l \rangle$.

$$M\langle i,j; k, l \rangle = M_{\langle i,j \rangle} \cap M_{\langle k,l \rangle}.$$

Распределение потоков:

Интенсивность потока на маршруте $\mu \in M_{\langle i,j \rangle}$ вычисляется как:

$$s(\mu) = \lambda_{i,j} \prod_{(k,l) \in \mu} p_{l,j}^k.$$

Ограничения на ресурсы:

$$u_k = \sum_l \frac{s(k,l)}{c_{k,l}} \leq u_k^*, \quad v_k = \sum_l \frac{s(l,k)}{c_{l,k}} \leq v_k^*.$$

Целевые показатели:

$F_{T_{\langle i,j \rangle}}(t)$ — функция распределения вероятностей (ФРВ) времени доставки сообщений в направлении $\langle i,j \rangle$.

$F_T(t)$ – ФРВ времени доставки сообщений в сети в целом.

Вероятность своевременной доставки $Pr\{T \leq T^*\}$.

Задача оптимизации:

Найти набор таблиц маршрутизации пакетов (ТМП) \mathcal{P} , который максимизирует вероятность своевременной доставки сообщений

при заданных ограничениях на ресурсы в кластерной структуре сети:

$$Pr\{T \leq T^*\} \rightarrow \max_{\mathcal{P}}$$

Основные результаты

Методика анализа ВВХ для кластеризованной СОД включает следующие этапы:

1. Вычисление условных потоков по маршрутам.

Для каждого кластера и межкластерных направлений вычисляются интенсивности потоков $s(\mu)$ по формуле (10) из [1].

2. Учет служебного трафика.

Вводятся дополнительные потоки $\lambda_{\text{служ}}$, обусловленные обменом служебной информацией между хабами и узлами кластеров.

3. Расчет нагрузки на средства связи.

По формулам (7) и (8) из [1] вычисляются ресурсы передающих и приемных средств с учетом кластерной структуры.

4. Расчет ВВХ для линий и маршрутов.

Для каждой линии (k,l) ФРВ времени задержки пакета определяется соотношением

$$F_{T(k,l)}(t) = 1 - e^{\frac{-t}{T(k,l)}}, \quad T(k,l) = \frac{1}{c_{k,l}} \left(\frac{u_k}{1-u_k} + \frac{v_l}{1-v_l} \right).$$

Для маршрута μ ФРВ времени задержки вычисляется как свертка распределений задержек на участках маршрута.

5. Усреднение по направлениям и сети.

ФРВ времени доставки в направлении $\langle i,j \rangle$ и в сети в целом вычисляются по формулам (15)–(17) из [1].

6. Оценка вероятности своевременной доставки [1].

Вычисляются вероятности:

$$Pr\{T_{\langle i,j \rangle} \leq T^*\} = F_{T_{\langle i,j \rangle}}(T^*), \quad Pr\{T \leq T^*\} = F_T(T^*).$$

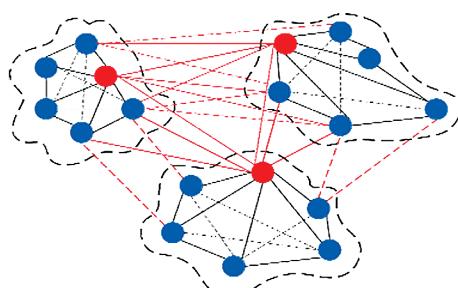


Рис. 1. Пример кластеризованной сетевой структуры (фрагмент)

Примеры расчета. Рассмотрена СОД группы БПЛА, состоящая из 96 узлов, разбитых на 16 кластеров, надкластерный фрагмент представлен в виде трех кластеров, содержащих 5, 5 и 6 узлов, соответствующих центральным узлам кластеров. На рисунке 1 приведена структурная схема, иллюстрирующая связность узлов, причем узлы, входящие в общий кластер, обведены пунктирной линией.

В качестве исходных данных приняты оценки компонент:

- наборов матриц потенциальных пропускных способностей (i,j) -радиолиний k -кластера $C^k = (c_{(i,j)}^k)$;
- наборов матриц интенсивностей информационных потоков в $\langle i,j \rangle$ -направлении k -кластера $\Lambda^k = (\lambda_{(i,j)}^k)$ (т. е. матриц тяготения);
- векторов ресурсов U^* , V^* (из расчета по одному радиопередающему средству и двум приемным на каждом узле);
- ТМП \mathcal{P} , допускающие рандомизированные и детерминированные алгоритмы маршрутизации [3].

Результаты расчетов. Расчеты величины $Pr\{T_{\langle i,j \rangle} \leq T^*\}$ проводились для различных параметров состояния сети, характеризуемых показателями $(c_{(i,j)}^k), (\lambda_{(i,j)}^k)$. Для иллюстрации выигрыша, обеспечиваемого кластеризацией структуры СОД, результаты расчетов представлены на рисунке 2 зависимостями времени T доставки пакета сообщения с вероятностью P^* (т. е. $Pr\{T \leq T^*\} \leq P^*$ от состояния СОД, характеризуемого отношением λ/c для случаев а) некластеризованной и б) кластеризованной структуры при $P^* = P_1^* = 0,95$ и $P^* = P_2^* = 0,99$.

Результаты расчетов по рассмотренному примеру показали, что кластеризация структуры СОД привела к снижению интенсивности

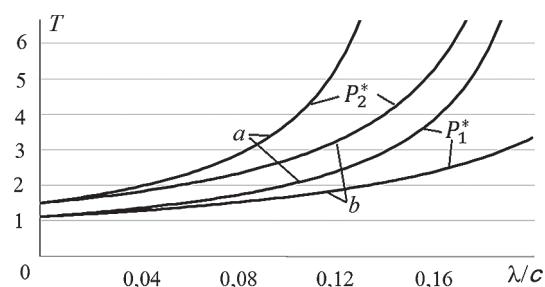


Рис. 2. Зависимость времени задержки пакетов, обеспечиваемого с вероятностью P^* :

- а) в некластеризованной СОД,
- б) в кластеризованной СОД

потоков служебных данных о состоянии СОД на 15–25 %. При этом коэффициент загрузки СОД служебными данными в кластеризованной сети сократился при периодичности цикла обновления набора ТМП 5с с 50% до 15%, а при периодичности 2с с 80% до 30%.

Из полученных результатов следует, что кластеризация обеспечивает выигрыш, оцениваемый приростом пропускной способности СОД на 15–25 % и соответствующим увеличением устойчивости системы.

Заключение

Предложенная методика анализа эффективности функционирования СОД БпЛА обеспечивает определение показателей устойчивости сети с кластеризованной структурой

и определяет принципы повышения устойчивости СОД к случайным и преднамеренным дестабилизирующими воздействиям. На рассмотренных примерах получены оценки выигрыша в устойчивости СОД по отношению как отказам объектов системы, так и воздействию помех на радиолинии связи, которые свидетельствуют о целесообразности кластеризации структуры СОД при разработке алгоритмов управления маршрутизацией.

Актуальными задачами следует считать разработку методов оптимальной кластеризации структуры СОД с учетом мобильности БпЛА как носителей средств ретрансляции и коммутации потоков данных, а также с учетом функций по восстановлению сети при ее разрушении.

Литература

1. Чуднов А. М., Губская О. А., Кичко Я. В. Методика анализа вероятностно-временных характеристик обмена сообщениями в комплексе беспилотных летательных аппаратов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 11. С. 117–124.
2. Чуднов А. М., Положинцев Б. И., Кичко Я. В. Анализ помехозащищенности обмена данными группы беспилотных летательных аппаратов в условиях оптимизированных помех Радиотехника. 2022. Т. 86. № 12. С. 33–46. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202212-03>.
3. Чуднов А. М. Математические основы моделирования, анализа и синтеза систем. – СПб.: ВАС, 2021. – 192 с.
4. Jan Lansky, Saqib Ali, Amir Masoud Rahmani, Mohammad Sadegh Yousefpoor, Efat Yousefpoor, Faheem Khan, Mehdi Hosseinzadeh Reinforcement Learning-Based Routing Protocols in Flying Ad Hoc Networks (FANET): 1 Mathematics 2022, 10, 3017. DOI:10.3390/math10163017.
5. Siddiqi M. A., Vivendi C., Jaroslava K., Anumbe N. Analysis on security-related concerns of unmanned aerial vehicle: Attacks, limitations, and recommendations. Math. Biosci. Eng. 2022, 19, 264/1–2670.
6. Rovira-Sugranes A., Razi A., Afghah F., Chakareski J. A review of AI-enabled routing protocols for UAV networks: Trends, challenges, and future outlook. Ad Hoc Netw. 2022, 130, 102790. DOI:10.48550/arXiv.2104.01283.
7. Rezwan S. Choi W. A survey on applications of reinforcement learning in flying ad hoc networks. Electronics 2021, 10, 449. DOI: 10.3390/electronics10040449.
8. Shrestha R., Bajracharya R., Kim S. 6G enabled unmanned aerial vehicle traffic management: A perspective. IEEE Access 2021, 9, 91119–91136. DOI:10.1109/ACCESS.2021.3092039.
9. Sirajuddin M., Rupa C., Iwendi C., Biamba C. TBSMR: A trust-based secure multipath routing protocol for enhancing the qos of the mobile ad hoc network. Secur. Commun. Netw. 2021, 2021. DOI:10.1155/2021/5521713.
10. Деркач А. Е., Чуднов А. М. Методика структурирования сети обмена данными роя беспилотных летательных аппаратов для обеспечения устойчивого их взаимодействия // В сборнике: Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации (ПКМ-2024). Сборник лучших докладов V Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов и их руководителей. В 2-х томах. Санкт-Петербург, 2025. С. 622–629.
11. Alam M. M., Moh S. Survey on Q-Learning-Based Position-Aware Routing Protocols in Flying Ad Hoc Networks. Electronics 2022, 11, 1099. DOI:10.3390/electronics11071099.
12. Liu T., Sun Y., Wang C., Zhang Y., Qiu Z., Gong W., Lei S., Tong X., Duan X. Unmanned aerial vehicle and artificial intelligence revolutionizing efficient and precision sustainable forest management. J. Clean. Prod. 2021, 311, 127546. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127546.
13. Khan M. F., Yau K. L. A., Ling M. H., Imran M. A., Chong Y. W. An Intelligent Cluster-Based Routing Scheme in 5G Flying Ad Hoc Networks. Appl. Sci. 2022, 12, 3665. DOI:10.3390/app12073665.

14. Arafat M. Y., Moh S. A. Q-learning-based topology-aware routing protocol for flying ad hoc networks. *IEEE Internet Things J.* 2021, 9, 1985–2000. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3089759.
15. Cui Y., Zhang Q., Feng Z., Wei Z., Shi C., Yang H. Topology-Aware Resilient Routing Protocol for FANETs: An Adaptive Q-Learning Approach. *IEEE Internet Things J.* 2022. DOI:10.48550/arXiv.2306.17360.
16. Zhang M., Dong C., Feng S., Guan X., Chen H., Wu Q. Adaptive 3D routing protocol for flying ad hoc networks based on prediction-driven Q-learning. *China Commun.* 2022, 19, 302–317. DOI:10.23919/JCC.2022.05.005.
17. Макаренко С. И. Усовершенствование функций многоуровневой иерархической кластеризации протокола маршрутизации pnni с целью повышения устойчивости сети связи // I-methods. 2020. Т. 12. № 2. С. 1–21.
18. Guo J., Gao H., Liu Z., Huang F., Zhang J., Li X., Ma J. ICRA: An Intelligent Clustering Routing Approach for UAV Ad Hoc Networks. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2022, 1–14. DOI:10.1109/TITS.2022.3145857.
19. Idrissi M., Salami M., Annaz F. A Review of Quadrotor Unmanned Aerial Vehicles: Applications, Architectural Design and Control Algorithms. *J. Intell. Robot. Syst.* 2022, 104, 1–33. DOI:10.1007/s10846-021-01527-7.
20. Rovira-Sugranes A., Afghah F., Qu J., Razi A. Fully-echoed Q-routing with Simulated Annealing Inference for Flying Adhoc Networks. *IEEE Trans. Netw. Sci. Eng.* 2021, 8, 2223–2234. DOI:10.48550/arXiv.2103.12870.
21. Da Costa L. A. L., Kunst R., de Freitas E. P. Q-FANET: Improved Q-learning based routing protocol for FANETs. *Comput. Netw.* 2021, 198, 108379. DOI: 10.1016/J.COMNET.2021.108379.
22. Agrawal J., Kapoor M. A comparative study on geographic-based routing algorithms for flying ad hoc networks. *Concurrency and Computation: Practile and Experience.* 2021, 33(16). DOI:10.1002/cpe.6253.

PRINCIPLES OF INCREASING THE STABILITY OF THE DATA EXCHANGE NETWORK OF A LARGE GROUP OF UAVS BASED ON CLUSTERING OF ITS STRUCTURE

Derkach A. E.⁵, Limantseva E. V.⁶, Chudnov A.M.⁷

Keywords: packet-switched network, network capacity, network resilience, packet routing management, packet routing tables, network exchange self-organization.

Abstract

The purpose of the work is to increase the stability of the data exchange network of a large group of unmanned aerial vehicles (UAVs) to destabilizing effects due to the dynamic optimization of its structure.

Research methods: queuing network theories, control theory, dynamic programming.

Results of the study: the principles of analysis and optimization of the structure of the data exchange system of a large group (swarm) of UAVs with a clustered packet routing structure have been developed. It is shown that the increase in the efficiency of the data exchange network (DPN) can be due to the reduction of traffic required for data collection

The scientific novelty of the results lies in the development of a new model of data exchange in a large-scale ODS, which takes into account the clustered structure in the process of routing management, as well as the formulation and development of a method for solving the problem of optimizing the clustered network structure.

References

1. Chudnov A. M., Gubskaja O. A., Kichko Ja. V. Metodika analiza verojatnostno-vremennyh harakteristik obmena soobshhenijami v komplekse bespilotnyh letatel'nyh apparatov // Izvestija TulGU. Tehnicheskie nauki. 2021. Vyp. 11. S. 117–124.
2. Chudnov A. M., Polozhincev B. I., Kichko Ja. V. Analiz pomehozashhishennosti obmena dannymi gruppy bespilotnyh letatel'nyh apparatov v uslovijah optimizirovannyh pomeh Radiotekhnika. 2022. Т. 86. № 12. S. 33–46. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202212-03>.

5 Alexey E. Derkach, Adjunct of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: alder2000@inbox.ru

6 Elena V. Limantseva, Adjunct of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: lena.limantseva@mail.ru

7 Alexander M. Chudnov, Dr.Sc. of Technical Sciences, Professor, Professor of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny, St. Petersburg, Russia. E mail: chudnow@yandex.ru

3. Chudnov A. M. Matematicheskie osnovy modelirovaniya, analiza i sinteza sistem. – SPb.: VAS, 2021. – 192 s.
4. Jan Lansky, Saqib Ali, Amir Masoud Rahmani, Mohammad Sadegh Yousefpoor, Efat Yousefpoor, Faheem Khan, Mehdi Hosseinzadeh Reinforcement Learning-Based Routing Protocols in Flying Ad Hoc Networks (FANET): 1 Mathematics 2022, 10, 3017. DOI:10.3390/math10163017.
5. Siddiqi M. A., Vivendi C., Jaroslava K., Anumbe N. Analysis on security-related concerns of unmanned aerial vehicle: Attacks, limitations, and recommendations. Math. Biosci. Eng. 2022, 19, 264/1–2670.
6. Rovira-Sugranes A. Razi A. Afghah F. Chakareski J. A review of AI-enabled routing protocols for UAV networks: Trends, challenges, and future outlook. Ad Hoc Netw. 2022, 130, 102790. DOI:10.48550/arXiv.2104.01283.
7. Rezwan S., Choi W. A survey on applications of reinforcement learning in flying ad hoc networks. Electronics 2021, 10, 449. DOI:10.3390/electronics10040449.
8. Shrestha R., Bajracharya R., Kim S. 6G enabled unmanned aerial vehicle traffic management: A perspective. IEEE Access 2021, 9, 91119–91136. DOI:10.1109/ACCESS.2021.3092039.
9. Sirajuddin M., Rupa C., Iwendi C., Biamba C. TBSMR: A trust-based secure multipath routing protocol for enhancing the qos of the mobile ad hoc network. Secur. Commun. Netw. 2021, 2021. DOI:10.1155/2021/5521713.
10. Derkach A. E., Chudnov A. M. Metodika strukturirovaniya seti obmena dannymi roja bespilotnyh letatel'nyh apparatov dlja obespechenija ustojchivogo ih vzaimodejstvija // V sbornike: Podgotovka professional'nyh kadrov v magistrature v jepohu cifrovoj transformacii (PKM-2024). Sbornik luchshih dokladov V Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoi i nauchno-metodicheskoi konferencii magistrantov i ih rukovoditelej. V 2-h tomah. Sankt-Peterburg, 2025. S. 622–629.
11. Alam M. M., Moh S. Survey on Q-Learning-Based Position-Aware Routing Protocols in Flying Ad Hoc Networks. Electronics 2022, 11, 1099. DOI:10.3390/electronics11071099.
12. Liu T., Sun Y., Wang C., Zhang Y., Qiu Z., Gong W., Lei S., Tong X., Duan X. Unmanned aerial vehicle and artificial intelligence revolutionizing efficient and precision sustainable forest management. J. Clean. Prod. 2021, 311, 127546. DOI:10.1016/j.jclepro.2021.127546.
13. Khan M. F., Yau K. L. A., Ling M. H., Imran M. A., Chong Y. W. An Intelligent Cluster-Based Routing Scheme in 5G Flying Ad Hoc Networks. Appl. Sci. 2022, 12, 3665. DOI:10.3390/app12073665.
14. Arafat M. Y., Moh S. A. Q-learning-based topology-aware routing protocol for flying ad hoc networks. IEEE Internet Things J. 2021, 9, 1985–2000. DOI:10.1109/JIOT.2021.3089759.
15. Cui Y., Zhang Q., Feng Z., Wei Z., Shi C., Yang H. Topology-Aware Resilient Routing Protocol for FANETs: An Adaptive Q-Learning Approach. IEEE Internet Things J. 2022. DOI:10.48550/arXiv.2306.17360.
16. Zhang M., Dong C., Feng S., Guan X., Chen H., Wu Q. Adaptive 3D routing protocol for flying ad hoc networks based on prediction-driven Q-learning. China Commun. 2022, 19, 302–317. DOI:10.23919/JCC.2022.05.005.
17. Makarenko S. I. Usovershenstvovanie funkcij mnogourovnevoj ierarhicheskoy klasterizacii protokola marshrutizacii pnni s cel'ju povyshenija ustojchivosti seti svjazi // I-methods. 2020. T. 12. № 2. S. 1–21.
18. Guo J., Gao H., Liu Z., Huang F., Zhang J., Li X., Ma J. ICRA: An Intelligent Clustering Routing Approach for UAV Ad Hoc Networks. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 2022, 1–14. DOI:10.1109/TITS.2022.3145857.
19. Idrissi M., Salami M., Annaz F. A Review of Quadrotor Unmanned Aerial Vehicles: Applications, Architectural Design and Control Algorithms. J. Intell. Robot. Syst. 2022, 104, 1–33. DOI:10.1007/s10846-021-01527-7.
20. Rovira-Sugranes A., Afghah F., Qu J., Razi A. Fully-echoed Q-routing with Simulated Annealing Inference for Flying Adhoc Networks. IEEE Trans. Netw. Sci. Eng. 2021, 8, 2223–2234. DOI:10.48550/arXiv.2103.12870.
21. Da Costa L. A. L., Kunst R., de Freitas E. P. Q-FANET: Improved Q-learning based routing protocol for FANETs. Comput. Netw. 2021, 198, 108379. DOI: 10.1016/J.COMNET.2021.108379.
22. Agrawal J., Kapoor M. A comparative study on geographic-based routing algorithms for flying ad hoc networks. Concurrency and Computation: Practile and Experience. 2021, 33(16). DOI:10.1002/cpe.6253.

