

USING OF NON-STATIONARY NETWORKS IN MONITORING PROBLEMS

O. Sokolova, N. Shvarckop*

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
630090, Novosibirsk, Russia

*Higher College of Informatics NSU
630058, Novosibirsk, Russia

DOI: 10.24412/2073-0667-2021-4-5-15

In recent years, researchers in many countries have been paying attention to the networks with a non-stationary topology — with nodes on vehicles (VANET, Vehicle ad-hoc network), on flying vehicles (FANET, Flying ad-hoc networks). The method of collecting data using these networks is increasingly being used, especially in monitoring problems: transport monitoring, environmental monitoring, etc. Smart sensors are used, which, in addition to collecting data, perform the function of processing information and transmitting it to the GPRS module for uploading to a web server. Similar projects are carried out in different countries — China, Canada, Sweden. For example, observations of the state of air in an urban environment using wireless sensors were carried out in Uppsala (Sweden). This work is part of the Swedish Green IoT project, which uses the Internet of Things to measure urban air pollution.

In publications about FANET, much attention is paid to the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for monitoring large territories, hard-to-reach areas. The main investigations are devoted to the development of algorithms for controlling the routes and optimizing the process of transmitting information collected by mobile nodes. The goal of similar projects is to collect information in real time and upload data to a web server for users to view. UAV are equipped with environmental monitoring sensors (gas sensor, air quality sensor, humidity sensor, temperature sensor), as well as a microcontroller and a GPRS module. The nodes are distributed in space and transmit data wirelessly. The microcontroller performs the function of processing the data received from the sensors and transmits the processed information to the base station, where it is open to users in real time.

The limited battery life of the UAV narrows their functioning, therefore, various possibilities for recharging are used — for example, recharging stations. When the critical level of the remaining energy is reached, the path to the nearest station must be denoted for UAV. In the case of a swarm of drones, there should be a flight schedule for recharging, because with a very large number of UAV, queues to stations are possible. Thus, the problem of optimal placement of charging stations in a territory is urgent: the total number of stations is not more than a given one, and the lifetime of the network is not less than a given one.

To solve optimization problems, it is necessary to have convenient simulation tools in order to test algorithms on various models. For the optimizing monitoring problem, it is convenient to use a system to simulate the movement of nodes, the transfer of information between them, as well as to determine the possible parameters of devices for collecting and transmitting data. Well-known systems are used to simulate data transmission from nodes on moving objects — for example, Network

The study was supported by the RFBR, grant № 19-01-00562-a.

Simulator, Any Logic. However, these systems mainly simulate the movement, as well as the process of collecting information by nodes. Such urgent problems as ensuring monitoring of the entire given territory, recharging drones during network operation are not in the attention of simulation. In order to complete the simulation possibilities, the authors developed a UAV-monitoring simulation system, in which some urgent problems were solved by adapting well-known algorithms.

Key words: non-stationary networks, unmanned aerial vehicles, models of networks with nodes on the UAV, simulation.

References

1. Hamdi M. M., Audah L., Rashid S. A., and Alani S. VANET-based traffic monitoring and incident detection system: A review // *International Journal of Electrical & Computer Engineering* (2088-8708), 2021. Vol. 11, N 4.
2. Ullo S., Sinha G. Advances in Smart Environment Monitoring Systems Using IoT and Sensors // *Sensors* (Basel). 2020; 20(11):3113. DOI: 10.3390/s20113113.
3. Sokolova O. D., Materuhin A. V. Analiticheskij obzor sovremennyh informacionnyh tekhnologij v oblasti sbora, obrabotki i analiza dannyh, primenyaemyh dlya monitoringa zagryazneniya atmosfernogo vozduha // *Problemy informatiki*. 2020. № 1. S. 21–34. DOI: 10.24411/2073-0667-2020-10002.
4. SHahov V. V., Sokolova O. D. Analiz setej s nestacionarnoj topologiej. Obzor issledovanij // *Problemy informatiki*. 2020. № 4, S. 27–42. DOI: 10.24411/2073-0667-2020-10014.
5. Rohi, G., Ofualagba, G. Autonomous monitoring, analysis, and countering of air pollution using environmental drones // *Heliyon* 6(1), 1–10 (2020).
6. Shakhov V., Sokolova O. On Modeling Air Pollution Detection With Internet of Vehicles // *15th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM)*, 2021, P. 1–3, DOI:10.1109/IMCOM51814.2021.9377350.
7. Kaivonen Sami, Ngai Edith. Real-time air pollution monitoring with sensors on city bus // *Digital Communications and Networks*. 2019.
8. Leonov A. V., CHaplyshkin V. A. Seti FANET // *Omskij nauchnyj vestnik. Ser. Pribory, mashiny i tekhnologii*. 2015. N 3(143). S. 297–301.
9. Prozorov D. E., Metelev A. P., Chistjakov A. V., Romanov S. V. Protocols of Georouting of Mobile ad hoc Networks // *T-Comm*, 2012. N 5. P. 16–19.
10. Masahiko Nagai, Apichon Witayangkurn, Kiyoshi Honda, Ryosuke Shibasaki. UAV-Based Sensor Web Monitoring System // *International Journal of Navigation and Observation*. 2012. Vol. 2012, Article ID 858792. [Electron. Res.]: <https://doi.org/10.1155/2012/858792>.
11. Liu, Siwen. Development of a UAV-Based System to Monitor Air Quality over an Oil Field // *Graduate Theses & Non-Theses*. 2018. 187. [Electron. Res.]: https://digitalcommons.mtech.edu/grad_rsch/187
12. Alvear, O., Zema, N. R., Natalizio, E., & Calafate, C. T. Using UAV-Based Systems to Monitor Air Pollution in Areas with Poor Accessibility // *Journal of Advanced Transportation*, 2017. P. 1–14.
13. Masahiko Nagai, Apichon Witayangkurn, Kiyoshi Honda, Ryosuke Shibasaki. UAV-Based Sensor Web Monitoring System // *International Journal of Navigation and Observation*. 2012. Vol. 2012, Article ID 858792, 7 pages. [Electron. Res.]: <https://doi.org/10.1155/2012/858792>
14. Ya'acob N., Zolkapli M., Johari J., Yusof A. L., Sarnin S. S. and Asmadinar A. Z. UAV environment monitoring system // *2017 International Conference on Electrical, Electronics and System Engineering (ICEESE)*, 2017, P. 105–109, DOI: 10.1109/ICEESE.2017.8298395.
15. Zareb M., Bakhti B., Bouzid Y., Kadourbenkada H., Bouzgou K., Nouibat W. Novel Smart Air Quality Monitoring System Based on UAV Quadrotor // *Proceedings of the 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Applications. ICEECA 2019. Lecture Notes in*

Electrical Engineering, Vol. 682. Springer, [Electron. Res.]: https://doi.org/10.1007/978-981-15-6403-1_30

16. Prozorov, D. E., Romanov S. V. Protokol ierarhicheskoj marshrutizacii samoorganizuyushchejsya mobil'noj seti // Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy. 2014. T. 15. № 3. S. 74–80.

17. Rudometov S., Sokolova O., Materukhin A. Optimization of Mobile Sink Movement in the Gathering Spatio-Temporal Data Process from Air Pollution Sensors // Proceedings — 2020 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2020, 2020, P. 648–652. DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208148.

18. Materukhin A., Maiorov A., Gvozdev O., Sokolova O. Simulation of Spatio-Temporal Data Streams from Geosensors Located On mobile Objects // Proceedings of 15th International Asian School-Seminar Optimization Problems of Complex Systems (OPCS-2019), P. 179–183. DOI: 10.1109/OPCS.2019.8880188.

19. Kajsina I. A. Modelirovanie poleznoj propusknoj sposobnosti seti BPLA pri mul'tipotokovoj peredache // Trudy uchebnyh zavedenij svyazi. 2020. T. 6. № 1. S. 100–108. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-1-100-108.

20. Kajsina I. A., Vasil'ev D. S., Abilov A. V., Mejtis D. S., Kajsina A. E., Nistyuk A. I. Sravnitel'nyj analiz effektivnosti retranslyacii potokovyh dannyh v letayushchej seti // Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova. 2019. T. 22, № 1. S. 108–115. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-1-108-115.

21. Poselenceva D. YU., Zamyatina E. B. Opyt issledovaniya algoritmov marshrutizacii i peredachi dannyh v ad-hoc-setyah // Vestnik Permskogo universiteta. Matematika, mekhanika, informatika. 2019. Vyp. 4(47).

22. Tengisand T., Batmunkh A. State feedback control simulation of quad copter model // Proc. Of 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST), 2016, P. 553–557.

23. Patel K., Barve J. Modeling, simulation and control study for the quad-copter UAV // 9th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), 2014, P. 1–6.

24. Benedetti M. De, D'Urso F., Messina F., Pappalardo G., and Santoro C. 3d simulation of unmanned aerial vehicles // XVIII Workshop "DagliOggettiagliAgenti". CEUR-WS, 2017.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА

О. Д. Соколова, Н. С. Шварцкоп*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия

*Высший колледж информатики НГУ
630058, Новосибирск, Россия

УДК 004.942

DOI: 10.24412/2073-0667-2021-4-5-15

В статье исследуется тема моделирования современных сетей передачи данных с узлами на движущихся объектах — транспортных средствах, беспилотных летательных аппаратах. Описаны основные задачи, возникающие при оптимизации сбора и передачи информации в нестационарных сетях (кластеризация узлов, использование мобильных стоков и др.). Приведен обзор публикаций последних лет с описанием систем имитационного моделирования функционирования таких сетей, а также предлагается разработанная авторами модель сети с узлами на беспилотных летательных аппаратах.

Ключевые слова: нестационарные сети, беспилотные летательные аппараты, модели сетей с узлами на БПЛА, имитационное моделирование.

Введение. В последние годы исследователи многих стран уделяют внимание развитию сетей с нестационарной топологией — с узлами на транспортных средствах (VANET, Vehicle ad-hoc network), на летающих аппаратах (FANET, Flying ad-hoc networks). Способ сбора данных с использованием таких сетей получает все большее применение, особенно в задачах мониторинга: транспортный мониторинг, экологический и др. [1–6]. При этом используются интеллектуальные датчики, которые, кроме сбора данных, выполняют функцию обработки информации и передачи ее в модуль GPRS для загрузки на веб-сервер. Например, наблюдения за состоянием воздуха в городской среде с помощью беспроводных сенсоров проводились в Швеции, г. Упсала. Эта работа является частью шведского проекта GreenIoT, который использует Интернет вещей для измерения уровня загрязнения воздуха в городской среде. В статье [7] описано исследование мониторинга состояния воздуха в центре города Упсала в реальном времени с помощью датчиков, размещенных на автобусах. Приведены результаты экспериментов для определения оценки качества связи и точности полученных данных.

В публикациях на тему развития применения сетей FANET большое внимание уделяется использованию беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для мониторинга протяженных территорий, труднодоступных районов. Основные исследования в этой области посвящены разработке алгоритмов управления маршрутами летательных аппаратов и оптимизации процесса передачи информации, собираемой мобильными узлами [8–9]. В связи с возросшим интересом потребителей к подобным задачам, актуальным направлением

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант № 19-01-00562.

исследований в последние годы стала разработка систем современного мониторинга с интеллектуальными датчиками, размещенными в мобильных узлах на базе БПЛА [10–14]. Основная цель подобных проектов — сбор информации в реальном времени и загрузка данных на веб-сервер для просмотра пользователями. Описываемые в публикациях системы, как правило, используют измерительные датчики для получения подробной информации с малых высот, отличных от высот полетов спутников или самолетов. Беспилотные летательные аппараты оснащены датчиками мониторинга окружающей среды (датчик газа, датчик качества воздуха, датчик влажности, датчик температуры), а также микроконтроллером и модулем GPRS. Узлы распределены в пространстве и обмениваются данными друг с другом по беспроводной связи. Микроконтроллер выполняет функцию обработки данных, полученных от датчиков, и передает обработанную информацию на наземную станцию, где она открыта для пользователей в режиме реального времени. Например, в статье [15] описана работа системы, экспериментальные испытания которой проводились на кампусе Университета Маскара (Алжир), и полученные результаты подтвердили ее эффективность. В статье [5] описано, как в Канаде осуществляют мониторинг воздуха — множество аппаратов Environmental Drones используются в разных местах, измеряют концентрацию CO_2 , NH_3 , SO_2 , NO_2 , а специальное программное обеспечение создает карту индекса качества воздуха (Air Quality Health Index), которую можно использовать для текущего и долгосрочного прогноза.

1. Основные задачи сбора и передачи данных в нестационарных сетях. По сравнению с традиционными сетями, сети с подвижными узлами обладают характеристиками динамической топологии и ограниченной энергии. Эти характеристики особенно актуальны для сетей связи с узлами на летательных аппаратах, то есть возникает необходимость поддержания такой структуры, чтобы увеличить время работы сети и повысить ее стабильность.

Для оптимизации передачи данных в сети обычно применяют алгоритмы кластеризации узлов (разбиения на группы), при этом в случае размещения узлов на летательных аппаратах кластеры могут быть многоуровневыми. Информация в каждой группе собирается от всех узлов в головной узел (cluster head, СН), а затем все СН передают данные в сток. В статье [16] описан разработанный авторами метод иерархической маршрутизации, использующий процедуру рекурсивной кластеризации узлов и ориентированный на применение в относительно больших сетях (до 500 узлов) с высокой подвижностью узлов, что характерно для сетей VANET и FANET. Значимость применения кластеризации определяется экономией энергии, то есть продлением времени жизни сети. Для сетей с узлами на БПЛА метод кластеризации тоже может быть применим, хотя в этом случае нестабильность кластеров более высокая — участие каждого узла в конкретной группе может меняться чаще, чем, например, в сетях с узлами на транспорте. Однако, в некоторых случаях (например, при мониторинге больших территорий), можно разбивать все множество аппаратов на отдельные группы, которые движутся в одном направлении с постоянными скоростями. В таких случаях состав групп более стабилен, и задача сводится к выбору головного узла в каждой группе (замена головного узла в группе происходит периодически в связи с большим расходом энергии). Можно сначала найти оптимальное количество кластеров для всей сети на основе баланса пропускной способности, а затем применять алгоритм для быстрой кластеризации узлов (например, алгоритм К-средних). Далее можно реализовать алгоритм выбора головного узла кластера, основанный на одном из извест-

ных методов (существует множество подобных методов — LEACH, PEGASYS, TEEN, их эффективность зависит от конкретной задачи).

В сетях с большим количеством узлов необходимо оптимизировать процесс сбора данных и передачу их в базовую станцию с учетом нестабильной структуры сети. Преимущества при этом имеют мобильные стоки, которые могут собирать информацию с головных узлов [17]. В некоторых задачах для сбора информации удобно использовать преимущества сетей VANET и FANET: например, для мониторинга в транспортной среде при сборе информации удобно в качестве приемо-передающих узлов использовать устройства, размещенные на транспортных средствах, а в качестве стоков — устройства на беспилотных летательных аппаратах. В отличие от неподвижных стоков (например, размещенных на придорожном оборудовании), которые собирают информацию от движущихся объектов, летательные аппараты могут сами перемещаться в нужном направлении в зависимости от изменения транспортного потока, т. е. в места наибольшего скопления узлов, и таким образом мобильный сток собирает больше актуальной информации.

Ограниченное время автономной работы БПЛА сужает возможности их применения, поэтому используются различные возможности для подзарядки — например, стационарные станции (вышки). При достижении критического уровня оставшейся энергии аппарат должен просчитывать путь до ближайшей свободной вышки подзарядки. В случае работы группы беспилотников необходимо иметь расписание полетов на подзарядку, т. к. при очень большом количестве аппаратов возможны очереди к станциям. Также актуальной является задача оптимального размещения станций подзарядки на заданной территории при некоторых ограничениях: общее количество станций не больше заданного, время работы сети беспилотников не менее заданного.

2. Имитационное моделирование функционирования нестационарных сетей.

Для решения оптимизационных задач необходимо иметь удобные средства имитационного моделирования, чтобы на различных моделях проводить тестирование алгоритмов. Для задачи оптимизации мониторинга с узлами на движущихся объектах удобно использовать имитационную модель, с помощью которой можно имитировать движение узлов и передачу информации между ними, определять возможные параметры устройств сбора и передачи данных (радиус действия, энергопотребление и др.). Примеры подобных систем можно найти во многих публикациях. В [18] описана система имитационного моделирования, разработанная в Московском государственном университете геодезии и картографии, которая моделирует потоки пространственно-временных данных, полученных от геосенсоров, размещенных на общественном транспорте. Моделирование позволяет изменять конфигурацию сети сбора данных, а также систему обработки и проверять различные теоретические решения. Результатом тестирований является определение такой структуры сети мониторинга, которая будет оптимальной с точки зрения различных критериев.

Для имитационного моделирования передачи данных от узлов на подвижных объектах используются известные системы — например, NetworkSimulator. В [19] описано моделирование с помощью NS-3 процесса мультипоточковой передачи данных от БПЛА к наземной станции; приведены результаты моделирования передачи потокового видео от нескольких узлов. В [20] авторы предлагают сравнительный анализ эффективности передачи потоков данных в сети FANET для трех сценариев: узел-источник удаляется от узла-получателя на определенное расстояние; между источником и получателем добавлен летающий узел-ретранслятор; ретранслятор летает по кругу с разным радиусом. В каче-

стве модели распространения сигнала для имитационного моделирования была выбрана Free-SpaceMode.

В статье [21] описано тестирование алгоритмов маршрутизации и передачи данных в сетях FANETs помощью системы AnyLogic. Рассматривался алгоритм „жадной“ географической маршрутизации: узел передает пакет тому узлу, который попадает в радиус действия передачи и находится ближе к получателю пакета, чем другие узлы. Алгоритм тестировался на имитационной модели сети с количеством узлов до 50, расположение узлов — случайное. Авторы отмечают, что алгоритм показал хорошие результаты для сетей с высокой плотностью размещения узлов.

Системы моделирования, описанные в статьях [22–23], предлагают управление квадрокоптером на основе метода полной обратной связи с линеаризацией в среде MATLAB. В статье [23] описано многоагентное приложение для управления маршрутами БПЛА, в которое включен набор классов для имитации беспроводной связи между узлами с определенной задержкой и вероятностью потери пакетов. В работе [24] предложены несколько моделей для управления беспилотниками и алгоритм движения, учитывающий концентрацию загрязнений на территории. С помощью моделирования в OMNeT++ показаны преимущества разработанного авторами алгоритма по сравнению с известными.

3. Имитационная модель UAV-monitoring. Описанные в предыдущем пункте системы моделирования в основном нацелены на имитацию движения аппаратов, а также процесса сбора информации узлами и передачи ее в базовую станцию. Редко решаются такие актуальные задачи, как обеспечение мониторинга всей заданной территории, подзарядка беспилотников во время работы сети. С целью восполнить этот пробел была разработана система имитационного моделирования UAV-monitoring, в которой с помощью адаптации известных алгоритмов решались некоторые актуальные задачи.

Для создания имитационной модели было выбрано средство разработки двух- и трехмерных приложений UNITY. Использовался язык программирования C#, совместимый с UNITY. Средой разработки был выбран VisualStudio, так как в нем присутствует большое количество функциональных возможностей и инструментов для разработки.

Модель UAV-monitoring разработана для имитации движения БПЛА над заданной территорией, мониторинг которой осуществляется с помощью датчиков, размещенных на аппаратах. Входными данными являются: N — количество летательных аппаратов; размер территории (область размером 25 на 25 единиц и высотой не более 4-х единиц); координаты начальной позиции и конечных точек полета для каждого из аппаратов; характеристики аппаратов (скорость полета, объем памяти приемо-передающего узла; радиус действия узла); координаты расположения вышек для подзарядки аппаратов. Были введены следующие функциональные требования к разрабатываемой модели: ввод координат положения узлов; генерация маршрута для каждого аппарата; расчет траектории полета каждого аппарата; система контроля движения аппаратов; система контроля заряда устройства и количества оставшейся памяти буфера.

Системой моделирования UAV-monitoring предусмотрены следующие возможности: моделирование движения беспилотных аппаратов по территории с целью посещения указанных участков; генерация маршрутов с целью предотвращения их пересечений; управление полетами для подзарядки аппаратов.

Для обеспечения мониторинга всей территории был разработан алгоритм облета территории по заданным квадратам. Карта местности делится на квадраты, каждому аппарату назначается маршрут (маршрут может меняться в зависимости от обстоятельств —

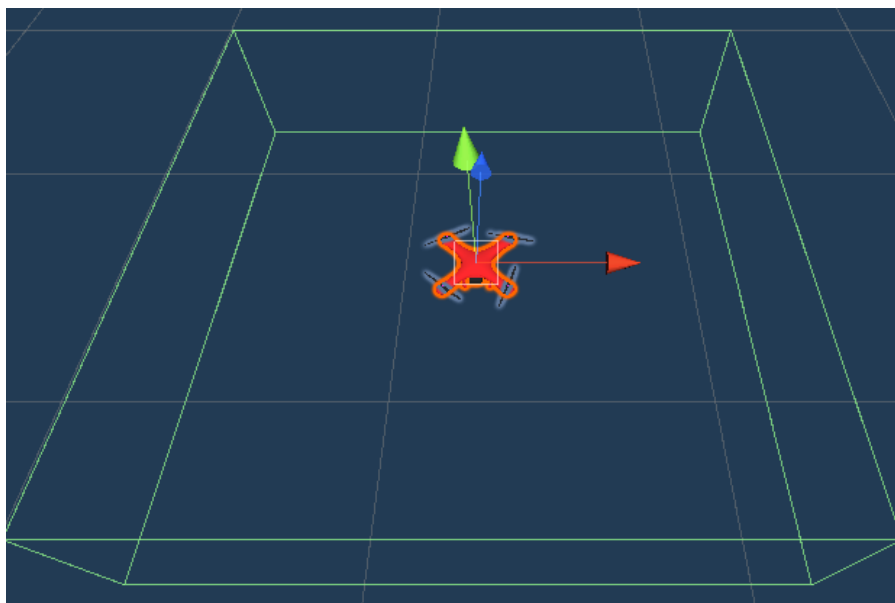


Рис. 1. Моделирование зоны вокруг аппарата для предотвращения пересечений маршрутов

необходимость подзарядки и др.). Датчики на аппаратах во время полета записывают информацию, в каких квадратах они были во время полета (координаты, номера квадратов). Периодически у каждого из датчиков считывается информация и выявляется, в каких квадратах не было полетов БПЛА. Выбирается аппарат, который ближе всего расположен к этим квадратам, и ему назначается измененный маршрут.

Моделировалась еще одна актуальная задача — продление времени автономной работы аппаратов (нахождение в полете при удаленности от базовой станции). При достижении критического уровня оставшейся энергии источника питания (аккумуляторной батареи) аппарат должен просчитывать путь до ближайшей свободной вышки подзарядки и учитывать возможное время занятости вышек (очередь из других аппаратов на подзарядку).

Были разработаны три алгоритма для управления движением БПЛА (адаптировались известные алгоритмы поиска кратчайших путей, алгоритмы покрытия и др.). Мониторинг всей заданной территории обеспечивается построением матрицы квадратов, т. е. делением территории на участки, а алгоритм строит маршруты аппаратов для посещения всех указанных квадратов. Для отслеживания ситуаций пересечения маршрутов двух аппаратов и избегания возможных столкновений используется алгоритм, который отвечает за действия при вхождении посторонних объектов в зону аппарата. На рис. 1 изображено моделирование зоны одного аппарата.

Для принятия каждым аппаратом действий по смене маршрута в случае опасного сближения с другим БПЛА вычисляется, в каких квадратах аппараты будут в какой момент времени, производится проверка совпадений, и если совпадение есть, то происходит смена уровня высоты одним из аппаратов. На рис. 2 показано возможное пересечение маршрутов двух аппаратов и автоматическое решение возникшей проблемы — назначение смены высоты полета для одного из аппаратов.

Для задачи поддержания необходимого уровня энергии каждого аппарата происходит периодическая проверка оставшегося заряда источника питания, а также вычисляется расстояние от аппарата до ближайшей станции подзарядки. Значение оставшегося заряда



Рис. 2. Пример смены высоты аппаратов из-за возможного пересечения маршрутов

сравнивается с величиной заряда, необходимого для того, чтобы аппарат мог долететь до ближайшей станции подзарядки. В случае необходимости подзарядки аппарат меняет свой маршрут и начинает движение к ближайшей станции. После завершения процесса подзарядки аппарат продолжает свой начальный маршрут — полет к заданным квадратам.

Заключение. В статье описаны основные задачи, возникающие при функционировании сетей с узлами на движущихся объектах (VANET и FANET) — управление движением аппаратов, сбор и передача данных, подзарядка аппаратов. Некоторые из этих задач (например, управление маршрутами полетов) активно исследуются учеными и разработчиками разных стран, другие — например, задача подзарядки, мало изучены. Предложена разработанная авторами система имитационного моделирования UAV-monitoring, в которой предусмотрены следующие возможности: моделирование движения беспилотных аппаратов по территории с целью посещения указанных квадратов (сбор данных в каждом квадрате), генерация маршрутов с целью предотвращения их пересечений, своевременная подзарядка аппаратов на наземных станциях.

Список литературы

1. Hamdi M. M., Audah L., Rashid S. A., and Alani S. VANET-based traffic monitoring and incident detection system: A review // International Journal of Electrical & Computer Engineering (2088-8708), 2021. Vol. 11, N 4.
2. Ullo S., Sinha G. Advances in Smart Environment Monitoring Systems Using IoT and Sensors // Sensors (Basel). 2020; 20(11):3113. DOI: 10.3390/s20113113.
3. Соколова О. Д., Матерухин А. В. Аналитический обзор современных информационных технологий в области сбора, обработки и анализа данных, применяемых для мониторинга загрязнения атмосферного воздуха // Проблемы информатики. 2020. № 1. С. 21–34. DOI: 10.24411/2073-0667-2020-10002.
4. Шахов В. В., Соколова О. Д. Анализ сетей с нестационарной топологией. Обзор исследований // Проблемы информатики. 2020. № 4, С. 27–42. DOI: 10.24411/2073-0667-2020-10014.

5. Rohi, G., Ofualagba, G. Autonomous monitoring, analysis, and countering of air pollution using environmental drones // *Heliyon* 6(1), 1–10 (2020).
6. Shakhov V., Sokolova O. On Modeling Air Pollution Detection With Internet of Vehicles // 15th *International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM)*, 2021, P. 1–3, DOI:10.1109/IMCOM51814.2021.9377350.
7. Kaivonen Sami, Ngai Edith. Real-time air pollution monitoring with sensors on city bus // *Digital Communications and Networks*. 2019.
8. Леонов А. В., Чаплышкин В. А. Сети FANET // *Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии*. 2015. N 3(143). С. 297–301.
9. Prozorov D. E., Metelev A. P., Chistjakov A. V., Romanov S. V. Protocols of Georouting of Mobile ad hoc Networks // *T-Comm*, 2012. N 5. P. 16–19.
10. Masahiko Nagai, Apichon Witayangkurn, Kiyoshi Honda, Ryosuke Shibasaki. UAV-Based Sensor Web Monitoring System // *International Journal of Navigation and Observation*. 2012. Vol. 2012, Article ID 858792. [Electron. Res.]: <https://doi.org/10.1155/2012/858792>.
11. Liu, Siwen. Development of a UAV-Based System to Monitor Air Quality over an Oil Field // *Graduate Theses & Non-Theses*. 2018. 187. [Electron. Res.]: https://digitalcommons.mtech.edu/grad_rsch/187
12. Alvear, O., Zema, N. R., Natalizio, E., & Calafate, C. T. Using UAV-Based Systems to Monitor Air Pollution in Areas with Poor Accessibility // *Journal of Advanced Transportation*, 2017. P. 1–14.
13. Masahiko Nagai, Apichon Witayangkurn, Kiyoshi Honda, Ryosuke Shibasaki. UAV-Based Sensor Web Monitoring System // *International Journal of Navigation and Observation*. 2012. Vol. 2012, Article ID 858792, 7 pages. [Electron. Res.]: <https://doi.org/10.1155/2012/858792>
14. Ya'acob N., Zolkapli M., Johari J., Yusof A. L., Sarnin S. S. and Asmadinar A. Z. UAV environment monitoring system // 2017 *International Conference on Electrical, Electronics and System Engineering (ICEESE)*, 2017, P. 105–109, DOI: 10.1109/ICEESE.2017.8298395.
15. Zareb M., Bakhti B., Bouzid Y., Kadourbenkada H., Bouzgou K., Nouibat W. Novel Smart Air Quality Monitoring System Based on UAV Quadrotor // *Proceedings of the 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Applications. ICEECA 2019. Lecture Notes in Electrical Engineering*, Vol. 682. Springer, [Electron. Res.]: https://doi.org/10.1007/978-981-15-6403-1_30
16. Прозоров, Д. Е., Романов С. В. Протокол иерархической маршрутизации самоорганизующейся мобильной сети // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2014. Т. 15. № 3. С. 74–80.
17. Rudometov S., Sokolova O., Materukhin A. Optimization of Mobile Sink Movement in the Gathering Spatio-Temporal Data Process from Air Pollution Sensors // *Proceedings — 2020 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2020*, 2020, P. 648–652. DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208148.
18. Materukhin A., Maiorov A., Gvozdev O., Sokolova O. Simulation of Spatio-Temporal Data Streams from Geosensors Located On mobile Objects // *Proceedings of 15th International Asian School-Seminar Optimization Problems of Complex Systems (OPCS-2019)*, P. 179–183. DOI: 10.1109/OPCS.2019.8880188.
19. Кайсина И. А. Моделирование полезной пропускной способности сети БПЛА при мультипоточковой передаче // *Труды учебных заведений связи*. 2020. Т. 6. № 1. С. 100–108. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-1-100-108.
20. Кайсина И. А., Васильев Д. С., Абилов А. В., Мейтис Д. С., Кайсин А. Е., Нистюк А. И. Сравнительный анализ эффективности ретрансляции потоковых данных в летающей сети // *Вестник ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2019. Т. 22, № 1. С. 108–115. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-1-108-115.

21. Поселенцева Д. Ю., Замятина Е. Б. Опыт исследования алгоритмов маршрутизации и передачи данных в ad-hoc-сетях // Вестник Пермского университета. Математика, механика, информатика. 2019. Вып. 4(47).

22. Tengisand T., Batmunkh A. State feedback control simulation of quad copter model // Proc. Of 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST), 2016, P. 553–557.

23. Patel K., Barve J. Modeling, simulation and control study for the quad-copter UAV // 9th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), 2014, P. 1–6.

24. Benedetti M. De, D’Urso F., Messina F., Pappalardo G., and Santoro C. 3d simulation of unmanned aerial vehicles // XVIII Workshop "DagliOggettiagliAgenti". CEUR-WS, 2017.

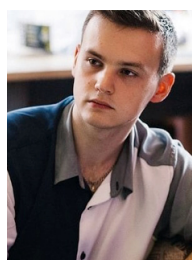


Соколова Ольга Дмитриевна — канд. техн. наук, старш. науч. сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики (ИВМ и МГ СО РАН). Научные интересы: современные

сети передачи данных, имитационное моделирование, нестационарные сети, задачи оптимизации. E-mail: olga@rav.sccc.ru

Olga Sokolova is a Senior Researcher of Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics (ICMMG SB RAS). PhD in computer science. Research interests:

modern data networks, simulation, non-stationary networks, optimization problems.



Шварцкоп Никита Сергеевич — студент Высшего колледжа информатики (ВКИ НГУ). Научные интересы: программирование, высокоуровневые языки, имитационное моделирование. E-mail:

shvarckopnikita@gmail.com

Shvartskop Nikita Sergeevich is a student of the Higher College of Informatics (HCI NSU). Research interests: programming, high-level languages, simulation.

Дата поступления — 06.08.2021