

УДК 621.391

DOI 10.22213/2413-1172-2018-1-89-93

И. А. Кайсина, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

Д. С. Васильев, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

А. В. Абилов, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

А. Е. Кайсин, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

А. И. Нистюк, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

## ТЕСТОВЫЙ СТЕНД ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КАЧЕСТВА СВЯЗИ В МОБИЛЬНЫХ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ СЕТЯХ \*

### Введение

Летающие сенсорные сети представляют собой один из видов самоорганизующихся сетей мобильных устройств (англ. Mobile Ad Hoc Networks, *MANETs*). Каждый узел самоорганизующейся сети является высокомобильным микроБПЛА (беспилотным летательным аппаратом). Все узлы связаны друг с другом с помощью беспроводной технологии, например стандарта 802.11n. При передаче видеоданных по прямому радиоканалу образуется инфраструктурная топология сети (рис. 1).

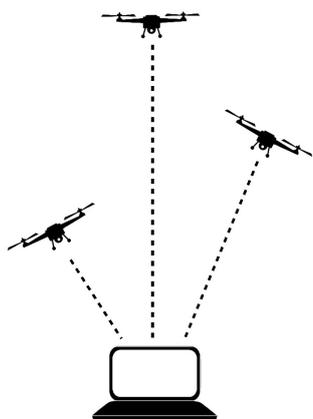


Рис. 1. Инфраструктурная топология летающей сенсорной сети

Несмотря на перспективность данного подхода, в инфраструктурной топологии существует ряд ограничений качества обслуживания. Низкое качество обслуживания может быть вызвано нестабильностью топологии сети и особенностями беспроводной среды передачи. Поэтому данный вид сетей требует новых методов доставки данных [1–4] и новых протоколов маршрутизации [5–8]. В последние годы особое внимание научного сообщества уделяется исследованию подходов к повышению качества обслуживания в летающих сенсорных сетях [9–13].

### Сетевое кодирование

Сегодня для повышения качества обслуживания в самоорганизующихся сетях мобильных устройств исследуется пространственная избыточность (англ. *spatial redundancy*). Пространственная избыточность данного вида сетей заключается в том, что использование промежуточных узлов сети позволяет увеличить качество доставки потоковых данных между источником и адресатом [14–17]. Метод ретрансляции на основе сетевого кодирования может использовать пространственную избыточность для повышения качества обслуживания в самоорганизующихся сетях мобильных устройств. Метод ретрансляции на основе сетевого кодирования предполагается использовать в сети, которая представляет собой совокупность летающих и наземных узлов и беспроводных каналов связи между ними. В этой сети действует больше одной пары узлов источник – адресат. Потери информационных пакетов между источником и адресатом в сети вызваны нестабильной топологией сети и беспроводной природой среды передачи. Предлагаемый метод включает в себя как повторную передачу данных (*ARQ*, *Automatic Repeat-Request*), так и изменение передаваемых пакетов с помощью сетевого кодирования (*Network Coding*).

Повышение PDR предлагается достичь за счет восстановления данных, потерянных из-за несовершенства существующих протоколов маршрутизации, с помощью ретрансляции необходимых пакетов с узлов-соседей. Каждый узел сети отслеживает процесс доставки потоковых данных и отправляет запрос недостающей информации на узлы-соседи. Все узлы являются равноправными и могут выступать в качестве ретрансляторов данных между источником и адресатом. Любой ретранслятор может отвечать на запросы как адресата, так и других узлов сети.

Основная идея сетевого кодирования – сложение пакетов по модулю два до их передачи (COPE-like Network Coding) [18]. Эффективность применения сетевого кодирования была оценена авторами в сетевом симуляторе ns-3 (Network Simulator 3) [19]. Результаты показали эффективность данного метода в FANET [20]. Мы вычислили PDR и пропускную способность (англ. Goodput) на прикладном уровне модели OSI для оценки качества обслуживания в имитируемых сетях. Во всех сценариях промежуточные узлы передавали пакеты с использованием протокола маршрутизации AODV. Следующим этапом является практическая реализация сетевого кодирования в FANET.

### Тестовый стенд

Для будущей реализации метода сетевого кодирования в FANET был собран тестовый стенд и реализовано два сценария, которые помогли оценить: дальность связи между наземной станцией и летающим роботом, возможность реализации сетевого кодирования на промежуточном узле в самоорганизующейся сети. В тестовый стенд входят: наземная станция (ноутбук), летающий робот (беспилотный летательный аппарат, БПЛА) и несколько микрокомпьютеров Raspberry Pi 3. Характеристики элементов тестового стенда (рис. 2):

1. Наземная станция (ноутбук). Ноутбук Asus (Intel (R) Pentium® CPU N3540 @ 2.16GHz, RAM 4,00 GB, 64-разрядный). Операционная система Windows 10. Для полета использовались два программных обеспечения – Missionplanner и APMPlanner2. В качестве анализатора трафика была выбрана программа Wireshark.

2. Летающий робот (беспилотный летательный аппарат). Мы использовали Erle-Copter – это квадрокоптер, который использует Erle-Brain 3 и полетный контроллер APM. Erle-Brain 3 основан на Raspberry Pi. В качестве операционной системы была выбрана Frumbeusa.

3. Микрокомпьютер Raspberry Pi 3. Raspberry Pi 3 имеет 64-битный четырехядерный процессор ARMv8 с тактовой частотой 1,2 ГГц. В каждый Raspberry Pi 3 была установлена SD-карта на 8 ГБ с операционной системой Ubuntu Mate 16.04.

Для первого сценария было использовано вспомогательное оборудование Wi-Fi донгл (TP-LINK AC600 Archer T2UH). Для питания Erle-Copter использовалась батарея floureonlithium-ion на 5500 мАч, 11,1 В.

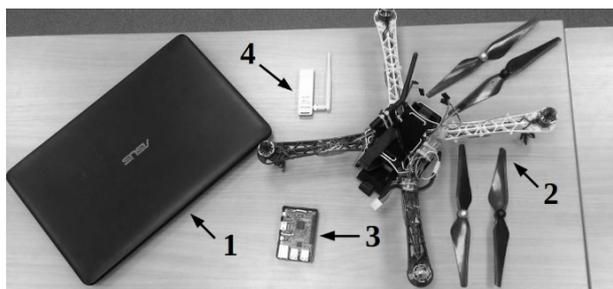


Рис. 2. Элементы тестового стенда: 1 – наземная станция (ноутбук); 2 – БПЛА; 3 – Raspberry Pi 3; 4 – вспомогательное оборудование

### Сценарии

В первом сценарии летающий робот отправлял видеоданные на наземную станцию с помощью программы gstreamer. После сбора всех данных мы проанализировали показатели качества обслуживания (quality of service, QoS) с помощью программы анализатора сетевого трафика Wireshark. По результатам измерений была найдена максимальная дальность между наземной станцией и летающим роботом с использованием стандарта 802.11n (Wi-Fi). В первом сценарии мы использовали ноутбук с операционной системой Windows 10 и летающего робота (Erlecopter) с Linux-подобной ОС.

Оценка стенда проводилась на открытом воздухе вдоль улицы Студенческая. Оба устройства работали на частоте 2,4 ГГц согласно стандарту 802.11n. Между наземной станцией и летающим роботом была создана беспроводная связь с помощью Wi-Fi донгла. Наземная станция была расположена в точке Н (рис. 3). Положение летающего робота (точки 1, 2, 3, 4, 5, 6) изменялось в течение времени.

Расстояние между соседними точками составляет 25 м. Мы использовали сценарий, написанный на языке bash для запуска потоковой передачи видео на летающем узле, а на наземном узле просматривали видео в программе VLC. В каждой точке летающий робот начинал передавать видео на наземную станцию, передача длилась одну минуту. На наземной станции все данные были записаны с использованием программы Wireshark. После сбора был оценен коэффициент PDR.

Во втором сценарии мы создали самоорганизующуюся сеть из трех микрокомпьютеров Raspberry Pi 3. В качестве ОС была выбрана Ubuntu Mate 16.04. На каждом микрокомпьютере был установлен протокол В.А.Т.М.А.Н. для тестирования подключения. Все узлы были расположены в здании 5-го корпуса ИжГТУ на одном этаже. Расположение каждого узла обозначено крестом на рис. 4.

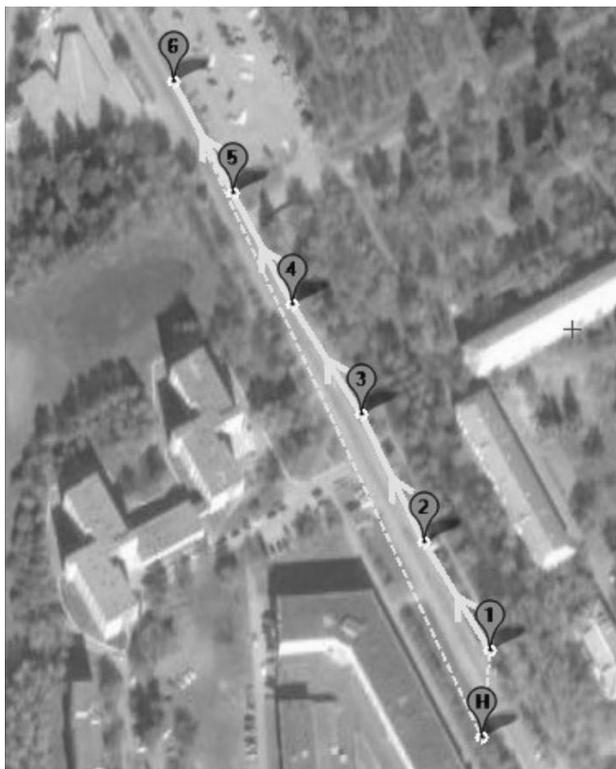


Рис. 3. Первый сценарий

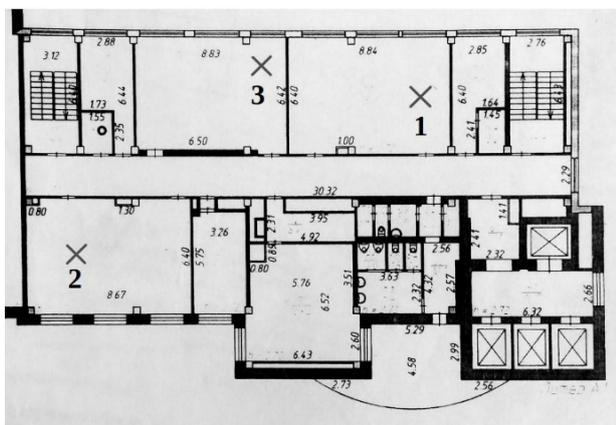


Рис. 4. Расположение узлов во втором сценарии

Для проверки соединения между узлами с каждого микрокомпьютера был отправлен ICMP-запрос с помощью команды ping. После проверки соединения между узлами на каждом узле был настроен TAP-интерфейс bat0 для маршрутизации кадров с помощью протокола V.A.T.M.A.N. С помощью команды tr была проверена возможность осуществления кодирования пакетов на промежуточном узле.

**Результаты**

Первый сценарий был оценен с помощью метрики PDR. Измерения проводились через каждые 25 м, в каждой точке летающий робот останавливался и передавал данные на наземную станцию в течение одной минуты. Все ви-

деооданные передавались как UDP-поток. Все лог-файлы были записаны с помощью программы анализатора трафика Wireshark. Для анализа результатов все полученные пакеты были декодированы как RTP. На основании порядковых номеров в RTP-заголовке был рассчитан средний коэффициент доставки пакетов  $PDR_{ave}$ . На рис. 5 представлена зависимость  $PDR_{ave}$  от расстояния между наземной станцией и летающим роботом. Мы использовали средний коэффициент доставки пакетов (average Packet Delivery Ratio,  $PDR_{ave}$ ) как метрику качества обслуживания Quality of Service (QoS).  $PDR_{ave}$  был рассчитан по формуле

$$PDR_{ave} = \frac{R_x}{T_x},$$

где  $R_x$  – число принятых пакетов;  $T_x$  – число отправленных пакетов.

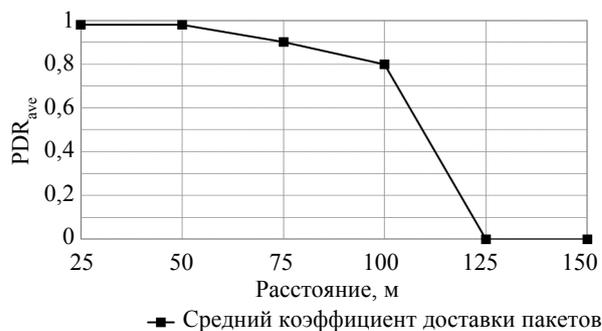


Рис. 5. Зависимость PDR от расстояния

Из представленной на рис. 5 зависимости видно, что PDR равен нулю на расстоянии 125 м. На расстоянии свыше 117 м метрика начинает резко снижаться, что свидетельствует о потере связи между наземной станцией и летающим роботом. Исходя из этого можно сказать, что используемое оборудование Wi-Fi донгл (TP-LINK AC600 Archer T2UH) может поддерживать соединение между узлами на расстоянии не более 117 м.

Во втором сценарии между тремя микрокомпьютерами Raspberry Pi 3 была создана самоорганизующаяся сеть. Мы использовали соединение на 11-м канале (2462 МГц) диапазона частот 2,4 ГГц (рис. 6).

Каждому узлу в командной строке были заданы ip-адреса: первый узел 172.27.0.1 (узел 1 – Аня), второй узел 172.27.0.2 (узел 2 – Борис), третий узел 172.27.0.3 (узел 3 – Коптер). После установления соединения проверка связи между узлами была выполнена с помощью ICMP-запроса. Далее на каждом узле был создан TAP-

интерфейс `bat0` для маршрутизации кадров с помощью протокола В.А.Т.М.А.Н. Каждому узлу были назначены `ip`-адреса: 192.168.0.1 (узел 1 – Аня), второй узел 192.168.0.2 (узел 2 – Борис), третий узел 192.168.0.3 (узел 3 – Коптер). Третий узел (коптер) работал как промежуточный узел между источником (Борисом) и получателем (Аня). Для проверки работы была выполнена команды `tr` (рис. 7).

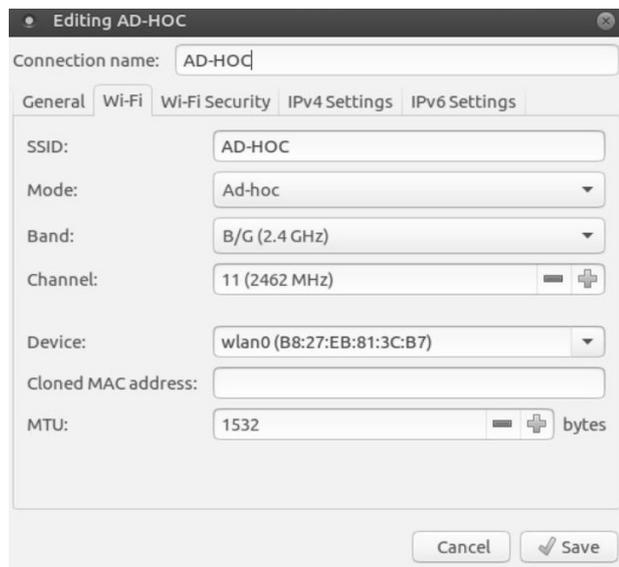


Рис. 6. Настройки соединения



Рис. 7. Тестирование протокола BATMAN

В дальнейшем топология сети из узлов 1, 2 и 3 позволяет использовать метод сетевого кодирования для повышения качества обслуживания.

### Вывод

В статье был представлен тестовый стенд для дальнейшей оценки эффективности новых алгоритмов кодирования в летающих сенсорных сетях. Тестовый стенд был использован в двух сценариях. В первом сценарии была определена максимальная дальность связи между наземной станцией и летающим роботом с использованием Wi-Fi донгла, соединение терялось на расстоянии 117 м. Следовательно, при проведении экспериментов с летающими роботами расстояние между каждым из них не должно превышать 117 м.

Во втором сценарии на основе Raspberry Pi 3 была создана самоорганизующаяся сеть. Оценка соединения была произведена с помощью команды `ping`. На каждом узле был создан TAP-интерфейс `bat0`, на котором был включен прото-

кол В.А.Т.М.А.Н. С помощью команды `tr` был показан переход между узлом источником и узлом получателем. Следовательно, в самоорганизующейся сети с данной топологией на промежуточном узле может быть реализовано сетевое кодирование.

Использование тестового стенда дает возможность осуществлять дальнейшую оценку новых алгоритмов кодирования в сетях БПЛА, в том числе и метода сетевого кодирования.

### Библиографические ссылки

1. Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // *Ad Hoc Networks*. 2013. Т. 11, № 3. С. 1254–1270.
2. Bok P. B., Tuchelmann Y. Context-aware qos control for wireless mesh networks of uavs // *Computer Communications and Networks (ICCCN), 2011 Proceedings of 20th International Conference on*. IEEE, 2011. С. 1–6.
3. Decentralized cooperative aerial surveillance using fixed-wing miniature UAVs / Beard R. W. [et al.] // *Proceedings of the IEEE*. 2006. Т. 94, №. 7. С. 1306–1324.
4. Robinson W. H., Lauf A. P. Resilient and efficient MANET aerial communications for search and rescue applications // *Computing, Networking and Communications (ICNC), 2013. International Conference on*. IEEE, 2013. С. 845–849.
5. Speed-aware routing for UAV ad-hoc networks / Rosati S. [et al.] // *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2013. IEEE, 2013*. С. 1367–1373.
6. UAV-aided cross-layer routing for MANETs / Guo Y. [et al.] // *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2012 IEEE*. IEEE, 2012. С. 2928–2933.
7. Improving routing in networks of Unmanned Aerial Vehicles: Reactive - Greedy - Reactive / Li Y. [et al.] // *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2012. Т. 12, №. 18. С. 1608–1619.
8. A comparative analysis of beaconless opportunistic routing protocols for video dissemination over flying ad-hoc networks / Rosário D. [et al.] // *International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking*. Springer, Cham, 2014. С. 253–265.
9. Software-defined architecture for flying ubiquitous sensor networking / Kirichek R. [et al.] // *Advanced Communication Technology (ICACT), 2017? 19th International Conference on*. IEEE, 2017. С. 158–162.
10. Кучерявый А. Е., Владыко А. Г., Киричек Р. В. Теоретические и практические направления исследований в области летающих сенсорных сетей // *Электросвязь*. 2015. № 7. С. 9–11.
11. Vasiliev D. S., Meitis D. S., Abilov A. Simulation-based comparison of AODV, OLSR and HWMP protocols for flying Ad Hoc networks // *International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking*. Springer, Cham, 2014. С. 245–252.
12. Meitis D., Vasiliev D., Abilov A. Simulation of MANETs routing protocols for UAVs // *Fourth Forum*

of Young Researchers : Framework of International Forum "Education Quality-2014". Izhevsk: 2014. С. 358–363.

13. Кайсина И. А., Васильев Д. С., Абилов А. В. Анализ эффективности протоколов маршрутизации OLSR и AODV в летающей сети FANET // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2017. Т. 20, №. 1. С. 87–90.

14. Oh S. Y., Gerla M., Tiwari A. Robust manet routing using adaptive path redundancy and coding // Communication Systems and Networks and Workshops, 2009. Comsnets, 2009. First International. IEEE, 2009. С. 1–10.

15. Oh S. Y., Shen B., Gerla M. Network coding over a manet proactive link state routing protocol and tdma scheduling // Military communications conference, 2012-MILCOM 2012. IEEE, 2012. С. 1–6.

16. Yang S., Yeo C. K., Lee B. S. Toward reliable data delivery for highly dynamic mobile ad hoc networks // IEEE transactions on mobile computing. 2012. Т. 11, №. 1. С. 111–124.

17. Marchenko N., Bettstetter C. Cooperative ARQ with relay selection: An analytical framework using semi-Markov processes // IEEE transactions on vehicular technology. 2014. Т. 63, №. 1. С. 178–190.

18. XORs in the air. Practical wireless network coding / Katti S. [et al.] // ACM SIGCOMM computer communication review. ACM, 2006. Т. 36, №. 4. С. 243–254.

19. Кайсина И. А., Васильев Д. С., Абилов А. В. Модель в среде ns-3 для передачи видеоданных в сети БПЛА // Материалы XXIII Республ. выставки-сессии студенческих инновационных проектов / ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2017. С. 69–74.

20. Vasiliev D. S., Kaysina I. A., Abilov A. Performance Evaluation of COPE-like Network Coding in Flying Ad Hoc Networks: Simulation-Based Study // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. Springer, Cham, 2017. С. 577–586.

## References

1. Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel S. (2013). Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey. *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 3, pp. 1254-1270.

2. Bok P. B., Tuelmann Y. (2011). Context-aware qos control for wireless mesh networks of uavs. Proceedings of the *20th International Conference*, pp. 1-6.

3. Beard R. W. (2006). Decentralized cooperative aerial surveillance using fixed-wing miniature UAVs. *Proceedings of the IEEE*, vol. 94, no. 7, pp. 1306-1324.

4. Robinson W. H., Lauf A. P. (2013). Resilient and efficient MANET aerial communications for search and rescue applications. Proceedings of the *International Conference*, pp. 845-849.

5. Rosati S. (2013). Speed-aware routing for UAV ad-hoc networks. Proceedings of the *Globecom Workshops (GC Wkshps)*. IEEE.

6. Guo Y. (2012). UAV-aided cross-layer routing for MANETs. Proceedings of the *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. IEEE.

7. Li Y. (2012). Improving routing in networks of Unmanned Aerial Vehicles: Reactive – Greedy – Reactive. *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 12, no.18, pp. 1608-1619.

8. Rosário D. (2014). A comparative analysis of beaconless opportunistic routing protocols for video dissemination over flying ad-hoc networks. Proceedings of the *International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking*. Springer, Cham.

9. Kirichek R. (2017). Software-defined architecture for flying ubiquitous sensor networking. Proceedings of the *Advanced Communication Technology (ICACT)*. IEEE.

10. Kucheryavyy A. E., Vladyko A. G., Kirichek R. V. (2015). *Elektrosvyaz'* [Telecommunications], no. 7, pp. 9-11 (in Russ.).

11. Vasiliev D. S., Meitis D. S., Abilov A. (2014). Simulation-based comparison of AODV, OLSR and HWMP protocols for flying Ad Hoc networks. *International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking*. Springer, Cham.

12. Meitis D., Vasiliev D., Abilov A. (2014). Simulation of MANETs routing protocols for UAVs. Proceedings of the *Fourth Forum of Young Researchers*. Izhevsk, Kalashnikov ISTU, pp. 358-363.

13. Kaisina I. A., Vasil'ev D. S., Abilov A. V. (2017). *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov ISTU], vol. 20, no. 1, pp. 87-90 (in Russ.).

14. Oh S. Y., Gerla M., Tiwari A. (2009). Robust manet routing using adaptive path redundancy and coding // Communication Systems and Networks, pp. 1-10.

15. Oh S. Y., Shen B., Gerla M. (2012). Network coding over a manet proactive link state routing protocol and tdma scheduling. Proceedings of the *Military communications conference*, pp. 1-6.

16. Yang S., Yeo C. K., Lee B. S. (2012). Toward reliable data delivery for highly dynamic mobile ad hoc networks. *IEEE transactions on mobile computing*, vol. 11, no. 1, pp. 111-124.

17. Marchenko N., Bettstetter C. (2014). Cooperative ARQ with relay selection: An analytical framework using semi-Markov processes. *IEEE transactions on vehicular technology*, vol. 63, no. 1, pp. 178-190.

18. Katti S. (2006). XORs in the air. Practical wireless network coding. *ACM SIGCOMM computer communication review*, vol. 36, no. 4.

19. Kaisina I. A., Vasil'ev D. S., Abilov A. V. (2017). *Model' v srede ns-3 dlya peredachi videodannykh v seti BPLA* [Model in the ns-3 environment for transferring video data to the UAV network]. Proceedings of the *XXIII Respublikanskaya vystavka-sessiya studencheskikh innovatsionnykh projektov. Kalashnikov ISTU*, pp. 69-74.

20. Vasiliev D. S., Kaysina I. A., Abilov A. (2017). Performance Evaluation of COPE-like Network Coding in Flying Ad Hoc Networks: Simulation-Based Study. Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. Springer, Cham, pp. 577-586.