

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).

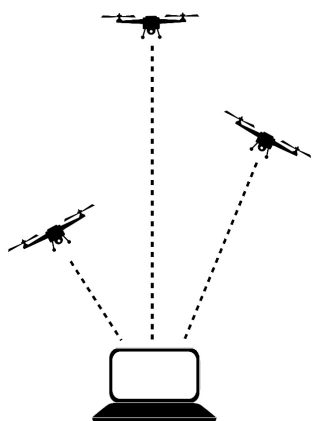


Рис. 1. Инфраструктурная топология летающей сенсорной сети

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.

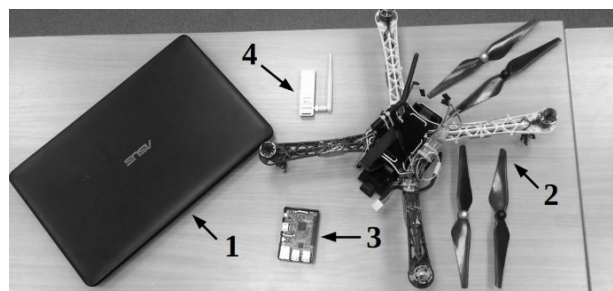


Рис. 2. Элементы тестового стенда: 1 – наземная станция (ноутбук); 2 – БПЛА; 3 – Raspberry Pi 3; 4 – вспомогательное оборудование

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

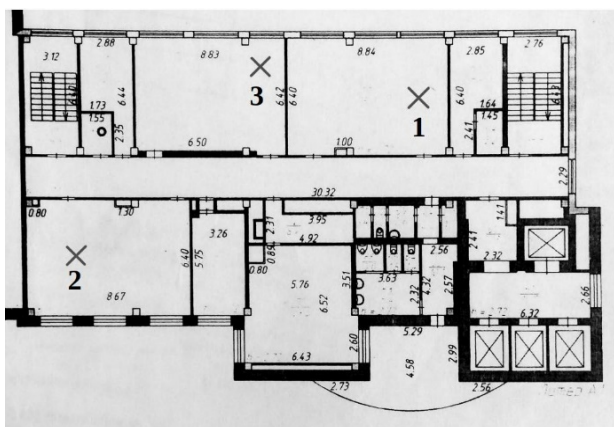


Рис. 4. Расположение узлов во втором сценарии

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.

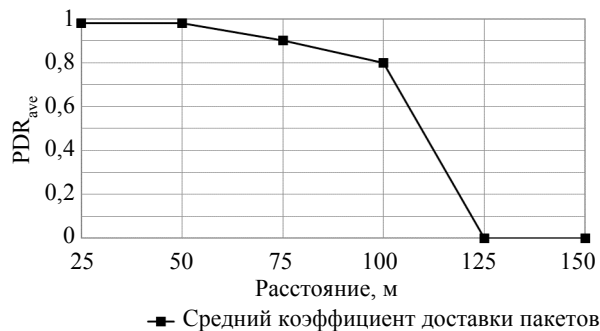


Рис. 5. Зависимость PDR от расстояния

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 потери 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).

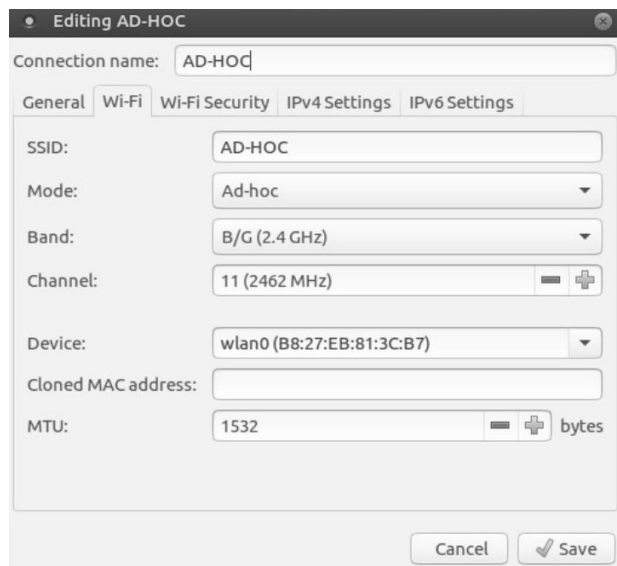


Рис. 6. Настройки соединения



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. Kucheryavyi 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.