

УДК 621.391

DOI 10.52575/2712-746X-2024-51-1-221-231

Управление передачей видеопотоков в летающей беспроводной самоорганизующейся сети

Лихошерстов Р.В., Польшиков К.А., Лазарев С.А.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

E-mail: oaqwater@yandex.ru, polshchikov@bsu.edu.ru, lazarev_s@bsu.edu.ru

Аннотация. Статья посвящена совершенствованию видеомониторинга территорий, осуществляемого на основе применения летающей беспроводной самоорганизующейся сети (Flying Ad hoc NETWORK, FANET). Видеомониторинг проводится в поисково-спасательных целях. Для обеспечения высокого качества FANET-видеотрансляции предложен алгоритм поддержки принятия решений по управлению передачей видеопотоков. Алгоритм предусматривает оценивание вероятности обеспечения высокого качества видеотрансляции. В зависимости от значений этой вероятности рекомендуется одно из следующих решений: передавать новый видеопоток, сократить среднюю длину беспроводных каналов или отключить передачу малоинформативного видеопотока. В статье предложено считать, что принято правильное решение по управлению характеристиками передачи видеопотоков, если в результате его принятия обеспечено высокое качество видеотрансляции. Результаты вычислительных экспериментов показали, что применение представленного алгоритма позволяет существенно повысить вероятность принятия правильного решения по управлению передачей видеопотоков в FANET.

Ключевые слова: летающая беспроводная самоорганизующаяся сеть, FANET, поддержка принятия решений, видеотрансляция, видеопоток, видеомониторинг территорий

Для цитирования: Лихошерстов Р.В., Польшиков К.А., Лазарев С.А. 2024. Управление передачей видеопотоков в летающей беспроводной самоорганизующейся сети. Экономика. Информатика, 51(1): 221–231. DOI 10.52575/2712-746X-2024-51-1-221-231

Control of Video Stream Transmission in a Flying Ad Hoc Network

Rodion V. Likhosherstov, Konstantin A. Polshchikov, Sergey A. Lazarev

Belgorod State National Research University, 85 Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia

E-mail: oaqwater@yandex.ru, polshchikov@bsu.edu.ru, lazarev_s@bsu.edu.ru

Abstract. The article is devoted to improving video monitoring of territories, carried out through the use of a flying wireless self-organizing network (Flying Ad hoc NETWORK, FANET). Video monitoring is carried out for search and rescue purposes. In order to promptly detect victims and people in need of help, it is necessary to organize in real time high-quality transmission of video streams recorded by cameras of flying aircraft to the monitors of the control center of the rescue unit. To ensure high quality FANET video broadcasting, a decision support algorithm for controlling the transmission of video streams is proposed. The algorithm involves assessing the probability of ensuring high quality video broadcasting. Depending on the values of this probability, one of the following solutions is recommended: to transmit a new video stream, to reduce the average length of wireless channels, or to disable the transmission of a low-informative video stream. The article suggests that the correct decision has been made to manage the characteristics of video stream transmission if, as a result of its adoption, high quality video broadcasting is ensured. The results of computational experiments showed that the use of the presented algorithm can significantly increase the probability of making the right decision on controlling the transmission of video streams in FANET.

Keywords: flying ad hoc network, FANET, decision support, video broadcast, video stream, video monitoring of territories

For citation: Likhosherstov R.V., Polshchikov K.A., Lazarev S.A. 2024. Control of Video Stream Transmission in a Flying Ad Hoc Network. *Economics. Information technologies*, 51(1): 221–231. DOI 10.52575/2712-746X-2024-51-1-221-231

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) активно используются в различных прикладных областях [Cruz, 2018; Khan, Hassan, Alshehri, 2021; Mahdi et al., 2021; Polshchikov et al., 2021; Agrawal, Tomar, Kapoor, 2022]. БПЛА могут успешно применяться в поисково-спасательных операциях для решения задач мониторинга территорий, подвергшихся деструктивным воздействиям. В целях оперативного обнаружения пострадавших и нуждающихся в помощи людей необходимо организовать в реальном времени трансляцию видеопотоков, снимаемых камерами летающих средств, на мониторы диспетчерского центра спасательного подразделения. В условиях отсутствия или поражения телекоммуникационной инфраструктуры для передачи видеоинформации на значительные расстояния хорошими возможностями обладает технология летающей беспроводной самоорганизующейся сети (Flying Ad hoc NETwork, FANET) [Dinh et al., 2019; Srivastava, Prakash, 2021; Wheeb, 2022]. Узлы такой сети размещаются на БПЛА и способны выполнять функции ретрансляции и маршрутизации передаваемых пакетов данных. Такая децентрализованная сеть позволяет передавать потоки видеоинформации в условиях случайной топологии, быстро изменяющейся в трехмерном пространстве.

В процессе выполнения поисково-спасательных операций и своевременного обнаружения пострадавших необходимо обеспечить высокое качество FANET-видеотрансляции. Проблеме повышения качества связи в беспроводных самоорганизующихся сетях посвящены публикации многих исследователей [Konstantinov et al., 2017a; Noor, Al-Zahrani, Khan, 2020; Lee, Hosseinzadeh, Ali, 2021; Polshchikov, Shabeeb, Lazarev, 2020; Abdulhae, Mandeep, Islam, 2022]. Однако вопросам обеспечения качественной трансляции видеопотоков в FANET уделено недостаточное внимание.

К основным особенностям передачи видеопотоков в летающей беспроводной самоорганизующейся сети следует отнести повышенную динамичность сетевой топологии, частые изменения расстояний между движущимися узлами, которые могут достигать недопустимо больших значений. Эти особенности в условиях ограниченной производительности сетевых каналов приводят к отказам в передаче видеопотоков [Konstantinov et al., 2017b; Polshchikov, Lazarev, Zdorovtsov, 2017; Pandey, Shukla, Agrawal, 2020; Souza, Jailton, Carvalho, 2020], а также к потерям пакетов, вызванных битовыми искажениями вследствие возникающего время от времени снижения уровня мощности принимаемых сигналов [Konstantinov et al., 2016; Kim, Lee, 2018; Bharany, Sharma, Badotra, 2021; Rezwan, Choi, 2021]. Указанные факторы существенно ухудшают качество видеотрансляции в FANET. Если предположить, что выходная мощность узлов, передающих видеопотоки, установлена на максимально допустимом уровне, то добиться высокого качества видеотрансляции можно, управляя значениями ряда других параметров. К этим параметрам относятся интенсивность поступления запросов на передачу видеопотоков, средняя длительность передачи видеопотока, а также средняя длина беспроводных каналов.

Управление значениями параметров, влияющих на качество видеотрансляции, осуществляется на основе принятия решений о передаче (или отказе в передаче) новых видеопотоков, отключении (или неотключении) передаваемых видеопотоков, изменении расстояния между узлами сети. Очевидно, лицам, осуществляющим видеомониторинг, для принятия правильных решений требуются средства, выдающие обоснованные рекомендации о том, какие действия нужно выполнять для обеспечения высокого качества видеотрансляции. В связи с этим исследования, посвященные разработке алгоритма поддержки принятия решений в процессе видеомониторинга на основе применения FANET, представляются актуальными.

Обоснование решений по управлению передачей видеопотоков

Допустим, в процессе поисково-спасательной операции выполняется видеомониторинг территорий с использованием FANET. Для обнаружения пострадавших на мониторы диспетчерского центра спасательного подразделения передаются определенные видеопотоки, которые снимаются камерами, размещенными на БПЛА. При этом время от времени в силу различных причин возможно прекращение трансляции каких-то передаваемых видеопотоков, а также возникновение необходимости в передаче новых видеопотоков. Чтобы наблюдатели диспетчерского центра могли эффективно выполнять обнаружение людей, требующих спасения, необходимо обеспечить высокое качество FANET-видеотрансляции на используемые мониторы.

Производительность сети FANET ограничена и случайна. В этих условиях, чтобы передача новых видеопотоков не привела к снижению качества видеотрансляции до недопустимого уровня, предлагается набор рекомендуемых решений, представленный в таблице 1. В процессе принятия решений учитывается прежде всего, какое значение будет принимать величина Hq (вероятность обеспечения высокого качества видеотрансляции) в случае передачи нового видеопотока. Если оцениваемое значение этой величины составляет не менее 0,95, то передача нового видеопотока разрешается. В противном случае учитывается дополнительный признак: имеется ли в числе передаваемых в текущий момент видеопотоков так называемый малоинформативный видеопоток, передачу которого можно отключить. Если в текущий момент такой видеопоток передается, то его рекомендуется отключить. Если же не имеется малоинформативных видеопотоков, то предписывается сократить среднюю длину беспроводного канала до рекомендуемого значения rd .

Таблица 1
Table 1

Рекомендуемые решения Recommended solutions

| Учитываемые признаки | | Рекомендуемые решения |
|----------------------|---|---|
| Значение Hq | Передается / не передается малоинформативный видеопоток | |
| $\geq 0,95$ | Не имеет значения | Передавать новый видеопоток |
| $< 0,95$ | Не передается | Сократить среднюю длину канала до rd метров |
| $< 0,95$ | Передается | Отключить передачу малоинформативного видеопотока |

При оценивании вероятности обеспечения высокого качества видеотрансляции по сети следует принимать во внимание, что в самом нежелательном случае все видеопотоки проходят по одному и тому же наиболее загруженному каналу. Тогда величина Hq равна вероятности трансляции видеопотоков с высоким качеством по этому каналу и может быть вычислена по формуле [Jameel et al., 2022]:

$$Hq = \sum_{x=0}^b \frac{a!}{x!(a-x)!} [1-(p+g)]^{a-x} (p+g)^x, \quad (1)$$

где a – число поступивших запросов на передачу видеопотоков; b – величина, которую не должна превышать сумма числа отказов в передаче видеопотоков и числа видеопотоков, переданных с недопустимым уровнем потерь пакетов, причем $b \leq 0,5a$; p – вероятность отказа в передаче видеопотока; g – вероятность передачи видеопотока с недопустимым уровнем потерь пакетов.

Величину p можно вычислить как вероятность отказа в обслуживании запроса в многоканальной системе с ограниченной длиной очереди:

$$p = \frac{\frac{(\lambda\tau)^{(R/r)}}{(R/r)!} \left(\frac{\lambda\tau r}{R}\right)^m}{\frac{(\lambda\tau)^{(R/r)}}{(R/r)!} \sum_{u=1}^m \left(\frac{\lambda\tau r}{R}\right)^u + \sum_{x=0}^{(R/r)} \frac{(\lambda\tau)^x}{x!}}, \quad (2)$$

где λ – интенсивность поступления запросов на передачу видеопотоков; τ – средняя длительность передачи видеопотока; m – объем буфера для очереди запросов на передачу видеопотоков; R – битовая скорость передачи данных по каналу; r – производительность канала, необходимая для передачи одного видеопотока с допустимым уровнем потерь пакетов.

Выражение (2) справедливо при выполнении условия $\frac{R}{r} > \lambda\tau$.

Для вычисления вероятности передачи по каналу видеопотока с недопустимым уровнем потерь пакетов можно использовать следующее выражение:

$$g = 1 - \left[(1-v)^w + \sum_{z=1}^{PL} y_{w,z} (1-v)^{w-z} v^z \right], \quad (3)$$

где w – число пакетов в передаваемом видеопотоке; v – вероятность потери пакета в процессе передачи по каналу; PL – допустимое число потерянных пакетов при передаче видеопотока.

Величину PL можно вычислить по формуле:

$$PL = \left\lceil \frac{w - 2 \cdot CP}{CP + 1} \right\rceil, \quad (4)$$

где CP – число пакетов, которые нужно получить подряд до и после утраченного пакета, чтобы компенсировать его потерю.

Коэффициенты $y_{w,z}$ могут быть вычислены при $w > 2CP$ по формуле:

$$y_{w,z} = \begin{cases} w - 2CP, & z = 1; \\ 0, & z > 1, w \leq 3CP + 1; \\ \sum_{i=2CP+1}^{w-z-1} y_{i,z-1}, & z > 1, w > 3CP + 1. \end{cases} \quad (5)$$

Выражения (3)–(5) учитывают возможность восстановления потерянных пакетов на приемном узле с помощью выполнения процедур аппроксимации. При этом, чтобы на приемном узле восстановить потерю пакета, нужно получить подряд не менее CP предыдущих и не менее CP последующих пакетов. Вероятность потери пакета в процессе передачи по каналу можно вычислить с помощью выражения:

$$v = 1 - \left[1 - Q \left(\frac{2 \left(P_T + 10 \lg \frac{(c/f)^2}{(4\pi d)^2 L_s} \right)}{R \cdot k \cdot T_R \cdot N_F} \right) \right]^S, \quad (6)$$

где P_T – мощность передачи сигнала; c – скорость распространения сигнала; f – частота сигнала; d – среднее расстояние между передающими и приемными узлами; L_S – системные потери; k – постоянная Больцмана; T_R – температура; N_F – коэффициент шума; S – битовая длина пакета.

Для поддержки принятия решений в процессе проведения FANET-видеомониторинга предлагается реализация представленного ниже алгоритма.

Предлагаемый алгоритм

Блок-схема алгоритма поддержки принятия решений по управлению передачей видеопотоков в летающей беспроводной самоорганизующейся сети показана на рисунке 1.

Алгоритм предполагает выполнение следующих шагов:

Шаг 1. Начало алгоритма.

Шаг 2. Вводятся исходные данные: T – суммарное число интервалов времени выполнения алгоритма; число видеопотоков $A = 1$; суммарная длительность передачи видеопотоков $ST = 0$; средняя длительность передачи видеопотока по каналу $\tau = 0$; интенсивность поступления запросов на передачу видеопотоков $\lambda = 0$.

Шаг 3. Номер интервала времени t увеличивается на 1. Если номер текущего интервала времени превышает значение, то осуществляется переход к шагу 20. В противном случае выполнение алгоритма переходит к шагу 4.

Шаг 4. Номер видеопотока i увеличивается на 1. Если номер видеопотока превышает значение A , то осуществляется переход к шагу 7. В противном случае выполнение алгоритма переходит к шагу 5.

Шаг 5. Если передача потока номер i окончена ранее текущего интервала времени, то осуществляется переход к шагу 6. В противном случае выполнение алгоритма возвращается к шагу 4.

Шаг 6. Значение суммарной длительности передачи видеопотоков ST увеличивается на единицу.

Шаг 7. Лицу, принимающему решение, предлагается ответить на вопрос 1: «Требуется ли передача нового потока?»

Шаг 8. Если требуется передача нового потока, то осуществляется переход к шагу 9. В противном случае выполнение алгоритма возвращается к шагу 3.

Шаг 9. Выполняется процедура оценивания величины pd – прогнозируемой средней длины беспроводного канала.

Шаг 10. Вычисляются значения интенсивности поступления запросов на передачу видеопотоков по каналу и средней длительности передачи видеопотока по каналу по формулам:

$$\lambda = \frac{A+1}{t}, \quad (7)$$

$$\tau = \frac{ST}{A}. \quad (8)$$

Вычисляется значение вероятности обеспечения высокого качества видеотрансляции с использованием выражений (1)–(6).

Шаг 11. Проверяется выполнение условия: $Hq \geq 0,95$. Если данное условие выполняется, то осуществляется переход к шагу 12. В противном случае выполнение алгоритма переходит к шагу 13.

Шаг 12. Лицу, принимающему решение, выдается сообщение 1: «Передача видеопотока существенно не повлияет на качество видеотрансляции. Рекомендуется принять решение 1 – передавать видеопоток». Выполнение алгоритма переходит к шагу 18.

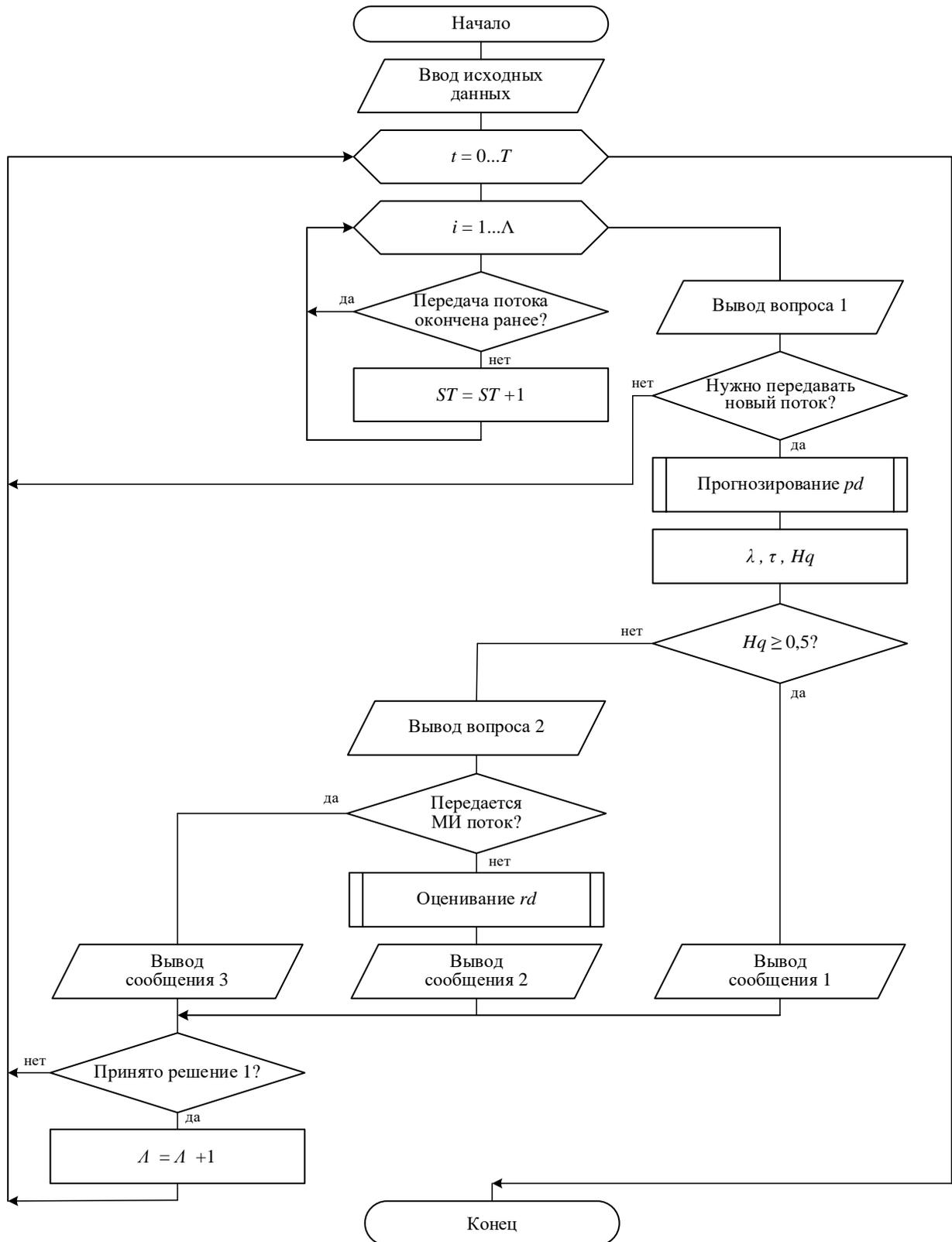


Рис. 1. Блок-схема алгоритма управления передачей видеопотоков в FANET
 Fig. 1. Block diagram of the algorithm for controlling the transmission of video streams in FANET

Шаг 13. Лицу, принимающему решение, предлагается ответить на вопрос 1: «Имеется ли малоинформативный видеопоток в числе передаваемых видеопотоков?»

Шаг 14. Если малоинформативный поток передается в текущий момент времени, то осуществляется переход к шагу 17. В противном случае выполнение алгоритма переходит к шагу 15.

Шаг 15. Выполняется процедура оценивания величины rd – рекомендуемой средней длины беспроводного канала.

Шаг 16. Лицу, принимающему решение, выдается сообщение 2: «Передача потока может ухудшить качество видеотрансляции. Рекомендуется принять решение 2 – сократить среднюю длину канала до rd метров». Выполнение алгоритма переходит к шагу 18.

Шаг 17. Лицу, принимающему решение, выдается сообщение 3: «Передача потока может ухудшить качество видеотрансляции. Рекомендуется принять решение 3 – отключить передачу малоинформативного потока».

Шаг 18. Если принято решение 1, то осуществляется переход к шагу 19. В противном случае выполнение алгоритма возвращается к шагу 3.

Шаг 19. Номер видеопотока l увеличивается на 1. Выполнение алгоритма возвращается к шагу 3.

Шаг 20. Конец алгоритма.

Предложенный алгоритм использован при проведении вычислительных экспериментов, выполненных с помощью имитационной модели процесса принятия решений по управлению передачей видеопотоков в FANET.

Вычислительные эксперименты

Будем считать, что принято правильное решение по управлению характеристиками FANET-видеомониторинга, если в результате его принятия обеспечено высокое качество видеотрансляции. Введем величину sb – сумма числа отказов в передаче видеопотоков и числа видеопотоков, переданных с недопустимым уровнем потерь пакетов. Высокое качество видеотрансляции будет обеспечено, если величина sb не будет превышать величину β , причем $\beta \leq 0,5\alpha$.

Допустим, величина sb не должна превышать B процентов от числа поступивших запросов на передачу видеопотоков. Величину β можно вычислить по формуле:

$$\beta = \left\lceil \frac{B \cdot \alpha}{100\%} \right\rceil. \quad (9)$$

В процессе вычислительных экспериментов с использованием имитационной модели для оценивания корректности принятия решений ведется подсчет величины sb . В конце каждого эксперимента эта величина сравнивается со значением β . Если $sb \leq \beta$, то считается, что в данном эксперименте было обеспечено высокое качество видеотрансляции.

Вероятность принятия правильного решения по управлению передачей видеопотоков в FANET оценивается с помощью выражения:

$$P_{corr} = \frac{Ehq}{E_{tot}}. \quad (10)$$

где Ehq – число экспериментов, в которых обеспечено высокое качество видеотрансляции; E_{tot} – суммарное число проведенных экспериментов.

В процессе исследования выполнено $E_{tot} = 520$ вычислительных экспериментов по оцениванию корректности принятия решений по управлению передачей видеопотоков в FANET с применением предложенного алгоритма. При выполнении экспериментов велись подсчеты величин α и sb , вычислялись значения β по формуле (9). В конце каждого эксперимента величина sb сравнивалась со значением β . Если $sb \leq \beta$, то в данном экспери-

менте фиксировалось обеспечение высокого качества видеотрансляции. В таблице 2 представлен фрагмент результатов, полученных в ходе вычислительных экспериментов. Заданное значение величины B составляло 10 процентов.

Таблица 2
Table 2

Результаты вычислительных экспериментов
Results of computational experiments

| Номер эксперимента | α | β | sb | $sb \leq \beta$ |
|--------------------|----------|---------|------|-----------------|
| 1 | 52 | 5 | 4 | + |
| 2 | 46 | 5 | 3 | + |
| 3 | 48 | 5 | 7 | – |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| 519 | 56 | 6 | 5 | + |
| 520 | 50 | 5 | 4 | + |

На основе экспериментальных данных выполнено оценивание величины P_{corr} по формуле (10). В результате установлено, что с применением предложенного алгоритма вероятность принятия правильного решения по управлению передачей видеопотоков в FANET составляет 0,924. Выполнены аналогичные эксперименты по оцениванию корректности принятия решений по управлению передачей видеопотоков в FANET без применения предложенного алгоритма. В результате этих экспериментов получено значение $P_{corr} = 0,761$.

Заключение

Таким образом, разработан алгоритм поддержки принятия решений по управлению передачей видеопотоков в летающей беспроводной самоорганизующейся сети. В соответствии с этим алгоритмом оценивается вероятность обеспечения высокого качества видеотрансляции. Далее в зависимости от значений этой величины рекомендуется одно из следующих решений: передавать новый видеопоток, сократить среднюю длину беспроводных каналов или отключить передачу малоинформативного видеопотока.

Предложено считать, что принято правильное решение по управлению характеристиками передачи видеопотоков в тех случаях, если в результате его принятия обеспечено высокое качество видеотрансляции. Проведение вычислительных экспериментов показало, что применение представленного алгоритма позволяет повысить вероятность принятия правильного решения по управлению передачей видеопотоков в FANET на 16,3 %.

Дальнейшие исследования в рамках рассмотренной тематики будут посвящены созданию программного обеспечения для реализации предложенного алгоритма.

Список литературы

- Abdulhae O.T., Mandeep J. S., Islam M. 2022. Cluster-Based Routing Protocols for Flying Ad Hoc Networks (FANETs). IEEE Access, 10: 32981–33004.
- Agrawal J., Tomar R., Kapoor M. 2022. A novel unmanned aerial vehicle-sink enabled mobility model for military operations in sparse flying ad-hoc network. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 33(5): e4466.
- Bharany S., Sharma S., Badotra S. 2021. Energy-efficient clustering scheme for flying ad-hoc networks using an optimized leach protocol. Energies, 14(19): 6016.
- Cruz E. 2018. A Comprehensive Survey in Towards to Future FANETs. IEEE Latin America Transactions, 16(3): 876–884.

- Dinh T. D., Kirichek R., Le D. T., Tran T. T. T. 2019. Flying Ad-Hoc Network for Emergency Based on IEEE 802.11p Multichannel MAC Protocol. *Lecture Notes in Computer Science*, 11965: 479–494.
- Jameel J.Q., Mahdi T.N., Polshchykov K.A., Lazarev S.A., Likhosherstov R.V., Kiselev V.E. 2022. Development of a mathematical model of video monitoring based on a self-organizing network of unmanned aerial vehicles. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 10(6): 84–95.
- Khan I. U., Hassan M. A., Alshehri M. D. 2021. Monitoring System-Based Flying IoT in Public Health and Sports Using Ant-Enabled Energy-Aware Routing. *Journal of Healthcare Engineering*, 2021: 1686946.
- Kim D. Y., Lee J. W. 2018. Integrated Topology Management in Flying Ad Hoc Networks: Topology Construction and Adjustment. *IEEE Access*, 6: 61196–61211.
- Konstantinov I., Polshchykov K., Lazarev S., Polshchykova O. 2017. Mathematical Model of Message Delivery in a Mobile Ad Hoc Network. *Proceedings of the 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*: 10–13.
- Konstantinov I., Polshchykov K., Lazarev S., Polshchykova O. 2017. Model of Neuro-Fuzzy Prediction of Confirmation Timeout in a Mobile Ad Hoc Network. *CEUR Workshop Proceedings. Mathematical and Information Technologies*, 1839: 174–186.
- Konstantinov I., Polshchykov K., Lazarev S., Polshchykova O. 2016. The Usage of the Mobile Ad-Hoc Networks in the Construction Industry. *Proceedings of the 10th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*: 455–457.
- Lee S. W., Hosseinzadeh M., Ali S. 2021. An Energy-Aware and Predictive Fuzzy Logic-Based Routing Scheme in Flying Ad Hoc Networks (FANETs). *IEEE Access*, 9: 129977–130005.
- Mahdi T.N., Jameel J.Q., Polshchykov K.A., Lazarev S.A., Polshchykov I.K., Kiselev V.E. 2021. Clusters partition algorithm for a self-organizing map for detecting resource-intensive database inquiries in a geo-ecological monitoring system. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 9(4): 1138–1145.
- Noor F., Al-Zahrani A., Khan M. A. 2020. A review on communications perspective of flying AD-HOC networks: Key enabling wireless technologies, applications, challenges and open research topics. *Drones*, 4(4): 1–14.
- Pandey A., Shukla P.K., Agrawal R. 2020. An adaptive Flying Ad-hoc Network (FANET) for disaster response operations to improve quality of service (QoS). *Modern Physics Letters*, 34(10): 2050010.
- Polshchykov K., Lazarev S., Zdorovtsov A. 2017. Multimedia Messages Transmission Modeling in a Mobile Ad Hoc Network. *Proceedings of the 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*: 24–27.
- Polshchykov K., Shabeeb A.H.T., Lazarev S. 2020. Algorithm for receiving the recommended bandwidth of a wireless self-organizing network channel. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 8(3): 1873–1879.
- Polshchykov K., Shabeeb A. H. T., Lazarev S., Kiselev V. 2021. Justification for the decision on loading channels of the network of geoeological monitoring of resources of the agroindustrial complex. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 9(3): 781–787.
- Rezwan S., Choi W. 2021. A survey on applications of reinforcement learning in flying Ad-hoc networks. *Electronics*, 10(4): 1–19.
- Souza J., Jailton J., Carvalho T. 2020. QoS and QoE aware routing protocol for flying ad-hoc surveillance networks using fuzzy inference systems. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 19(1): 11–25.
- Srivastava A., Prakash J. 2021. Future FANET with application and enabling techniques: Anatomization and sustainability issues. *Computer Science Review*, 39: 100359.
- Wheeb A. H. 2022. Flying Ad hoc Networks (FANET): Performance Evaluation of Topology Based Routing Protocols. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 16(4): 137–149.

References

- Abdulhae O.T., Mandeep J. S., Islam M. 2022. Cluster-Based Routing Protocols for Flying Ad Hoc Networks (FANETs). *IEEE Access*, 10: 32981–33004.

- Agrawal J., Tomar R., Kapoor M. 2022. A novel unmanned aerial vehicle-sink enabled mobility model for military operations in sparse flying ad-hoc network. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 33(5): e4466.
- Bharany S., Sharma S., Badotra S. 2021. Energy-efficient clustering scheme for flying ad-hoc networks using an optimized leach protocol. *Energies*, 14(19): 6016.
- Cruz E. 2018. A Comprehensive Survey in Towards to Future FANETs. *IEEE Latin America Transactions*, 16(3): 876–884.
- Dinh T. D., Kirichek R., Le D. T., Tran T. T. T. 2019. Flying Ad-Hoc Network for Emergency Based on IEEE 802.11p Multichannel MAC Protocol. *Lecture Notes in Computer Science*, 11965: 479–494.
- Jameel J.Q., Mahdi T.N., Polshchikov K.A., Lazarev S.A., Likhosherstov R.V., Kiselev V.E. 2022. Development of a mathematical model of video monitoring based on a self-organizing network of unmanned aerial vehicles. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 10(6): 84–95.
- Khan I. U., Hassan M. A., Alshehri M. D. 2021. Monitoring System-Based Flying IoT in Public Health and Sports Using Ant-Enabled Energy-Aware Routing. *Journal of Healthcare Engineering*, 2021: 1686946.
- Kim D. Y., Lee J. W. 2018. Integrated Topology Management in Flying Ad Hoc Networks: Topology Construction and Adjustment. *IEEE Access*, 6: 61196–61211.
- Konstantinov I., Polshchikov K., Lazarev S., Polshchikova O. 2017. Mathematical Model of Message Delivery in a Mobile Ad Hoc Network. *Proceedings of the 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*: 10–13.
- Konstantinov I., Polshchikov K., Lazarev S., Polshchikova O. 2017. Model of Neuro-Fuzzy Prediction of Confirmation Timeout in a Mobile Ad Hoc Network. *CEUR Workshop Proceedings. Mathematical and Information Technologies*, 1839: 174–186.
- Konstantinov I., Polshchikov K., Lazarev S., Polshchikova O. 2016. The Usage of the Mobile Ad-Hoc Networks in the Construction Industry. *Proceedings of the 10th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*: 455–457.
- Lee S. W., Hosseinzadeh M., Ali S. 2021. An Energy-Aware and Predictive Fuzzy Logic-Based Routing Scheme in Flying Ad Hoc Networks (FANETs). *IEEE Access*, 9: 129977–130005.
- Mahdi T.N., Jameel J.Q., Polshchikov K.A., Lazarev S.A., Polshchikov I.K., Kiselev V.E. 2021. Clusters partition algorithm for a self-organizing map for detecting resource-intensive database inquiries in a geocological monitoring system. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 9(4): 1138-1145.
- Noor F., Al-Zahrani A., Khan M. A. 2020. A review on communications perspective of flying AD-HOC networks: Key enabling wireless technologies, applications, challenges and open research topics. *Drones*, 4(4): 1–14.
- Pandey A., Shukla P.K., Agrawal R. 2020. An adaptive Flying Ad-hoc Network (FANET) for disaster response operations to improve quality of service (QoS). *Modern Physics Letters*, 34(10): 2050010.
- Polshchikov K., Lazarev S., Zdorovtsov A. 2017. Multimedia Messages Transmission Modeling in a Mobile Ad Hoc Network. *Proceedings of the 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*: 24–27.
- Polshchikov K., Shabeeb A.H.T., Lazarev S. 2020. Algorithm for receiving the recommended bandwidth of a wireless self-organizing network channel. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 8(3): 1873–1879.
- Polshchikov K., Shabeeb A. H. T., Lazarev S., Kiselev V. 2021. Justification for the decision on loading channels of the network of geocological monitoring of resources of the agroindustrial complex. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 9(3): 781–787.
- Rezwan S., Choi W. 2021. A survey on applications of reinforcement learning in flying Ad-hoc networks. *Electronics*, 10(4): 1–19.
- Souza J., Jailton J., Carvalho T. 2020. QoS and QoE aware routing protocol for flying ad-hoc surveillance networks using fuzzy inference systems. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 19(1): 11–25.
- Srivastava A., Prakash J. 2021. Future FANET with application and enabling techniques: Anatomization and sustainability issues. *Computer Science Review*, 39: 100359.
- Wheeb A. H. 2022. Flying Ad hoc Networks (FANET): Performance Evaluation of Topology Based Routing Protocols. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 16(4): 137–149.



Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 12.02.2024

Received February 12, 2024

Поступила после рецензирования 03.03.2024

Revised March 03, 2024

Принята к публикации 04.03.2024

Accepted March 04, 2024

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лихошерстов Родион Валерьевич, соискатель кафедры прикладной информатики и информационных технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Rodion V. Likhosherstov, degree seeking applicant of the Department of Applied Informatics and Information Technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Польщиков Константин Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Konstantin A. Polshchykov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Information and Robotic Systems of the Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Лазарев Сергей Александрович, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Sergey A. Lazarev, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Department of Information and Robotic Systems of the Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia