

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFOCOMMUNICATION TECHNOLOGIES

УДК 621.391

DOI 10.52575/2687-0932-2022-49-2-403-415

Модель передачи видеопотоков в летающей беспроводной самоорганизующейся сети

¹⁾ Джамил К.Дж.К., ²⁾ Лихошерстов Р.В., ²⁾ Польщиков К.А.

¹⁾ Университет Мустансирия, Ирак, 10001, г. Багдад, ул. Аль-Кадисия

²⁾ Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

E-mail: jalalalqaisy1@gmail.com, oaqwater@yandex.ru, polshchikov@bsu.edu.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования по разработке математической модели передачи видеопотоков в беспроводных каналах в условиях высокой подвижности узлов. Обоснована актуальность совершенствования моделей и алгоритмов, ориентированных на обеспечение видеосвязи на основе применения летающей беспроводной самоорганизующейся сети. Предложено использовать резервирование канальной производительности в целях повышения загрузки беспроводных каналов. Аргументирована необходимость учета высокой вероятности потерь пакетов в самоорганизующейся сети и специфики условий передачи видеоинформации, снимаемой камерами беспилотных летающих аппаратов. Получены аналитические выражения для вычисления значений битовой скорости передачи данных по беспроводным каналам, рекомендуемых для минимизации отказов в трансляции видеопотоков. Показано, что модель дает возможность вычислить рекомендуемые значения мощности передачи сигналов узлами сети, установка которых на передающих модулях способствует снижению потерь пакетов. Сделан вывод о том, что применение модели позволяет обеспечить требуемое качество видеотрансляции в летающей беспроводной самоорганизующейся сети, используемой для осуществления мониторинга территорий при проведении поисково-спасательных мероприятий.

Ключевые слова: летающая беспроводная самоорганизующаяся сеть, модель передачи видеопотоков, обеспечение качества видеотрансляции, потери пакетов, битовая скорость, мониторинг территорий

Для цитирования: Джамил К.Дж.К., Лихошерстов Р.В., Польщиков К.А. 2022. Модель передачи видеопотоков в летающей беспроводной самоорганизующейся сети. Экономика. Информатика, 49(2): 403–415. DOI 10.52575/2687-0932-2022-49-2-403-415

Model of Video Streams Transmission in a Flying Ad Hoc Network

¹⁾ Karwi J. Q. Jameel, ²⁾ Rodion V. Likhosherstov, ²⁾ Konstantin A. Polshchikov

¹⁾ Mustansiriyah University, AL-Qadisiya St, Baghdad, 10001, Iraq

²⁾ Belgorod National Research University, 85 Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia

E-mail: jalalalqaisy1@gmail.com, oaqwater@yandex.ru, polshchikov@bsu.edu.ru

Abstract. The results of a study on the development of a mathematical model for the transmission of video streams in wireless channels under conditions of high node mobility are presented. The relevance of improving models and algorithms focused on providing video communication based on the use of a flying wireless self-organizing network is substantiated. It is proposed to use redundancy of channel performance in order to increase the load of wireless channels. The necessity of taking into account the high probability of packet loss in a self-organizing network and the specifics of the conditions for the transmission of video information captured by cameras of unmanned aerial vehicles is argued. Analytical expressions are obtained



for calculating the values of the bit rate of data transmission over wireless channels, recommended for minimizing failures in broadcasting video streams. It is shown that the model makes it possible to calculate the recommended values of signal transmission power by network nodes, the installation of which on the transmitting modules helps to reduce packet losses. It is concluded that the application of the model makes it possible to provide the required quality of video broadcasting in a flying wireless self-organizing network used to monitor territories during search and rescue operations.

Keywords: flying ad hoc network, video stream transmission model, video broadcast quality assurance, packet loss, bit rate, territory monitoring

For citation: Jameel K.J.Q., Likhosherstov R.V., Polshchikov K.A. 2022. Model of Video Streams Transmission in a Flying Ad Hoc Network. Economics. Information technologies, 49(2): 403–415 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2022-49-2-403-415

Введение

Перспективным научно-техническим направлением является обеспечение передачи информации на основе летающих беспроводных самоорганизующихся сетей (Flying Ad hoc NETwork, FANET). Функционирование FANET базируется на применении беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), на которых устанавливаются аппаратно-программные средства узлов сети. Благодаря тому, что каждый узел может выполнять функции приемопередающего ретранслятора и маршрутизатора пакетов, такая децентрализованная сеть позволяет передавать потоки данных в условиях случайной топологии, быстро изменяющейся в трехмерном пространстве. Указанная специфика дает возможность применения FANET для решения широкого круга задач, связанных с воздушным фото- и видеонаблюдением значительных территорий и труднодоступных районов, передачей исследовательской информации о результатах измерений различных параметров (уровня загрязнения воздуха, температуры, влажности и др.), обеспечения связи в условиях чрезвычайных ситуаций и боевых действий, доставки товаров [Kaivonen, Ngai, 2019; Pandey et al., 2019; Khan, Aziz, Cheema, 2020; Rohi, Ofualagba, 2020]. Беспроводные самоорганизующиеся сети на основе БПЛА могут быть использованы для обеспечения геоэкологического мониторинга ресурсов агропромышленного комплекса, обнаружения лесных пожаров, инспектирования воздушных линий электропередач и диагностики состояния электрооборудования электрических сетей [De Rango, Potrino, Tropea, 2019; Polshchikov et al., 2021].

Сети FANET особенно востребованы для обеспечения передачи информации в процессе поисково-спасательных мероприятий, проводимых в условиях отсутствия или поражения традиционной телекоммуникационной аппаратуры. Применение сети БПЛА в таких ситуациях позволяет организовать видеомониторинг протяженных территорий для поиска нуждающихся в спасении людей, пострадавших вследствие деструктивных воздействий природного, техногенного и военного характера. Для этого необходимо обеспечить трансляцию видеопотоков, снимаемых камерами летающих узлов, на диспетчерский центр спасательного подразделения.

Проблемным вопросом применения FANET является снижение качества видеосвязи, обусловленное высокой динамичностью топологии сети по причине скоростного перемещения ее узлов. Частые изменения структуры сети и расстояний между узлами приводят, во-первых, к случайно возникающему дефициту производительности беспроводных каналов вследствие быстрого изменения их загрузки из-за вынужденного активного перераспределения маршрутов передачи видеопотоков, и во-вторых, к увеличению потерь пакетов из-за битовых искажений.

Известны различные методы и алгоритмы, ориентированные на повышение качества связи в беспроводных самоорганизующихся сетях. В целях увеличения производительности беспроводных каналов на физическом уровне получены результаты моделирования распространения радиоволн [Abualhaol, Matalgah, 2006], многоканальной ретрансляции [Abualhaol, Matalgah, 2011], исследованы конструкции антенн [Kung et al., 2010; Ahmed, Kanhere, Jha, 2011]. Представлены технические решения на уровне управления доступом к беспроводным

каналам, разработаны алгоритмы балансировки FANET-каналов с применением аппарата сетей радиально-базисных функций [Samil, Pker, 2015]. Многие работы посвящены анализу эффективности применения процедур маршрутизации в ad-hoc-сетях и разработке алгоритмов сетевого уровня, адаптированных к условиям функционирования FANET [Alshabtat et al., 2010; Khan et al., 2020; Albu-Salih, Khudhair, 2021; Pignaton De Freitas, Kunst, 2021]. Разработаны протоколы транспортного уровня в рамках архитектуры для обмена сообщениями между беспилотными системами JAUS (Joint Architecture for Unmanned Systems) [Vasilyev et al., 2020]. Создана модель передачи потоковых данных в беспроводных сетях с восстановлением потерянных фрагментов средствами прикладного уровня на основе автоматического запроса повторной передачи [Абилов и др., 2020].

Ряд работ посвящен разработке моделей и алгоритмов, направленных на обеспечение эффективной аудиосвязи в беспроводной самоорганизующейся сети [Konstantinov et al., 2017; Polshchykov, Lazarev, Zdorovtsov, 2017; Polshchykov, Lazarev, Kiseleva, 2018; Polshchykov, Shabeeb, Lazarev, 2020]. В них предложено использовать резервирование канальной производительности в целях повышения загрузки беспроводных каналов и улучшения качества передачи голосовых потоков. Эти разработки, как показал анализ, необходимо усовершенствовать в части учета высокой вероятности потерь пакетов в FANET и специфики условий передачи видеоинформации, снимаемой камерами БПЛА. Представленные выше аргументы определяют актуальность выполнения исследований по моделированию процесса передачи видеопотоков в FANET для обеспечения требуемого качества видеотрансляции, используемой для осуществления мониторинга территорий при проведении поисково-спасательных мероприятий.

Цель статьи – обеспечение требуемого качества видеотрансляции, осуществляемой с помощью применения летающей самоорганизующейся сети, на основе разработки модели передачи видеопотоков в беспроводных каналах в условиях высокой подвижности узлов.

Разработка модели процесса передачи видеопотоков в FANET

Качество передачи потоков видеоинформации по сети может быть обеспечено при условии минимизации значений следующих параметров: задержек пакетов, джиттера, потерь пакетов. Обеспечить приемлемые значения пакетных задержек и джиттера позволяет резервирование производительности каналов для передачи конкретных видеопотоков. При этом из-за возможных перегрузок на отдельных участках ad-hoc-сети часть запросов на передачу видеопотоков может быть буферизована, а каким-то видеопотокам будет отказано в передаче, когда в буфере для очереди запросов не останется свободных мест. Кроме того, возможны случаи низкого качества передачи потоков видеоинформации из-за недопустимого уровня потерь пакетов, приводящего к утрате транслируемых видеофрагментов. Отказы в передаче видеопотоков, а также случаи передачи видеопотоков с низким качеством по каналам FANET снижают результирующее качество видеотрансляции. В исследовании предлагается использовать показатель p_c – вероятность обеспечения требуемого качества передачи видеопотоков по каналу FANET.

Пусть в течение заданного интервала времени T поступило α запросов на передачу видеопотоков по каналу FANET. Тогда будем считать, что требуемое качество передачи видеопотоков по каналу обеспечено, если сумма числа отказов в передаче видеопотоков и числа переданных с низким качеством видеопотоков не превышает β . Добиться обеспечения требуемого качества передачи видеопотоков можно в тех случаях, если в канале битовая скорость будет иметь значения, позволяющие минимизировать отказы в передаче видеопотоков, а мощность передачи сигналов будет настолько высокой, что потери пакетов станут незначительными и существенно не снизят качество передачи видеопотоков. При этом следует учитывать нецелесообразность чрезмерного повышения мощности передающих модулей ввиду необходимости экономии энергетических ресурсов узлов FANET, оснащенных автономными аккумуляторными батареями электропитания.

Для получения зависимости вероятности обеспечения требуемого качества видеотрансляции от значений канальной битовой скорости необходимо разработать соответствующую математическую модель.

Процесс передачи видеопотоков по каналу FANET при $\alpha = 4$ и $\beta = 1$ представлен в виде вероятностного графа на рисунке 1.

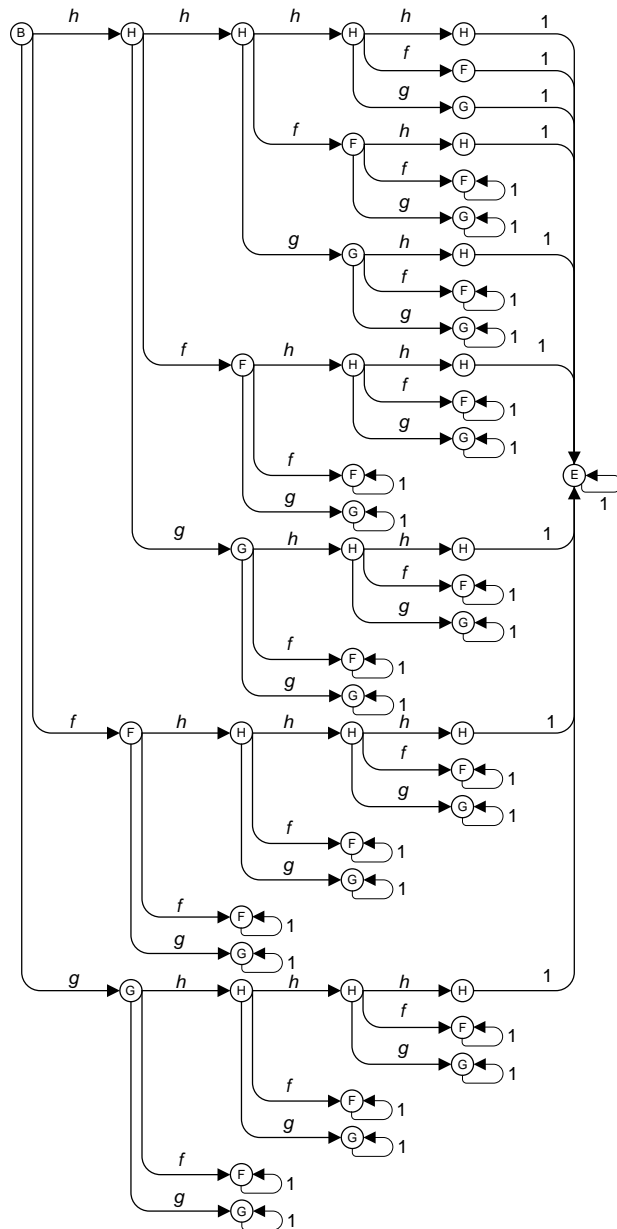


Рис. 1. Вероятностный граф процесса передачи видеопотоков по каналу FANET
 Fig. 1. Probabilistic graph of the process of transmitting video streams over the FANET channel

Моделируемый процесс описывается набором состояний, которым соответствуют следующие вершины графа: «В» – начало процесса видеотрансляции по каналу; «Н» – видеопоток передан с высоким качеством по каналу; «F» – отказ в передаче видеопотока по каналу; «G» – видеопоток передан с низким качеством по каналу; «E» – обеспечено требуемое качество видеотрансляции по каналу. Переход в любую вершину «Н» осуществляется с вероятностью h . Величина h является вероятностью передачи по каналу видеопотока с высоким качеством. Переход в любую вершину «F» происходит, если получен отказ в передаче видеопотока по причине отсутствия свободных мест в канальном буфере для очереди запро-

сов. Вероятность такого перехода равна f . Величина f именуется вероятностью отказа в передаче видеопотока по каналу. Переход в любую вершину «G» моделирует случай передачи видеопотока с низким качеством, возникающий по причине недопустимо высоких потерь пакетов. Данный переход характеризуется величиной g – вероятностью передачи по каналу видеопотока с низким качеством. Наконец, вершина «T» является терминальной для тех путей графа, в которых сумма вершин «F» и «G» не превышает β . Перебор возможных путей графа, соединяющих вершину «B» с вершиной «T», позволил получить выражение для вычисления вероятности обеспечения требуемого качества видеотрансляции по каналу:

$$p_c = h^4 + 4h^3f + 4h^3g. \quad (1)$$

Аналогично получены выражения для вычисления величины p_c при других различных значениях величин α и β . Эти выражения представлены в таблице 1.

Таблица 1
 Table 1

Выражения для вычисления показателя p_c
 Expressions for calculating the indicator p_c

Значения α	Значения β	Значения p_c
1	0	h
1	1	$h + f + g$
2	0	h^2
2	1	$h + 2h(f + g)$
2	2	$h^2 + 2h(f + g) + (f + g)^2$
3	0	h^3
3	1	$h^3 + 3h^2(f + g)$
3	2	$h^3 + 3h^2(f + g) + 3h(f + g)^2$
3	3	$h^3 + 3h^2(f + g) + 3h(f + g)^2 + (f + g)^3$
4	0	h^4
4	1	$h^4 + 4h^3(f + g)$
4	2	$h^4 + 4h^3(f + g) + 6h^2(f + g)^2$
4	3	$h^4 + 4h^3(f + g) + 6h^2(f + g)^2 + 4h(f + g)^3$
5	0	h^5
5	1	$h^5 + 5h^4(f + g)$
5	2	$h^5 + 5h^4(f + g) + 10h^3(f + g)^2$
5	3	$h^5 + 5h^4(f + g) + 10h^3(f + g)^2 + 10h^2(f + g)^3$
6	0	h^6
6	1	$h^6 + 6h^5(f + g)$
6	2	$h^6 + 6h^5(f + g) + 15h^4(f + g)^2$
6	3	$h^6 + 6h^5(f + g) + 15h^4(f + g)^2 + 20h^3(f + g)^3$



На основе анализа выражений, представленных в таблице 1, получена формула для вычисления величины p_c в следующем виде:

$$p_c = \sum_{x=0}^{\beta} k_{\alpha,x} h^{\alpha-x} (f + g)^x. \quad (2)$$

Значения коэффициентов $k_{\alpha,x}$ в систематизированном виде представлены в таблице 2.

Таблица 2
Table 2

Значения коэффициентов $k_{\alpha,x}$
The values of the coefficients $k_{\alpha,x}$

α	x			
	0	1	2	3
1	1	1	-	-
2	1	2	1	-
3	1	3	3	1
4	1	4	6	4
5	1	5	10	10
6	1	6	15	20

Анализ содержимого таблицы 2 показывает, что она представляет собой фрагмент таблицы биномиальных коэффициентов. Этот факт позволяет получить следующее равенство:

$$k_{\alpha,x} = C_{\alpha}^x = \frac{\alpha!}{x!(\alpha-x)!}. \quad (3)$$

С учетом выражения (3) формулу для вычисления вероятности обеспечения требуемого качества передачи видеопотоков по каналу можно записать в следующем виде:

$$p_c = \sum_{x=0}^{\beta} \frac{\alpha!}{x!(\alpha-x)!} h^{\alpha-x} (f + g)^x. \quad (4)$$

Логично утверждать, что требуемое качество видеотрансляции по сети будет обеспечено, если будет обеспечено требуемое качество передачи видеопотоков по каждому каналу сети. Тогда вероятность обеспечения требуемого качества видеотрансляции по сети может быть вычислена по формуле:

$$p_N = \left[\sum_{x=0}^{\beta} \frac{\alpha!}{x!(\alpha-x)!} h^{\alpha-x} (f + g)^x \right]^K, \quad (5)$$

где K – среднее число каналов, используемых для передачи по сети одного видеопотока.

Величину f можно вычислить как вероятность отказа в обслуживании запроса в многоканальной системе с ограниченной длиной очереди [Vocharov et al., 2004]:

$$f = \frac{\frac{(\lambda\tau)^n}{n!} \left(\frac{\lambda\tau}{n}\right)^m}{\frac{(\lambda\tau)^n}{n!} \sum_{u=1}^m \left(\frac{\lambda\tau}{n}\right)^u + \sum_{x=0}^n \frac{(\lambda\tau)^x}{x!}}, \quad (6)$$

где n – число видеопотоков, которые можно одновременно передавать с высоким качеством по каналу; m – объем буфера для очереди запросов на передачу видеопотоков по каналу; λ – интенсивность поступления запросов на передачу видеопотоков по каналу; τ – средняя длительность передачи видеопотока по каналу. Выражение (6) справедливо при выполнении условия $n > \lambda\tau$.

Значение числа видеопотоков, которое можно одновременно передавать с высоким качеством по каналу, вычисляется с помощью выражения:

$$n = \frac{R}{r}, \quad (7)$$

где R – битовая скорость передачи данных по каналу, бит/с; r – производительность канала, используемая для передачи с высоким качеством одного видеопотока, бит/с.

Для вычисления вероятности передачи по каналу видеопотока с низким качеством можно использовать следующее выражение [Polshchikov et al., 2019]:

$$g = 1 - \left[(1-v)^\omega + \sum_{a=1}^b y_{\omega,a} (1-v)^{\omega-a} v^a \right], \quad (8)$$

где ω – число пакетов в передаваемом по каналу видеопотоке; v – вероятность потери пакета в процессе передачи по каналу; b – наибольшее число потерянных пакетов, при котором возможна передача видеопотока с высоким качеством.

Величину b можно вычислить по формуле:

$$b = \left\lceil \frac{\omega - 2\gamma}{\gamma + 1} \right\rceil. \quad (9)$$

Коэффициенты $y_{\omega,a}$ могут быть вычислены при $\omega > 2\gamma$ по формуле:

$$y_{\omega,a} = \begin{cases} \omega - 2\gamma, & a = 1; \\ 0, & a > 1 \text{ и } \omega \leq 3\gamma + 1; \\ \sum_{i=2\gamma+1}^{\omega-a-1} y_{i,a-1}, & a > 1 \text{ и } \omega > 3\gamma + 1. \end{cases} \quad (10)$$

Выражения (8)–(10) учитывают возможность восстановления потерянных пакетов на приемном узле с помощью выполнения процедур аппроксимации. При этом, чтобы на приемном узле восстановить потерю пакета, нужно получить не менее γ предыдущих и не менее γ последующих пакетов.

Вероятность потери пакета в процессе передачи по каналу можно вычислить с помощью выражения [Prabhu, Daneshrad, 2010; Кайсина и др., 2019]:

$$v = 1 - (1 - BER)^S, \quad (11)$$

где BER – вероятность искажения символа при передаче по каналу; S – число бит в одном пакете.

Вероятность искажения символа при передаче по каналу можно вычислить с использованием Q-функции по формуле [Istikmal, Kurniawan, Hendrawan, 2017]:

$$BER = Q \left(\sqrt{2 \frac{E_b}{N_0}} \right), \quad (12)$$

где E_b – энергия сигнала, приходящаяся на 1 бит принимаемого сообщения; N_0 – энергетическая спектральная плотность шума.

Отношение $\frac{E_b}{N_0}$ можно найти с помощью выражения [Кайсина и др., 2019]:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{SNR \cdot W}{R}, \quad (13)$$

где SNR – отношение сигнал/шум в канале; W – ширина полосы пропускания канала, Гц.



Для вычисления отношения сигнал/шум можно воспользоваться формулой [Istikmal, Kurniawan, Hendrawan, 2017]:

$$SNR = \frac{P_R}{k \cdot T_R \cdot W \cdot N_F}, \quad (14)$$

где P_R – мощность принимаемого сигнала, Вт; $k = 1,38 \times 10^{-23}$ – постоянная Больцмана, Вт·с·К⁻¹; T_R – температура, К; N_F – коэффициент шума.

Значение мощности принимаемого сигнала в дБм вычисляется с помощью выражения [Shaw, 2013; Frid, Holter, Jonsson, 2015]:

$$P_R = P_T + 10 \lg \left(\left(\frac{c}{\nu} \right)^2 / (4\pi d)^2 L_S \right), \quad (15)$$

где P_T – мощность передачи сигнала, дБм; $c = 3 \times 10^8$ – скорость распространения сигнала, м/с; ν – частота сигнала, Гц; d – среднее расстояние между передающими и приемными узлами, м; L_S – системные потери.

Величину h можно вычислить по условию нормировки полной вероятности:

$$h = 1 - (f + g). \quad (16)$$

Проведение вычислительных экспериментов

С использованием выражений (5)–(16), полученных в процессе разработки модели, проведена серия вычислительных экспериментов. Исходные данные для вычислений представлены в таблице 3.

Таблица 3
Table 3

Исходные данные
Initial data

№ п/п	Величина	Значение	Единица измерения
1.	T_R	290	К
2.	N_F	5	-
3.	W	40	МГц
4.	L_S	1,08	-
5.	ν	5,18	ГГц
6.	S	10^4	-
7.	ω	18×10^4	-
8.	γ	8	-
9.	K	6	-
10.	λ	10	час ⁻¹
11.	τ	0,5	час
12.	α	10	-
13.	β	2	-
14.	T	1	час
15.	r	1	Мбит/с

Представленные в таблице 4 результаты выполненных вычислений показывают, что при фиксированной мощности передачи сигнала $P_T = 15$ дБм и среднем расстоянии $d = 480$ м

между передающими и приемными узлами вероятность обеспечения требуемого качества FANET-видеотрансляции превышает уровень 0,95, если битовая скорость передачи данных равна 8 Мбит/с. Увеличение среднего расстояния d даже на незначительную величину (10–20 м) приводит к тому, что при этой же мощности P_T не удастся подобрать значения R , позволяющие добиться уровня p_N не ниже 0,95.

Таблица 4
Table 4

Значения показателя p_N , вычисленные при $P_T = 15$ дБм
Values p_N calculated at $P_T = 15$ dBm

d , м	R , Мбит/с					
	4	5	6	7	8	9
480	0,004	0,155	0,624	0,919	0,982	0,012
490	0,004	0,155	0,624	0,919	0,930	$1,253 \times 10^{-12}$
500	0,004	0,155	0,624	0,917	0,521	$9,850 \times 10^{-44}$

Для повышения вероятности обеспечения требуемого качества видеотрансляции до уровня $p_N = 0,95$ имеется возможность увеличить мощность передачи сигнала. Проведены вычислительные эксперименты по исследованию зависимости величины p_N от значений P_T для различных вариантов среднего расстояния между передающими и приемными узлами. Результаты вычислений в виде графиков зависимости $p_N(P_T)$ при $R = 8$ Мбит/с показаны на рисунке 2. Анализ представленных результатов показывает, что для различных значений d можно выбрать такие значения мощности передачи сигнала, при которых вероятности обеспечения требуемого качества видеотрансляции достигают уровня 0,95. Так, например, если среднее расстояние между передающими и приемными узлами в FANET составляет 500 м, то при битовой скорости передачи 8 Мбит/с для достижения значения вероятности $p_N = 0,95$ необходимо мощность P_T установить на уровне 15,2 дБм.

При этом важно отметить, что при $P_T = 15,2$ дБм вычисления по формуле Шеннона

$$R = W \log_2(1 + SNR) \quad (17)$$

показывают теоретическую возможность обеспечить битовую скорость передачи данных 83,56 Мбит/с, что более чем в 10 раз превышает значение R , достаточное для получения $p_N = 0,95$.

В результате исследования удалось вычислить значения мощности P_T , которые рекомендуется установить на выходе передающих модулей узлов FANET для получения вероятности обеспечения требуемого качества видеотрансляции равной 0,95 в зависимости от среднего расстояния между передающими и приемными узлами (см. таблицу 5).

Заключение

Таким образом, в статье представлены результаты исследования по разработке математической модели передачи видеопотоков в беспроводных каналах в условиях высокой подвижности узлов. Применение модели позволяет обеспечить требуемое качество видеотрансляции в летающей беспроводной самоорганизующейся сети, используемой для осуществления мониторинга территорий при проведении поисково-спасательных мероприятий.

Проведенный анализ показал, что качество FANET-видеотрансляции снижают, во-первых, отказы в передаче видеопотоков, возникающие вследствие дефицита канальной производительности, и во-вторых, случаи низкого качества передачи видеопотоков,

обусловленного недопустимо большими потерями пакетов, приводящими к утрате транслируемых видеофрагментов.

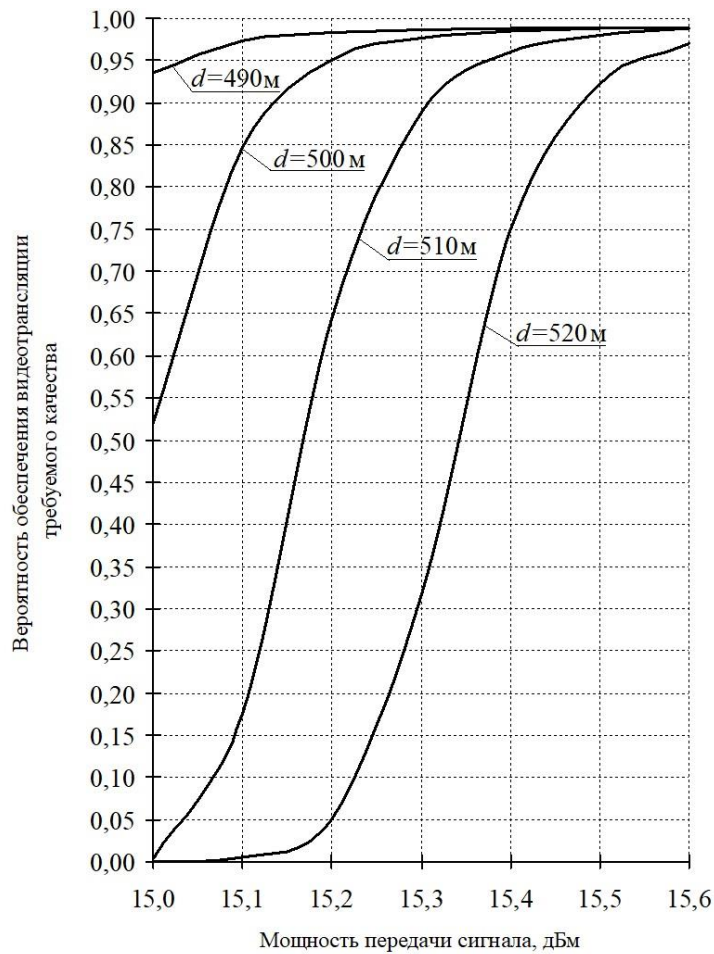


Рис. 2. Графики зависимости $p_N(P_T)$ при $R = 8$ Мбит/с

Fig. 2. Graphs of dependence $p_N(P_T)$ at $R = 8$ Mbps

Таблица 5
Table 5

Рекомендуемые значения P_T , при которых достигается $p_N = 0,95$

Recommended P_T values, at which $p_N = 0,95$

d , м	P_T , дБм
500	15,20
550	16,03
600	16,79
650	17,48
700	18,13
750	18,73
800	19,29

Разработанная модель дает возможность вычислить значения битовой скорости передачи данных по каналам FANET, рекомендуемые для минимизации отказов в трансляции видеопотоков. Кроме того, модель позволяет вычислить рекомендуемые

значения мощности передачи сигналов узлами сети, установка которых на передающих модулях способствует снижению потерь пакетов и, в конечном итоге, обеспечению на требуемом уровне качества видеотрансляции по сети.

Предметом дальнейшей работы в рамках темы исследования станет создание алгоритмического и программного обеспечения для применения модели, предложенной в статье.

Список литературы

- Абилов А.В., Чунаев А.В., Нистюк А.И., Кайсина И.А. 2020. Модель передачи данных с восстановлением потерянных фрагментов на основе ARQ прикладного уровня. Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 3(4): 85–94.
- Кайсина И.А., Васильев Д.С., Абилов А.В., Мейтис Д.С., Кайсин А.Е., Нистюк А.И. 2019. Сравнительный анализ эффективности ретрансляции потоковых данных в летающей сети. Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 22(1): 108–115.
- Abualhaol I.Y., Matalgah M.M. 2006. Outage probability analysis in a cooperative UAVs network over nakagami-m fading channels. IEEE Conference on Vehicular Technology, 1–4.
- Abualhaol I.Y., Matalgah M.M. 2011. Performance analysis of cooperative multi-carrier relay-based UAV networks over generalized fading channels. International Journal of Communication Systems, 24(8): 1049–1064.
- Ahmed N., Kanhere S., Jha S. 2011. Link characterization for aerial wireless sensor networks. Globecom Wi-UAV Workshop, 1274–1279.
- Albu-Salih A.T., Khudhair H.A. 2021. ASR-FANET: An adaptive SDN-based routing framework for FANET. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 11(5): 4403–4412.
- Alshabtat A.I., Dong L., Li J., Yang F. 2010. Low latency routing algorithm for unmanned aerial vehicles ad-hoc networks. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 6(1): 48–54.
- Bocharov P.P., D'Apice C., Pechinkin A.V., Salerno S. 2004. Queueing Theory. Utrecht – Boston, VSP, 445 p.
- Da Costa L.A., Pignaton De Freitas E., Kunst R. 2021. Q-FANET: Improved Q-learning based routing protocol for FANETs. Computer Networks, 198: 108379.
- De Rango F., Potrino G., Tropea M. 2019. Scalable and lighthway bio-inspired coordination protocol for FANET in precision agriculture applications. Computers & Electrical Engineering, 74: 305–318.
- Frid H., Holter H., Jonsson B.L.G. 2015. An Approximate Method for Calculating the Near-Field Mutual Coupling Between Line-of-Sight Antennas on Vehicles. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 63 (9): 4132–4138.
- Istikmal, Kurniawan A., Hendrawan. 2017. Selective Route Based on SNR with Cross-Layer Scheme in Wireless Ad Hoc Network. Journal of Computer Networks and Communications, 2017.
- Khan I. U., Aziz M. A., Cheema T. A. 2020. Smart IoT control-based nature inspired energy efficient routing protocol for Flying Ad Hoc Network (FANET). IEEE Access, 8: 56371–56378.
- 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.
- Kung H.T., Lin C.-K., Lin T.-H., Tarsa S.J., Vlah D. 2010. Measuring diversity on a low-altitude UAV in a ground-to-air wireless 802.11 mesh network. IEEE Globecom Workshops, 1799–1804.
- Pandey A., Shukla P.K., Agrawal R., Khare A. 2019. Grasshopper optimization based clustering algorithm (GOCA) for adaptive flying ad-hoc network (FANET) to enhance the quality of service (QoS). International Journal of Scientific and Technology Research, 8(11): 3731–3736.
- 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.O., Lazarev S.A., Kiselev V.E., Kiseleva E.D. 2019. Model of real-time flow packet transmission in amobile ad hoc network. Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems, 11(8): 2861–2864.
- Polshchikov K.O., Lazarev S.A., Kiseleva E.D. 2018. Mathematical Model of Multimedia Information Exchange in Real Time Within a Mobile Ad Hoc Network. International Journal of Computer Science and Network Security, 18(6): 20–24.



- 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.
- Prabhu R.S., Daneshrad B. 2010. An energy-efficient water-filling algorithm for OFDM systems. *Communications (ICC)*. 2010 IEEE International Conference: 1–5.
- Rohi G., Ofualagba G. 2020. Autonomous monitoring, analysis, and countering of air pollution using environmental drones. *Heliyon*, 6(1): 1–10.
- Samil T., Ilker B. 2015. LODMAC: Location Oriented Directional MAC protocol for FANETs. *Computer Networks*, 83(4): 76–84.
- Shaw J.A. 2013. Radiometry and the Friis transmission equation. *American Journal of Physics*, 81(1): 33–37.

References

- Abilov A.V., Chunaev A.V., Nistyuk A.I., Kaisina I.A. 2020. Data Transmission Model with Lost Fragments Recovery Based on Application Layer ARQ. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 23(4): 85–94 (in Russian).
- Abualhaol I.Y., Matalgah M.M. 2006. Outage probability analysis in a cooperative UAVs network over nakagami-m fading channels. *IEEE Conference on Vehicular Technology*, 1–4.
- Abualhaol I.Y., Matalgah M.M. 2011. Performance analysis of cooperative multi-carrier relay-based UAV networks over generalized fading channels. *International Journal of Communication Systems*, 24(8): 1049–1064.
- Ahmed N., Kanhere S., Jha S. 2011. Link characterization for aerial wireless sensor networks. *Globecom Wi-UAV Workshop*, 1274–1279.
- Albu-Salih A.T., Khudhair H.A. 2021. ASR-FANET: An adaptive SDN-based routing framework for FANET. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 11(5): 4403–4412.
- Alshabtat A.I., Dong L., Li J., Yang F. 2010. Low latency routing algorithm for unmanned aerial vehicles ad-hoc networks. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 6(1): 48–54.
- Bocharov P.P., D'Apice C., Pechinkin A.V., Salerno S. 2004. *Queueing Theory*. Utrecht–Boston, VSP, 445 p.
- Da Costa L.A., Pignaton De Freitas E., Kunst R. 2021. Q-FANET: Improved Q-learning based routing protocol for FANETs. *Computer Networks*, 198: 108379.
- De Rango F., Potrino G., Tropea M. 2019. Scalable and lighthway bio-inspired coordination protocol for FANET in precision agriculture applications. *Computers & Electrical Engineering*, 74: 305–318.
- Frid H., Holter H., Jonsson B.L.G. 2015. An Approximate Method for Calculating the Near-Field Mutual Coupling Between Line-of-Sight Antennas on Vehicles. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63 (9): 4132–4138.
- Istikmal, Kurniawan A., Hendrawan. 2017. Selective Route Based on SNR with Cross-Layer Scheme in Wireless Ad Hoc Network. *Journal of Computer Networks and Communications*, 2017.
- Kaisina I.A., Vasil'ev D.S., Abilov A.V., Meitis D.S., Kaisin A.E., Nistyuk A.I. 2019. Comparative analysis of the effectiveness of streaming data retransmission in a flying network. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 22(1): 108–115 (in Russian).
- Khan I. U., Aziz M. A., Cheema T. A. 2020. Smart IoT control-based nature inspired energy efficient routing protocol for Flying Ad Hoc Network (FANET). *IEEE Access*, 8: 56371–56378.
- 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.
- Kung H.T., Lin C.-K., Lin T.-H., Tarsa S.J., Vlah D. 2010. Measuring diversity on a low-altitude UAV in a ground-to-air wireless 802.11 mesh network. *IEEE Globecom Workshops*, 1799–1804.
- Pandey A., Shukla P.K., Agrawal R., Khare A. 2019. Grasshopper optimization based clustering algorithm (GOCA) for adaptive flying ad-hoc network (FANET) to enhance the quality of service (QoS). *International Journal of Scientific and Technology Research*, 8(11): 3731–3736.
- 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.

- Polshchykov K.O., Lazarev S.A., Kiselev V.E., Kiseleva E.D. 2019. Model of real-time flow packet transmission in amobile ad hoc network. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 11(8): 2861–2864.
- Polshchykov K.O., Lazarev S.A., Kiseleva E.D. 2018. Mathematical Model of Multimedia Information Exchange in Real Time Within a Mobile Ad Hoc Network. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 18(6): 20–24.
- 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 geocological monitoring of resources of the agroindustrial complex. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 9(3): 781–787.
- Prabhu R.S., Daneshrad B. 2010. An energy-efficient water-filling algorithm for OFDM systems. *Communications (ICC)*. 2010 IEEE International Conference: 1–5.
- Rohi G., Ofualagba G. 2020. Autonomous monitoring, analysis, and countering of air pollution using environmental drones. *Heliyon*, 6(1): 1–10.
- Samil T., Ilker B. 2015. LODMAC: Location Oriented Directional MAC protocol for FANETs. *Computer Networks*, 83(4): 76–84.
- Shaw J.A. 2013. Radiometry and the Friis transmission equation. *American Journal of Physics*, 81(1): 33–37.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Джамил Карви Джалал Каис, магистр наук, преподаватель Университета Мустансирия, г. Багдад, Ирак

Karwi J. Q. Jameel, MSc, Assistant lecturer of the Mustansiriyah University, Baghdad, Iraq

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

Rodion V. Likhosherstov, Degree of the Department of Applied Informatics and Information Technologies, Belgorod State University, Belgorod, Russia

Польщиков Константин Александрович, доктор технических наук, доцент, директор института инженерных и цифровых технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Konstantin A. Polshchykov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Engineering and Digital Technologies of the Belgorod State University, Belgorod, Russia