

Научная статья

УДК 004.7+004.738.2: 004.738.5

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-1-7-17>

EDN:FTRJGU



Исследование задержки кадров видеопотока в канале информационного обмена наземного сегмента гибридной сети связи при FPV-управлении БАС

✉ Александр Александрович Березкин, berezkin.aa@sut.ru

✉ Роман Михайлович Вивчарь, vivchar.rm@sut.ru

✉ Александр Александрович Ченский, chenskii.aa@sut.ru

✉ Руслан Валентинович Киричек, kirichek@sut.ru

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация

В настоящем исследовании рассматриваются зависимости величины задержки и потери кадров видеопотока, сжатых нейросетевым кодеком, разработанным на основе нейросетевого вариационного автокодировщика, от размера передаваемых кадров при реализации каналов информационного обмена между беспилотной авиационной системой и станцией внешнего пилота в наземном сегменте гибридной орбитально-наземной сети связи с учетом расстояния между ними при использовании технологий передачи данных 3G и LTE.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью достижения заданного уровня качества обслуживания услуги управления беспилотными летательными аппаратами от первого лица в сетях связи.

Используемые методы. В ходе исследования натурным экспериментом измерены прикладные задержки передачи и потери кадров видеопотока FPV-управления при использовании нейросетевых кодеков. Прикладные задержки и потери учитывают сегментацию, восстановление пакетов и передачу нескольких UDP-пакетов для каждой полезной нагрузки. Дополнительно методом Розенблатта – Парзена восстановлены распределения плотности вероятности задержек.

Результаты. Получены оценки средних значений задержки передачи и потерь кадров видеопотока (сжатых нейросетевым кодеком) при использовании технологий передачи данных 3G и LTE с учетом различных расстояний между беспилотной системой и станцией внешнего пилота. Восстановлены распределения зависимостей задержек видеопотока от размера полезной нагрузки. Найден характер распределения задержки видеопотока, формируемого нейросетевым кодеком. **Новизна** полученных результатов заключается в исследовании характера задержек и потерь кадров видеопотока услуги FPV-управления, передаваемого через мобильные сети связи, на прикладном уровне модели OSI при использовании нейросетевых кодеков.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть применены при моделировании каналов информационного обмена для FPV-управления с целью формирования оптимальной конфигурации используемых нейросетевых кодеков.

Ключевые слова: задержка видеопотока, кадры видеопотока, каналы информационного обмена, беспилотное воздушное судно, беспилотная авиационная система, управление от первого лица, FPV-управление, нейросетевой кодек

Ссылка для цитирования: Березкин А.А., Вивчарь Р.М., Ченский А.А., Киричек Р.В. Исследование задержки кадров видеопотока в канале информационного обмена наземного сегмента гибридной сети связи при FPV-управлении БАС // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 1. С. 7–17. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-1-7-17. EDN:FTRJGU

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-1-7-17>

EDN:FTRJGU

Research of Video Stream Frame Delay in UAV FPV-Control Information Exchange Channel in Hybrid Communication Network Terrestrial Segment

✉ Alexander A. Berezkin, berezkin.aa@sut.ru

Roman M. Vivchar, vivchar.rm@sut.ru

Alexander A. Ченский, chenskii.aa@sut.ru

Ruslan V. Kirichek, kirichek@sut.ru

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Annotation

*This research considers the dependence of the delay and loss of video stream frames compressed by neural network codec developed on the basis of neural network variation auto-encoder on the size of transmitted frames in the realization of information exchange channels between unmanned aviation system and external pilot station in the ground segment of hybrid orbital-terrestrial communication network taking into account the distance between them when using 3G and LTE data transmission technologies are used. **The Relevance** of the research is conditioned by the necessity to achieve a given level of service quality for FPV control of UAVs in communication networks. **Methods used.** In this research, the applied transmission delays and frame loss of FPV control video stream when using neural network codecs are measured by in-situ experiment. The applied delays and losses take into account segmentation, packet recovery and transmission of multiple UDP packets for each payload. Additionally, the Rosenblatt-Parzen method reconstructs the probability density distributions of delay probabilities. **Results.** Estimates of average values of transmission delay and frame loss of video stream (compressed by neural network codec) when using 3G and LTE data transmission technologies taking into account different distances between the unmanned system and the external pilot's station are obtained. The distributions of video stream delay dependencies on the payload size are reconstructed. The character of video stream delay distribution formed by neural network codec is found. **The Novelty** of the obtained results lies in the study of the nature of delays and frame losses of the FPV-control service video stream transmitted through mobile communication networks at the application layer of the OSI model when using neural network codecs. **Practical significance.** The results can be used in modeling of information exchange channels for FPV control in order to form the optimal configuration of the used neural network codecs.*

Keywords: video stream latency, information link, channel of data exchange, channel of information exchange, unmanned aerial vehicle, unmanned aerial system, first person view control, FPV-control, neural codec

For citation: Berezkin A.A., Vivchar R.M., Chenskiy A.A., Kirichek R.V. Research of Video Stream Frame Delay in UAV FPV-Control Information Exchange Channel in Hybrid Communication Network Terrestrial Segment. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(1):7–17. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-1-7-17. EDN:FTRJGU

Введение

В настоящее время в различных сферах деятельности РФ нашли широкое применение беспилотные авиационные системы – БАС (статья 32 Воздушного кодекса РФ от 19.03.1997 № 60-ФЗ (ред. от 08.08.2024) «Воздушное судно»). БАС, например,

широко применяются в сельском хозяйстве, строительстве, нефтегазовом секторе, метеорологии, кинематографе, МЧС, экологическом мониторинге, а также в военном деле [1]. В сельском хозяйстве беспилотные воздушные суда (БВС) обеспечивают учет животных [2], распыление инсектицидов, обра-

ботку животных от гнуса и т. п., в сфере строительства – непрерывный контроль стройплощадок и геодезические исследования [1]. В нефтегазовом секторе с помощью БВС возможен мониторинг состояния нефте- и газопроводов и определение источников утечек. При чрезвычайных ситуациях БАС позволяют проводить оценку последствий стихийной или техногенной катастрофы, обнаружение выживших, доставку продуктов питания, воды и медикаментов. В экологии существует ряд применений БАС: отслеживание и тушение пожаров [3], борьба с браконьерами, контроль лесного фонда, отслеживание таяния ледников, измерения загрязнения воздуха [1, 2].

В зависимости от используемой системы управления БАС делятся на: дистанционно-пилотируемые, дистанционно-управляемые, автоматические, дистанционно-управляемые авиационной системой и беспилотно-автоматические [4].

В Стратегии развития отрасли связи РФ до 2035 г., утвержденной распоряжением Правительства РФ от 24 ноября 2023 г. № 3339-р, указывается, что создаваемые гибридные орбитально-наземные сети связи (ГОНСС) потенциально позволят обеспечить возможность управления беспилотными летательными аппаратами в режиме реального времени на всей территории Российской Федерации. Для управления БАС ГОНСС могут состоять из двух интегрированных сегментов: наземного и спутникового. В зоне покрытия мобильных сетей связи управление БАС обеспечивает наземный сегмент. В отдаленных районах, где отсутствует покрытие мобильными сетями связи, либо мобильные сети связи не удовлетворяют требованиям по качеству обслуживания, управление будет обеспечивать спутниковый сегмент.

В настоящее время широкое распространение получили дистанционно-пилотируемые БАС, на основе управления от первого лица (*от англ. First-Person-View*, далее – FPV-управление) [5]. Однако использование подобных систем в ГОНСС существенно затруднено из-за наличия больших сетевых задержек передачи данных, особенно в космическом сегменте такой сети.

Для задачи FPV-управления несвоевременная актуальность кадров видеопотока приводит к временной задержке между реальной полетной обстановкой и полетной обстановкой, воспринимаемой оператором. В результате оператор оказывается не способен реагировать на нештатные ситуации. Это снижает вероятность успешного достижения цели функционирования БАС. Низкая интенсивность видеопотока на стороне станции внешнего пилота (СВП) приводит к формированию у оператора фраг-

ментарной информации о полетной обстановке. Это влечет за собой возможность упущения ряда деталей, неверной оценки быстро меняющейся полетной обстановки и ограничения возможности реакции на нештатные ситуации. При этом существенное влияние на задержку и интенсивность FPV-видео-потока оказывает конфигурация используемых инструментов кодирования и декодирования видеопотока.

В настоящее время в составе систем кодирования видеопотока БАС, кроме широко используемых стандартизированных кодеков, работающих в пиксельном пространстве таких, как AVC/H264 [6] и HEVC/H265 [7], разрабатываются различные конфигурации нейросетевых кодеков, созданных на основе вариационных автокодировщиков различной конфигурации¹ [8, 9]. Они обеспечивают более высокую степень сжатия кадров видеопотока путем преобразования пиксельного пространства во внутреннее латентное пространство признаков нейросетевой модели. Однако такие видеопотоки специализированной структуры предусматривают использование специально разработанных каналов информационного обмена (КИО) для взаимодействия между БВС и СВП, входящих в состав БАС как в наземном, так и в космическом сегментах ГОНСС. Такие каналы предназначены для передачи видеопотока с камеры БВС и телеметрической информации (координат, скорости, курсового угла, высоты и т. д.) в направлении СВП, а также команд управления в обратном направлении.

Эффективность функционирования КИО непосредственным образом влияет на качество FPV-управления БАС и характеризуется задержкой между кадром полетной обстановки на стороне БВС и отображением данного кадра на терминале внешнего пилота, а также интенсивностью видеопотока. Задержка в КИО $t_{кио}$ является задержкой прикладного уровня, так как учитывает передачу не только отдельного пакета, но и сегментацию полезной нагрузки на множество пакетов, которая выполняется на прикладном уровне.

Следовательно, становится актуальной задача выбора такой конфигурации нейросетевых кодеков, которая позволит повысить показатели эффективности функционирования КИО и тем самым обеспечить требуемое качество решения целевых задач БВС на FPV-управлении. Для решения такой задачи необходимо установить зависимость показателей эффективности функционирования КИО от используемой конфигурации нейросетевых кодеков. Зависимость может быть установлена путем имитационного моделирования процесса функционирования КИО. Однако при разработке такой модели необходимо учитывать зависимость величины прикладной задержки кадров видеопотока в

¹ Stable Diffusion // GitHub. URL: <https://github.com/pesser/stable-diffusion> (дата обращения 25.01.2025)

сети, а, следовательно, и показателей эффективности функционирования КИО, от размера полезной нагрузки (кадров видеопотока).

Целью настоящей работы является определение характеристик прикладной задержки передачи кадров FPV-видеопотока, сжатых нейросетевым кодеком [10, 11], от расстояния между БАС и оператором, и используемой технологии передачи данных (3G, LTE). Полученные результаты в дальнейшем позволят сформировать требования к используемым нейросетевым кодекам для FPV-управления БАС в наземном сегменте ГОНСС.

Описание эксперимента

Для исследования влияния размера кадров FPV-видеопотока, сжатых нейросетевым кодеком, на величину задержки их передачи в КИО наземного сегмента ГОНСС, был проведен эксперимент, заключающийся в передаче кадров различного размера между рядом регионов России и Санкт-Петербургом с использованием технологий 3G и LTE мобильных сетей связи. При этом точка, находящаяся в Санкт-Петербурге, выполняла роль СВП, а клиент, расположенный в других городах, – роль БВС.

Данные были получены из следующих городов Российской Федерации, где в скобках указано расстояние от БВС до СВП по прямой: Петергоф (23 км), Великий Новгород (166 км), Череповец (438 км), Москва (635 км), Архангельск (735 км), Апатиты (860 км), Оленегорск (930 км), Сочи (1926 км), Южно-Сахалинск (6660 км). Для передачи данных были использованы технологии мобильной связи 3-го поколения (3G) и беспроводной высокоскоростной связи (LTE). В качестве исследуемых потенциальных вариантов размеров полезной нагрузки (18 шт.) использовались следующие размеры: 100, 300, 500, 700, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 7000, 10000, 15000, 20000, 30000, 50000, 70000, 100000 и 500000 байт.

Задержка в КИО $t_{кио}$ (мс) включает в себя сетевую задержку t_c , задержку инкапсуляции t_{enc} и декапсуляции t_{dec} пакетов и может быть рассчитана по следующей формуле:

$$t_{кио} = t_c + t_{enc} + t_{dec}.$$

При использовании в Интернете максимальной единицы передачи (MTU, аббр. от англ. Maximum Transmission Unit) сеть Ethernet на промежуточных узлах сети ограничена размером 1500 байт [12]. Средний размер бинарных сжатых последовательностей кадров видеопотока ряда конфигураций нейросетевого кодека [10, 11] превышает размер MTU. Соответственно, возникает необходимость в сегментации полезной нагрузки на уровне приложения FPV-управления [13]. Как известно, заголовок протокола сетевого уровня IPv4 равен 20 байтам, а

IPv6 – 40 [14]. Предполагается, что с целью сокращения сетевых задержек передача кадров FPV-видеопотока осуществляется по протоколу сетевого уровня UDP с возможностью перехода на TCP при необходимости. Заголовок протокола UDP равен 8 байтам, а TCP – 20 [15]. На заголовок прикладного уровня для передачи видеопотока отводится 50 байт с 10-процентным резервированием.

Соответственно, формирование пакетов включает в себя разделение полезной нагрузки (кадра видеопотока) на части длиной до 1385 байт с добавлением заголовков пакета.

Потери кадров видеопотока, сжатых нейросетевым кодеком, отличаются от потери пакетов на уровне сети. Это обусловлено тем, что для восстановления кадра на приемной стороне необходимо получить все UDP-пакеты, содержащие части данного кадра.

Исходя из вышеизложенного, для определения уровня потери кадров можно использовать следующее выражение:

$$loss = \frac{frame}{all_frame} (\%), \quad (1)$$

где $frame$ – количество успешно принятых и восстановленных на СВП кадров; all_frame – количество отправленных с БАС кадров; пакеты, которые не удалось получить в течение 5 секунд (таймаут подключения), можно считать потерянными.

В настоящей работе помимо задержек в КИО $t_{кио}$ измеряются также уровни потерь в КИО как параметр, влияющий на интенсивность видеопотока на стороне СВП и, как следствие, на качество FPV-управления. Процесс функционирования КИО подвержен влиянию различных факторов неопределенности, что обуславливает стохастический характер данного процесса, а, следовательно, и случайное значение величины $t_{кио}$ и уровня потери кадров. Поэтому, в процессе исследования влияния размера полезной нагрузки на указанный выше показатель, была проведена передача между БВС и СВП 10000 кадров каждого из размеров. Данное значение было выбрано, исходя из необходимости получения репрезентативной выборки значений величины $t_{кио}$ с целью определения характеристик ее закона распределения.

Для определения величины $t_{кио}$ и уровня потери кадров было разработано специальное программное обеспечение, представляющее собой набор скриптов Python 3.11 с использованием модулей стандартных библиотек, таких как csv, socket, argparse, datetime, time, signal и struct.

Данное программное обеспечение включает в себя клиентскую и серверную часть, принцип работы которых заключается в следующем. Для каж-

дого i -го варианта полезной нагрузки, $i = \overline{1,18}$, размером $payload_i$ байт, формируется N UDP-пакетов данных, в состав которых входит кадр видеопотока, сжатый нейросетевым кодеком:

$$\begin{cases} N = 1, & \frac{payload_i}{1385} < 1 \\ N = \left\lceil \frac{payload_i}{1385} \right\rceil, & \frac{payload_i}{1385} \geq 1 \end{cases}$$

Процесс передачи видеокadra подразумевает успешную передачу всех N UDP-пакетов данных. Потеря как минимум одного пакета расценивается как потеря всего кадра целиком, что увеличивает задержку $t_{кио}$.

Каждый пакет от 1 до $N - 1$ содержит 1385 байт, а N -й пакет содержит $payload_i - \left\lfloor \frac{payload_i}{1385} \right\rfloor \cdot 1385$ байт. Для эмуляции заголовка прикладного уровня к каждому пакету дополнительно добавляются 20 технических байт. Пакеты отправляются по протоколу UDP с БВС на СВП с интервалом в 1 мс и таймаутом подключения, равным 5 секундам. Если все пакеты, относящиеся к полезной нагрузке некоторого кадра, получены, они упорядочиваются на стороне СВП и отправляются обратно на БВС. Возвращенные пакеты упорядочиваются на стороне БВС, после чего идет сравнение полезных нагрузок (рисунок 1).

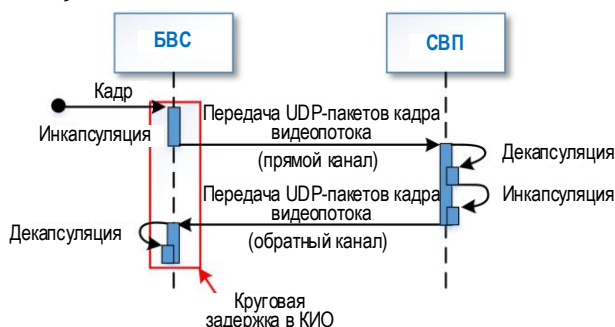


Рис. 1. Схема измерения задержки передачи одного кадра видеопотока

Fig. 1. One Video Stream Frame Latency Measuring Scheme

По результатам 10000 итераций передачи сжатых кадров видеопотока от БВС к СВП и обратно для каждого варианта расположения БВС была получена выборка значений величины $t_{кио}$, а также количество успешно принятых и восстановленных на СВП кадров $frame$. Полученное значение $frame$ позволило рассчитать уровень потери кадров видеопотока в КИО в соответствии с выражением (1). Путем обработки выборки значений величины $t_{кио}$ был определен закон ее распределения, для чего был использован один из ядерных методов восстановления плотности вероятности – метод Розенблатта – Парзена.

В соответствии с методом Розенблатта – Парзена плотность вероятности случайной величины аппроксимируется следующим выражением [16]:

$$f(x) = \frac{1}{Kh} \sum_{k=1}^K Y\left(\frac{x - x_k}{h}\right),$$

где x_k – реализация случайной величины в k -ом опыте; h – ширина пропускания случайной величины; $Y\left(\frac{x - x_k}{h}\right)$ – ядерная функция; $K = 10000$ – общее количество опытов; в качестве ядерной функции была использована Гауссова функция [17, 18].

Важным этапом использования метода Розенблатта – Парзена является выбор ширины пропускания h , так как неправильный выбор этого параметра может повлиять на адекватность оценки плотности вероятности. Выбор оптимального значения ширины пропускания исходил из критерия минимизации интеграла квадрата отклонения истинной плотности вероятности от ее ядерной оценки [19]:

$$h^* = \underset{h \in \Delta}{\operatorname{argmin}} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x) dx - \frac{2}{Kh(K-1)} \sum_{k=1}^K \sum_{j \neq k}^K Y\left(\frac{x_k - x_j}{h}\right) \right),$$

где h^* – оценка полосы пропускания.

Полученные законы распределения величины $t_{кио}$ передачи видеопотока наземного сегмента ГОНСС для каждого варианта полезной нагрузки позволили определить наиболее вероятное значение этой задержки, ее математическое ожидание и дисперсию. Это позволило в дальнейшем оценить влияние величины полезной нагрузки на данные параметры для различных случаев расположения БВС.

Результаты эксперимента

В результате проведенного эксперимента было определено, что величина прикладной задержки рассматриваемого КИО для любого варианта сочетания полезной нагрузки, расположения БВС и используемой технологии передачи данных подчиняется усеченному двухпараметрическому бета-распределению (рисунок 2). Это обусловлено тем, что данный закон распределения учитывает следующие особенности формирования задержки.

Особенность 1. Величина $t_{кио}$ ограничена как сверху, так и снизу, т. е. всегда можно указать максимальную величину задержки $t_{кио}^{\max}$, которая будет сформирована, несмотря на стечение самых неблагоприятных обстоятельств, и минимальную величину $t_{кио}^{\min}$, которая будет обусловлена наиболее приятным стечением обстоятельств.

Особенность 2. Величина $t_{кио}$ может принять любое значение в интервале $[t_{кио}^{\min}, t_{кио}^{\max}]$, т. е. является непрерывной случайной величиной.

Особенность 3. Среди всех задержек, которые могут наблюдаться при функционировании КИО, могут встречаться задержки, величина которых зависит от большого числа случайных факторов, каж-

дый из которых в отдельности является малосущественным, а также – задержки, на продолжительность которых оказывает влияние небольшое число важных факторов.

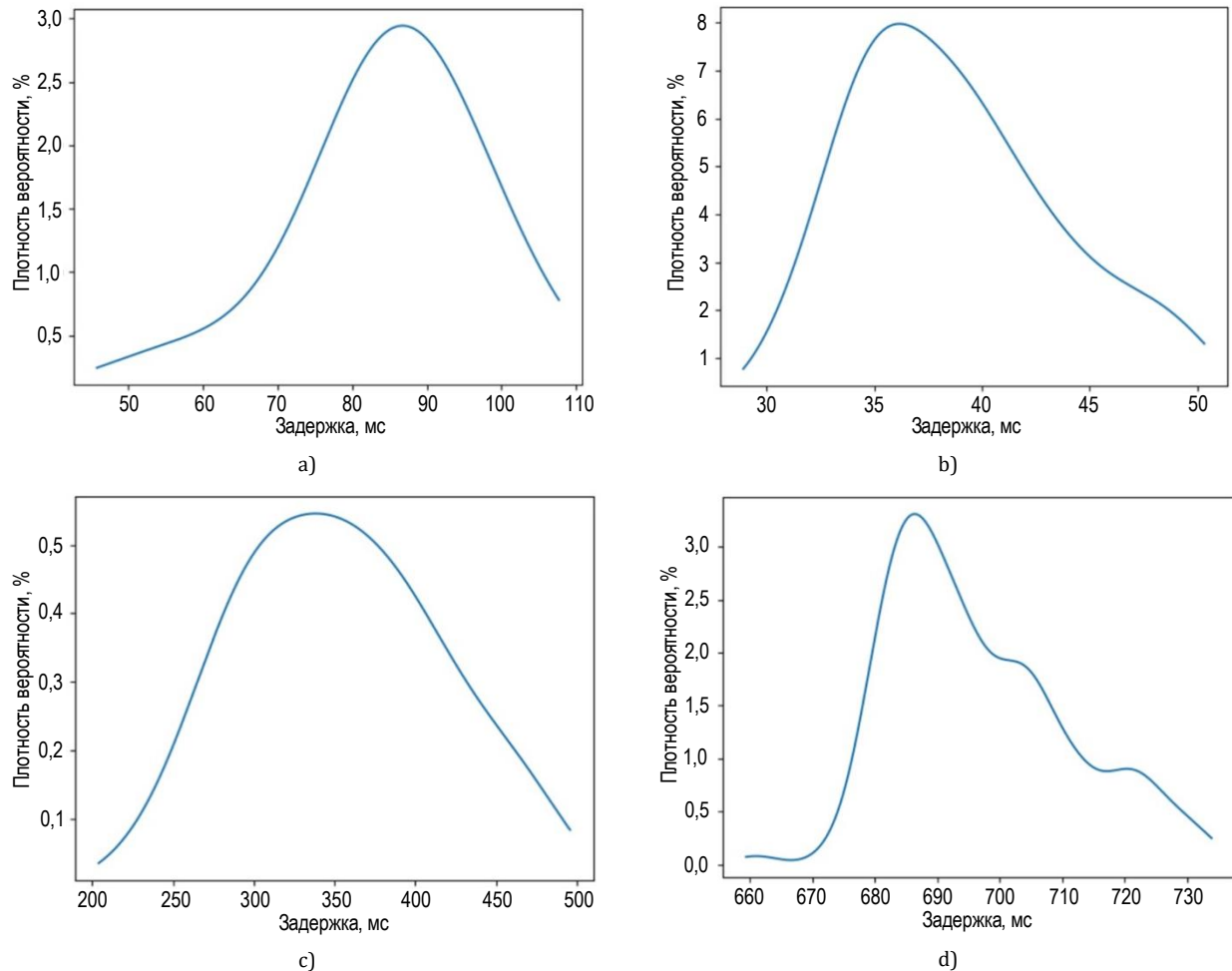


Рис. 2. Плотности вероятности величины прикладной задержки: а) Апатиты (3G, 100 байт); б) Архангельск (LTE, 5000 байт); в) Сочи (3G, 20000 байт); д) Южно-Сахалинск (LTE, 500 Кб)

Fig. 2. Probability Densities of the Application Delay Value: a) Apatity (3G, 100 bytes); b) Arkhangelsk (LTE, 5000 bytes); c) Sochi (3G, 20000 bytes); d) Yuzhno-Sakhalinsk (LTE, 500 Kb)

Первая особенность требует, чтобы на интервале $[t_{\text{КИО}}^{\text{мин}}, t_{\text{КИО}}^{\text{макс}}]$ закон распределения был усеченным, вторая – непрерывным, а третья – чтобы был таким, при котором наиболее вероятное значение времени устранения отказа могло располагаться в любом месте интервала $[t_{\text{КИО}}^{\text{мин}}, t_{\text{КИО}}^{\text{макс}}]$.

Среди практически применяемых распределений наиболее отвечающим этим требованиям является закон бета-распределения. Проверка данной гипотезы осуществлялась с использованием критерия Пирсона, сущность которого заключается в оценке меры расхождения χ^2 между теоретическими вероятностями p_i и наблюдаемыми частотами p_i^* . В результате проверки была вычислена мера расхождения $\chi^2 = 3,94$. При этом найденная по таблицам вероятность приближенно равна 0,56.

Эта вероятность не является малой, поэтому гипотезе о том, что величина $t_{\text{КИО}}$ распределена по бета-закону можно считать правдоподобной.

Характеристиками закона бета-распределения являются параметры формы: α и β .

Анализ полученных плотностей вероятности позволил сделать вывод, что для значения данных параметров принимают следующие значения:

$$2 \leq \alpha \leq 9; 2 \leq \beta \leq 14. \quad (2)$$

Для определения характеристик закона бета-распределения были использованы следующие выражения:

$$t_{\text{КИО}}^{\text{нв}} = t_{\text{КИО}}^{\text{мин}} + (t_{\text{КИО}}^{\text{макс}} - t_{\text{КИО}}^{\text{мин}}) \frac{\alpha - 1}{\alpha + \beta - 2}, \quad (3)$$

$$\sigma = (t_{\text{КИО}}^{\text{макс}} - t_{\text{КИО}}^{\text{мин}}) \frac{\sqrt{\alpha\beta}}{(\alpha + \beta)\sqrt{\alpha + \beta + 1}}, \quad (4)$$

где $t_{\text{КИО}}^{\text{HB}}$ и σ – наиболее вероятная величина задержки и ее среднеквадратическое отклонение, определяемые из выборки.

Исходя из этого, при моделировании КИО для передачи FPV-видеопотока наземного сегмента ГОНСС целесообразно в качестве закона распределения величины прикладной задержки использовать бета-распределение с параметрами (2).

На рисунке 3 представлены зависимости математического ожидания размера прикладной задержки от размера передаваемой полезной нагрузки для различных расстояний между БВС и СВП, а также используемой технологии передачи данных.

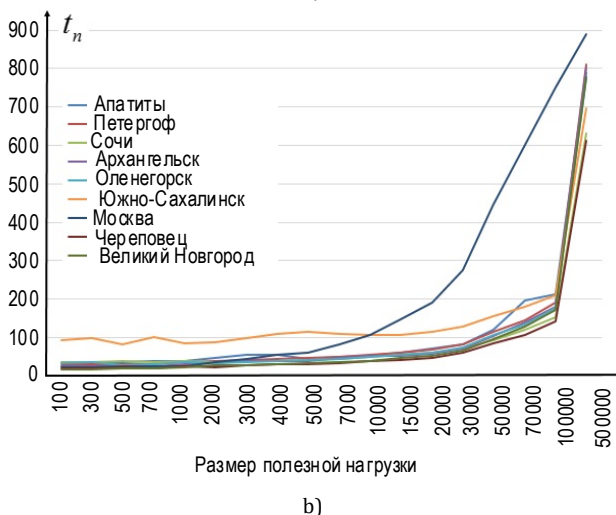
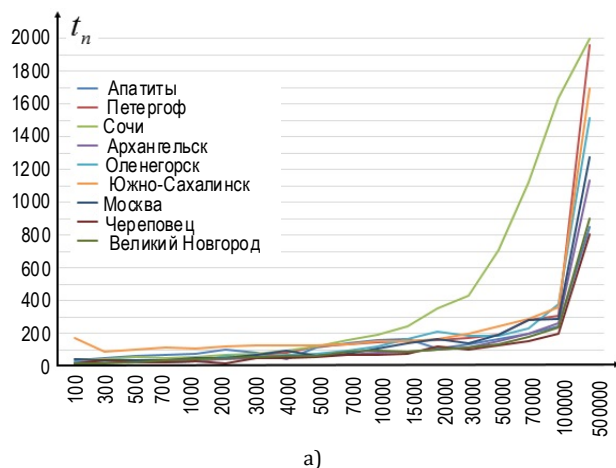


Рис. 3. Зависимость размера прикладной задержки КИО от размера передаваемой полезной нагрузки для различных расстояний между БВС и СВП при использовании 3G (a) и LTE (b)

Fig. 3. Dependence of the Delay in the Information Exchange Link on the Transmitted Payload Size for Different Distances between the UAV and the Remote Pilot Station in 3G Network (a) and LTE (b)

Представленные графики показывают, что зависимости величины прикладной задержки от размера передаваемой полезной нагрузки имеют вид показательной возрастающей функции. При этом максимальная величина задержки при передаче полезной нагрузки объемом от 20000 до 500000 байт с использованием 3G в среднем в два раза превышает величину задержки с использованием технологии LTE для всех вариантов расстояний между БВС и СВП (рисунок 4).

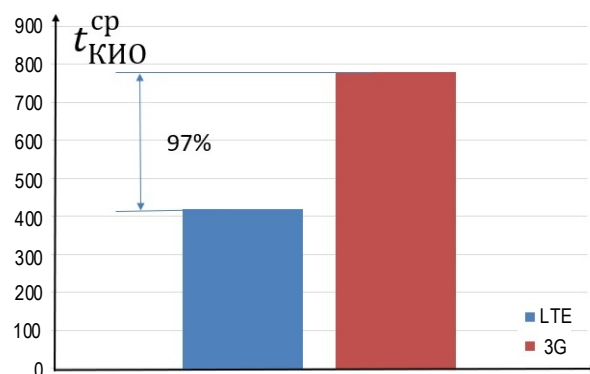


Рис. 4. Зависимость средней величины полезной нагрузки для всех вариантов расстояний между БВС и СВП от используемой технологии передачи данных

Fig. 4. Dependence of the Average Payload Value for All Variants of the Distances between the UAV and the Remote Pilot Station on the Data Transmission Technology Used

При передаче полезной нагрузки размером от 100 до 15000 байт величина $t_{\text{КИО}}$ остается неизменной (в среднем принимает значение 35 мс) для обеих технологий передачи данных и практически не зависит от расстояния. Исключением является только передача указанной полезной нагрузки на сверхдальнее расстояние (более 6000 км). Среднее значение величины $t_{\text{КИО}}$ в этом случае равно 100 мс.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что в связи с тем, что величина задержки остается неизменной как для полезной нагрузки размером 100 байт, так и 15000 байт, то целесообразно использовать конфигурации нейросетевых кодеков, которые формируют на выходе сжатые кадры видеопотока, размером не более 15000 байт. Следует отметить, что средние размеры сжатых кадров видеопотока при использовании нейросетевого кодера лежат на интервале [500; 9000] байт [11], что полностью укладывается в данное ограничение. В этой связи можно сделать вывод о том, что при передаче видеопотока в КИО наземного сегмента ГОНСС целесообразно использовать только одну конфигурацию нейросетевого кодера, обеспечивающую лучшее качество восстанавливаемого кадра видеопотока [10, 11].

Анализ графика на рисунке 3b показывает, что задержка в КИО при нахождении БВС в г. Москва в сети 4G существенно выше задержки из других исследуемых локаций. Это может быть обусловлено

существенно большей плотностью населения (таблица 1)² и частотой использования мобильной связи населением в определенный момент времени, что обеспечивает большую нагрузку на сеть сотовой связи и увеличивает задержку передачи данных прикладных протоколов.

ТАБЛИЦА 1. Плотность населения в исследуемых регионах

TABLE 1. Population Density in Reviewed Regions

Локация	Субъект Федерации	Плотность населения, чел/км ²
Москва	Город федерального значения Москва	4940,5
Сочи	Краснодарский край	77,24
Петергоф	Ленинградская область	24,26
Великий Новгород	Новгородская область	10,75
Череповец	Вологодская область	8,5
Южно-Сахалинск	Сахалинская область	5,4
Апатиты	Мурманская область	4,5
Оленегорск	Мурманская область	4,5
Архангельск	Архангельская область	1,69

Анализ графика, представленного на рисунке 4, показывает, что структура самой местности³ при пролете БВС может оказывать влияние на $t_{кио}$, что видно на примере г. Сочи (рисунок 5).

В результате эксперимента также было выявлено, что уровень потери кадров видеопотока (рисунок 6) для случаев передачи полезной нагрузки в диапазоне от 100 до 15000 байт не зависит от расстояния и технологии передачи данных и составляет в среднем менее одного процента (без учета временных разрывов соединений). Для больших размеров полезной нагрузки (более 15000 байт) расстояние между БВС и СВП и используемая технология передачи данных начинает играть существенную роль. Так, для полезной нагрузки размером 50000 байт при передаче ее на расстояние более 1500 км с использованием технологии 3G уровень потерь кадров видеопотока в КИО может достигать 90 %.

Приведенные результаты исследования могут быть учтены при моделировании процесса функционирования КИО в наземном сегменте ГОНСС с целью выбора оптимальной конфигурации нейросетевых кодеков, которая позволит повысить показатели эффективности функционирования КИО.

² Регионы России. Социально-экономические показатели // Росстат. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204> (дата обращения: 26.01.2025)

³ Топографическая карта Сочи. URL: <https://ru-ru.topographic-map.com/map-h97cgp/Сочи/?base=2> (дата обращения: 26.01.2025)



Рис. 5. Гористость в исследуемых регионах

Fig. 5. Mountainousness in the Examined Regions

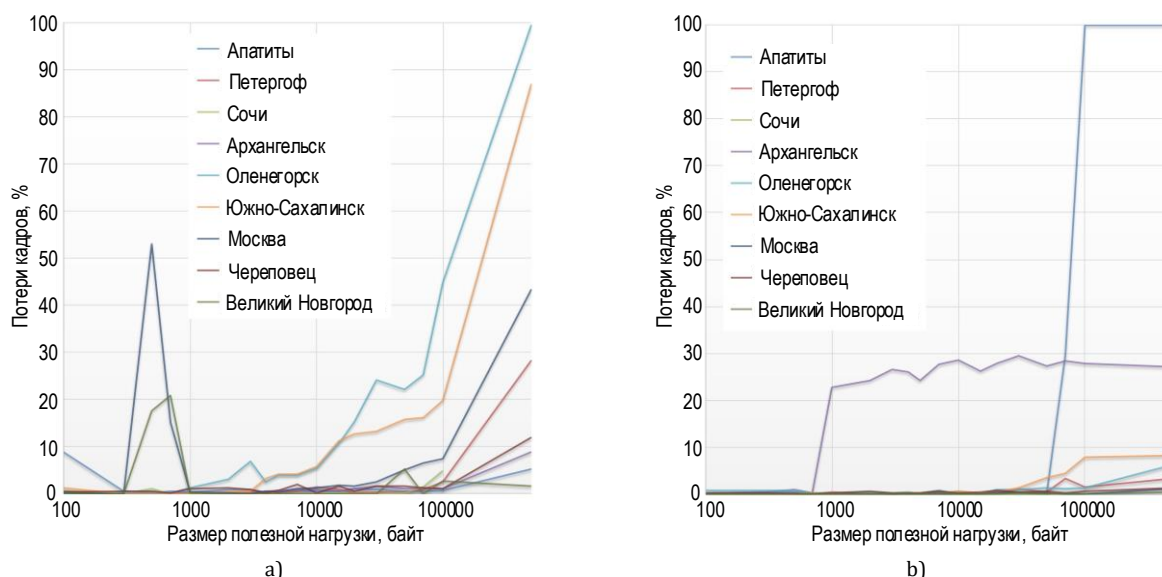


Рис. 6. Зависимость потерь кадров от размера полезной нагрузки в сетях 3G (а) и 4G (б)

Fig. 6. Dependence of Frame Loss Rate from the Payload in 3G (a) and 4G (b) Networks

Закключение

В результате проведенных исследований были получены следующие результаты.

Во-первых, величина задержки в КИО $t_{кио}$ для передачи FPV-видео-потока (прикладной задержки) для любого варианта сочетания полезной нагрузки, расположения БВС и используемой технологии передачи данных подчиняется усеченному двухпараметрическому бета-распределению.

Во-вторых, зависимость величины $t_{кио}$ от размера передаваемой полезной нагрузки имеет вид показательной возрастающей функции.

В-третьих, при передаче полезной нагрузки размером от 100 до 15000 байт величина $t_{кио}$ остается неизменной для обеих технологий передачи данных (3G, LTE) и практически не зависит от расстояния между БВС и СВП, что обуславливает целесооб-

разность использования при организации передачи видеопотока, формируемого нейросетевым кодеком, кадров размером до 15000 байт.

В-четвертых, для случаев передачи полезной нагрузки в диапазоне от 100 до 15000 байт уровень потери кадров не зависит от расстояния между БВС и СВП и технологии передачи данных, и составляет в среднем менее одного процента, в то время как для больших размеров полезной нагрузки данные характеристики играют более существенную роль.

Учет полученных результатов при моделировании функционирования КИО позволит осуществить выбор оптимальной конфигурации нейросетевых кодеков с целью повышения эффективности функционирования КИО. Кроме этого, полученные результаты могут быть полезны при организации каналов FPV-управления на основе стандартных видеокодеков.

Авторы выражают благодарность советнику ректора Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича Гурьеву Юрию Михайловичу, а также директору филиала ФГБУ ИАЦ Судебного департамента в Сахалинской области Гвоздовскому Дмитрию Геннадьевичу за помощь в сборе данных для проведения исследования.

Список источников

1. Просвирина Н.В. Анализ и перспективы развития беспилотных летательных аппаратов // Московский экономический журнал. 2021. № 10. С. 560–575. DOI:10.24411/2413-046X-2021-10619. EDN:PPWXEF
2. Мещанинова Е.Г., Николюкина В.О. Перспективы использования БПЛА при осуществлении земельного надзора // Экономика и экология территориальных образований. 2018. Т. 2. № 3. С. 122–128. DOI:10.23947/2413-1474-2018-2-3-122-128. EDN:UVLPE
3. Курносенко Д.В. Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при тушении лесных пожаров // Молодые ученые в решении актуальных проблем безопасности. 2023. С. 280–281. EDN:RULHAI
4. Чмелев В.С., Калюка В.И., Дмитренко М.Е. Обзор систем управления беспилотных летательных аппаратов общего пользования // Научно-практическая конференция «Технологии. Инновации. Связь» (Санкт-Петербург, Российская Федерация, 19 апреля 2021 г.). СПб.: ВАС, 2022. С. 279–286. EDN:KZXWEN

5. Гончарова Н.П., Примачук В.С. Беспилотные летательные аппараты в современном мире. Краткий обзор и перспективы развития // Символ науки. 2023. № 6-2. С. 12–14. EDN:WXXJBD
6. ITU-T H.264. Advanced Video Coding for Generic Audio-Visual Services. 2003.
7. ISO/IEC 23008-2. High Efficiency Video Coding. 2013.
8. Mousavi A., Patel A.B., Baraniuk R.G. A deep learning approach to structured signal recovery // Proceedings of the 53rd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and COMPUTING (Allerton, Monticello, USA, 29 September – 02 October 2015). IEEE, 2016. PP. 1336–1343. DOI:10.1109/ALLERTON.2015.7447163
9. Li Y., Mandt S. Disentangled Sequential Autoencoder // arXiv:1803.02991v2. 2018. DOI:10.48550/arXiv.1803.02991
10. Березкин А.А., Ченский А.А., Киричек Р.В., Захаров А.А. Исследование конфигураций нейросетевых кодеков для адаптивной системы сжатия кадров FPV-видеопотока при управлении беспилотными системами. Часть I. Методика // Электросвязь. 2024. № 9. С. 42–51. DOI:10.34832/ELSV.2024.58.9.004. EDN:MWXFXN
11. Березкин А.А., Ченский А.А., Киричек Р.В., Захаров А.А. Исследование конфигураций нейросетевых кодеков для адаптивной системы сжатия кадров FPV-видеопотока при управлении беспилотными системами. Часть II. Эксперимент // Электросвязь. 2024. № 10. С. 59–69. DOI:10.34832/ELSV.2024.59.10.009. EDN:IWGJLY
12. Behnam M., Marau R., Pedreiras P. Analysis and optimization of the MTU in real-time communications over Switched Ethernet // Proceedings of the 16th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA2011, Toulouse, France, 05–09 September 2011). IEEE, 2011. PP. 1–7. DOI:10.1109/ETFA.2011.6059021
13. Rajkumar K., Swaminathan P. Combining TCP and UDP for secure data transfer // Indian Journal of Science and Technology. 2015. Vol. 8. Iss. S9. PP. 285–291. DOI:10.17485/ijst/2015/v8iS9/65569
14. Garcia N.M., Freire M.M., Monteiro P.P. The Ethernet Frame Payload Size and Its Effect on IPv4 and IPv6 Traffic // Proceedings of the International Conference on Information Networking (Busan, South Korea, 23–25 January 2008). IEEE, 2008. PP. 1–5. DOI:10.1109/ICOIN.2008.4472813
15. Milanovic A., Srblić S., Sruk V. Performance of UDP and TCP communication on personal computers // Proceedings of the 10th Mediterranean Electrotechnical Conference. Information Technology and Electrotechnology for the Mediterranean Countries (MeleCon 2000, Lemesos, Cyprus, 29–31 May 2000). IEEE, 2000. Vol. 1. PP. 286–289. DOI:10.1109/MELCON.2000.880422
16. Вивчарь Р.М., Птушкин А.И., Соколов Б.В. Методика многокритериального оценивания эффективности функционирования стохастических сложных технических систем // Авиакосмические приборостроение. 2022. № 7. С. 3–14. DOI:10.25791/aviakosmos.7.2022.1286. EDN:XCYDAI
17. Поршенев С.В., Копосов А.С. Использование аппроксимации Розенблатта-Парзена для восстановления функции распределения непрерывной случайной величины с ограниченным одномодальным законом распределения // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 92. С. 1–27. EDN:RNEGGN
18. Parzen E. On Estimation of a Probability Density Function and Mode // The Annals of Mathematical Statistics. 1962. Vol. 33. Iss. 3. PP. 1065–1076. DOI:10.1214/aoms/1177704472
19. Bowman A.W., Hall P., Titterton D. M. Cross-validation in nonparametric estimation of probabilities and probability densities // Biometrika. 1984. Vol. 71. Iss. 2. PP. 341–351. DOI:10.1093/biomet/71.2.341. EDN:ILOHEZ

References

1. Prosvirina N. Analysis and Prospects for the Development of Unmanned Aircraft. *Moscow Economic Journal*. 2021;10: 560–575. (in Russ.) DOI:10.24411/2413-046X-2021-10619. EDN:PPWXEF
2. Meschaninova E.G., Nikolukina V.O. Prospects for the Use of UAVs in the Implementation of the Land Supervision. *Economy and Ecology of Territorial Entities*. 2018;2(3):122–128. (in Russ.) DOI:10.23947/2413-1474-2018-2-3-122-128. EDN:UVLPE
3. Kurnosenko D.V. Prospects for the Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Forest Fire Suppression. *Molodye uchenye v reshenii aktual'nykh problem bezopasnosti*. 2023;280–281. (in Russ.) EDN:RULHAI
4. Chmelev V.S., Kalyuka V.I., Dmitrenko M.E. Overview of Control Systems Unmanned Aerial Apparatus for General Use. *Proceedings of the Scientific and Practical Conference "Technologies. Innovations. Communications", 19 April 2021, Saint Petersburg, Russian Federation*. Saint Petersburg: Military Telecommunication Academy Publ.; 2022. p.279–286. (in Russ.) EDN:KZXWEH
5. Goncharova N.P., Primachuk V.S. Unmanned Aerial Vehicles in the Modern World. Brief overview and development prospects. *Symbol of Science*. 2023;6-2:12–14. (in Russ.) EDN:WXXJBD
6. ITU-T H.264. Advanced Video Coding for Generic Audio-Visual Services. 2003.
7. ISO/IEC 23008-2. High Efficiency Video Coding. 2013.
8. Mousavi A., Patel A.B., Baraniuk R.G. A deep learning approach to structured signal recovery. *Proceedings of the 53rd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and COMPUTING, Allerton, 29 September – 02 October 2015, Monticello, USA*. IEEE; 2016. p.1336–1343. DOI:10.1109/ALLERTON.2015.7447163
9. Li Y., Mandt S. Disentangled Sequential Autoencoder. *arXiv:1803.02991v2*. 2018. DOI:10.48550/arXiv.1803.02991
10. Berzkin A.A., Chenskiy A.A., Kirichek R.V., Zaharov A.A. Research of Neural Network Codec Configurations for Adaptive FPV Video Stream Frame Compression System When Controlling Unmanned Systems. Part I. Methodology. *Elektrosvjaz*. 2024;9:42–51. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2024.58.9.004. EDN:MWXFXN
11. Berzkin A.A., Chenskiy A.A., Kirichek R.V., Zaharov A.A. Research of Neural Network Codec Configurations for Adaptive FPV Video Stream Frame Compression System When Controlling Unmanned Systems. Part II. Experiment. *Elektrosvjaz*. 2024;10:59–69. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2024.59.10.009. EDN:IWGJLY

12. Behnam M., Marau R., Pedreiras P. Analysis and optimization of the MTU in real-time communications over Switched Ethernet. *Proceedings of the 16th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA2011, 05–09 September 2011, Toulouse, France*. IEEE; 2011. p.1–7. DOI:10.1109/ETFA.2011.6059021
13. Rajkumar K., Swaminathan P. Combining TCP and UDP for secure data transfer. *Indian Journal of Science and Technology*. 2015;8(S9):285–291. DOI:10.17485/ijst/2015/v8iS9/65569
14. Garcia N.M., Freire M.M., Monteiro P.P. The Ethernet Frame Payload Size and Its Effect on IPv4 and IPv6 Traffic. *Proceedings of the International Conference on Information Networking, 23–25 January 2008, Busan, South Korea*. IEEE; 2008. p.1–5. DOI:10.1109/ICOIN.2008.4472813
15. Milanovic A., Srbljic S., Sruk V. Performance of UDP and TCP communication on personal computers. *Proceedings of the 10th Mediterranean Electrotechnical Conference. Information Technology and Electrotechnology for the Mediterranean Countries, MeleCon 2000, 29–31 May 2000, Lemesos, Cyprus*. IEEE; 2000. vol.1. p.286–289. DOI:10.1109/MELCON.2000.880422
16. Vivchar R.M., Ptushkin A.I., Sokolov B.V. The Technique for Multi-Criteria Evaluation of the Performance of Stochastic Complex Technical Systems. *Aerospace Instrument-Making*. 2022;7:3–14. (in Russ.) DOI:10.25791/aviakosmos.7.2022.1286. EDN:XCYDAI
17. Porshenev S.V., Koposov A.S. Using Rozenblatt-Parzen Approximation for Recovering a Cumulative Distribution Function of Continuous Random Variable With a Bounded Single-Mode Distribution Rule. *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University*. 2013;92:1–27. (in Russ.) EDN:RNEGNN
18. Parzen E. On Estimation of a Probability Density Function and Mode. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1962;33(3):1065–1076. DOI:10.1214/aoms/1177704472
19. Bowman A.W., Hall P., Titterton D. M. Cross-validation in nonparametric estimation of probabilities and probability densities. *Biometrika*. 1984;71(2):341–351. DOI:10.1093/biomet/71.2.341. EDN:ILOHEZ

Статья поступила в редакцию 26.01.2025; одобрена после рецензирования 18.02.2025; принята к публикации 24.02.2025.

The article was submitted 26.01.2025; approved after reviewing 18.02.2025; accepted for publication 24.02.2025.

Информация об авторах:

БЕРЕЗКИН
Александр Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0002-1748-8642>

ВИВЧАРЬ
Роман Михайлович

кандидат технических наук, доцент кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0003-3865-9102>

ЧЕНСКИЙ
Александр Александрович

инженер центра перспективных проектов и разработок Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0009-0005-0832-8590>

КИРИЧЕК
Руслан Валентинович

доктор технических наук, профессор, ректор Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, заслуженный деятель науки Санкт-Петербурга
 <https://orcid.org/0000-0002-8781-6840>

Киричек Р.В. является главным редактором журнала «Труды учебных заведений связи» с 2023 г., но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

Kirichek R.V. has been an editor-in-chief of the journal "Proceedings of Telecommunication Universities" since 2023, but has nothing to do with the decision to publish this article. The article has passed the review procedure accepted in the journal. The authors have not declared any other conflicts of interest.