

Научная статья

УДК 004.7+004.738.2: 004.738.5

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-60-73>

EDN:GXFZLX



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

✉ 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 работе исследуется зависимость величин прикладной задержки и потери кадров FPV-видеопотока от размера передаваемых кадров, сжатых нейросетевым кодеком, при реализации каналов информационного обмена между беспилотными воздушными судами и станцией внешнего пилота в космическом сегменте гибридной орбитально-наземной сети связи. Рассмотрены спутниковые каналы информационного обмена, построенные на базе спутниковых группировок низкой околоземной орбиты Starlink, а также геостационарных орбит Ямал-402 и Ямал-601. **Актуальность** работы обусловлена необходимостью достижения заданного уровня качества услуги FPV-управления в спутниковых сетях связи.

Используемые методы. Прикладные задержки передачи и потери кадров видеопотока при использовании нейросетевых кодеков измерены методом натурных испытаний. Кадры видеопотока сегментируются, передаются по транспортному протоколу UDP и восстанавливаются. Плотность распределения вероятности задержек восстанавливается методом Розенблатта – Парзена с функцией оценки плотности с Гауссовым ядром.

Результаты. Получены средние задержки передачи и потерь кадров видеопотока (сжатых нейросетевым кодеком) через спутниковые системы связи на низкой околоземной и геостационарных орбитах. Восстановлены распределения зависимостей задержек видеопотока от размера полезной нагрузки. Найден характер распределения задержки видеопотока, сжатого нейросетевым кодеком. **Новизна** полученных результатов заключается в исследовании характера задержек видеопотока при реализации услуги FPV-управления через различные космические сегменты гибридной орбитально-наземной сети связи при использовании нейросетевых кодеков сжатия видеопотока.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы при моделировании прикладных спутниковых каналов информационного обмена для реализации услуги 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, спутниковая система связи, Starlink, Ямал-402, Ямал-601

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, соглашение № 071-03-2025-005, «Прикладные научные исследования в области создания и развития систем телеметрии, управления и связи для беспилотных авиационных систем на период до 2030 года с учетом импортозамещения» (регистрационный номер ПТНИ: 1024032900105-1).

Ссылка для цитирования: Березкин А.А., Вивчарь Р.М., Ченский А.А., Киричек Р.В. Исследование задержки кадров видеопотока в канале информационного обмена космического сегмента гибридной сети связи при FPV-управлении БВС // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 5. С. 60–73. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-60-73. EDN:GXFZLX

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-60-73>

EDN:GXFZLX

Research of Video Stream Frame Delay in UAVs FPV-Control Information Exchange Channel of HSTNs Space Segment

 **Alexandr A. Berezkin** , berezkin.aa@sut.ru

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

 **Alexandr A. Chenskiy**, 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

*In this paper, dependence of applied delay and video stream frame loss values of the FPV video stream on the size of the transmitted frames compressed by a neural network codec when implementing information exchange channels between unmanned aerial vehicles and an external pilot station in the space segment of a hybrid orbital-ground communication network. Satellite information exchange channels built on the basis of the Starlink Low-Earth orbit satellite constellations, as well as the Yamal-402 and Yamal-601 geostationary orbits, are considered. **Relevance** of the work is based on the necessity to achieve a specified level of quality of FPV control services in satellite communication networks.*

Methods used. Application delay and frame loss of the video stream using neural network codecs are measured using the field testing method. Video stream frames are segmented, transmitted via the UDP transport protocol and reconstructed. The probability distribution density of delays is reconstructed using the Rosenblatt-Parzen method with a density estimation function with a Gaussian kernel.

Results. Average transmission delays and frame losses of a video stream (compressed by a neural network codec) via satellite communication systems in low-Earth and geostationary orbits are obtained. Distributions of video stream delay dependencies on the payload size are reconstructed. The nature of the distribution of video stream delays compressed by a neural network codec is found. **Novelty** of the obtained results lies in the study of the nature of video stream delays when implementing the FPV control service through various space segments of a hybrid orbital-ground communication network using neural network video stream compression codecs.

Practical significance. The results can be used in modeling applied satellite information exchange channels for implementing the FPV control service in order to form an optimal configuration of the neural network codecs used.

Keywords: video stream latency, information link, channel of data exchange, channel of in-information exchange, UAV, unmanned aerial system, first person view control, FPV-control, LEO, GEO

Funding: The research was prepared with the financial support of the Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation, grant agreement No. 071-03-2025-005, "Applied scientific research in the field of creation and development of telemetry, control and communication systems for unmanned aircraft systems for the period up to 2030, taking into account import displacement" (reg. No. of applied scientific research: 1024032900105-1).

For citation: Berezkin A.A., Vivchar R.M., Chenskiy A.A., Kirichek R.V. Research of Video Stream Frame Delay in UAVs FPV-Control Information Exchange Channel of HSTNs Space Segment. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(5):60–73. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-60-73. EDN:GXFZLX

Введение

Управление беспилотными воздушными судами (БВС) от первого лица позволяет выполнять такие задачи, как мониторинг сельскохозяйственных

угодий [1–3] и строительных площадок [4, 5]. Такой вид управления предполагает отправку видеопотока, отражающего полетную обстановку, и данных телеметрии на станцию внешнего пилота

(ВП), а также команд управления в обратном направлении. В связи с тем, что управляющее воздействие в направлении БВС при FPV-управлении формируется ВП на основе кадров видеопотока, полученных на прикладном уровне услуги FPV-управления, то задержка кадров FPV-видео является критически важным параметром для корректного формирования команд управления, соответствующих реальной полетной обстановке. Поэтому оценку качества услуги FPV-управления следует проводить на прикладном уровне модели OSI, где линии связи с землей и бортом в совокупности образуют каналы информационного обмена (КИО) [6–9]. Следует отметить, что по КИО между БВС и станцией ВП также передается и служебный сетевой трафик [10]. Наибольший объем данных при этом занимает информация, необходимая для восстановления кадров видеопотока.

Команды управления БВС формируются внешним пилотом на основе качества и оперативности видеопотока, а также телеметрической информации. Оперативность информации, в свою очередь, зависит от прикладной задержки (от появления события до отображения его на экране монитора или очков). Данному термину соответствует зарубежные термины «G2G latency» [11–13] или «G2G delay» [14–16] (*аббр. от англ. Glass-to-Glass latency/delay* – задержка от «стекла к стеклу»). Соответственно, измерение прикладной задержки видеопотока, которая рассматривается в настоящей работе, является актуальной задачей.

К протоколам управления и передачи телеметрии относятся: SBus, ASBUS, iBus, SumD, SumH, PPM, PWM, CRSF, JetiExBus, DSM2 и DSMX, XBUS, XBee, FrSky, SmartPort, HoTT, LTM, MavLink, SRXL и SRXL2, UAVTalk, Mutiwii [17, 18]. К телеметрии также можно отнести и систему идентификации БВС на основе архитектуры цифровых объектов (DOA, *аббр. от англ. аббр. Digital Object Architecture*) [19, 20]. При этом, несмотря на высокую интенсивность трафика команд управления и телеметрии, большая полоса пропускания для передачи этого вида трафика в общем случае не требуется. Исключение составляет случай, когда в составе телеметрической информации передаются большие объемы сенсорных данных.

Видеопоток – это временная последовательность кадров (изображений) определенного формата. Для FPV-видеопотока применяется ряд форматов: телевизионные стандарты PAL (*аббр. от англ. Phase Alternate Line* – фазовая альтернативная линия) [21] разрешением 720×576; NTSC (*аббр. от англ. National Television System Committee* – национальный комитет по телевизионным системам) [22] разрешением 720×480 [23]; SECAM (*аббр. от англ. Sequential Colour Memory* – последовательная цветовая память) разрешением

720(768)×576 [24, 25], а также цифровые системы передачи видео FPV-управления с разрешением 1280×720 (HD) и 1920×1080 (FullHD) [26]. Интенсивность видеопотока отличается для разных систем. Так, по стандартам PAL и SECAM в секунду передается 25 кадров, а по стандартам NTSC – 30. Система FPV-управления Connex Prosight HD имеет интенсивность видеопотока FPS = 30 к/с, а Insight SE – FPS ∈ {30; 60} к/с. Отдельные системы поддерживают 120 FPS.

Как известно, для хранения кадра видеопотока разрешения HD палитры RGB в несжатом виде требуется около 379 Кб. Для передачи таких кадров видеопотока с интенсивностью 30 к/с необходима полоса пропускания КИО в 74 Мбит/с. Для ослабления требования по полосе пропускания используются видеокодеки, обеспечивающие адаптивное сжатие кадров видеопотока. К стандартным видеокодекам относятся: AVC/H264 (*аббр. от англ. Advanced Video Coding*) [27], HEVC/H265 (*аббр. от англ. High Efficiency Video Codec*) [28], VCC/H266 (*аббр. от англ. Versatile Video Codec*) [29], VP8 [30], VP9 [31] и AV1 (*аббр. от англ. AOMedia Video 1*) [32]. Помимо стандартных видеокодеков, разрабатываются нейросетевые видеокодеки [33–40]. Они применяются для сильного сжатия кадров видеопотока при работе в низкоскоростных каналах связи. В настоящей работе рассматриваются нейросетевые видеокодеки.

Как правило, FPV-управление осуществляется по радиоканалам (в частности, LoRa [41]) и через сотовые сети связи. Использование радиоканала ограничивает дальность FPV-управления. Беспроводные сотовые сети связи, в свою очередь, сильно ограничены зоной покрытия. Так, согласно исследованию французской компании nPerf, на 11 июня 2025 г. мобильные сети 2G, 3G, 4G и 5G покрывают около 20 % территории Российской Федерации (рисунок 1 – на примере оператора Megafon, <https://www.nperf.com/ru/map/RU/-/157235.MTS-Mobile/signal?ll=68.65655498475738&lg=41.74804687500001&zoom=3>).

Согласно Стратегии развития отрасли связи РФ до 2035 года, утвержденной Распоряжением Правительства РФ от 24 ноября 2023 г. № 3339-р «Об утверждении Стратегии развития отрасли связи РФ на период до 2035», гибридные орбитально-наземные сети связи (ГОНСС) (рисунок 2) позволят управлять БВС на территории всей Российской Федерации [42]. Данная разновидность сетей состоит из двух сегментов: наземного и космического. В части управления БВС наземный сегмент состоит из сотовых и магистральных сетей связи. Космический (орбитальный) сегмент состоит из спутниковых сетей связи, которые основываются на ОГ космических аппаратов (КА).

Спутниковые сети связи характеризуются высоким уровнем задержек передачи данных, которые

возникают по причине того, что сигналу необходимо преодолеть значительные расстояния. Так как ОГ КА могут располагаться на низкой околоземной орбите (НОО) [43], средней околоземной орбите (СОО) [44], высокой околоземной орбите (ВОО) [45] и геостационарной орбите (ГСО) [46], то эти расстояния соответственно принимают значения от 200 до 1500 км над экватором – для НОО, от 1500 до 35 786 км – для средней околоземной орбиты; 35 786 – для ГСО; свыше 35 786 км – для ВОО [47].

Кроме того, спутниковые соединения являются нестабильными, из-за чего помимо высоких задержек возникают потери пакетов [48].

Настоящее исследование является продолжением работы [42]. В ней рассматриваются зависимости задержек и потерь передачи кадров видеопотока, сжатых нейросетевыми видеокодеками, от размера передаваемой полезной нагрузки по спутниковым сетям связи (НОО и ГСО).

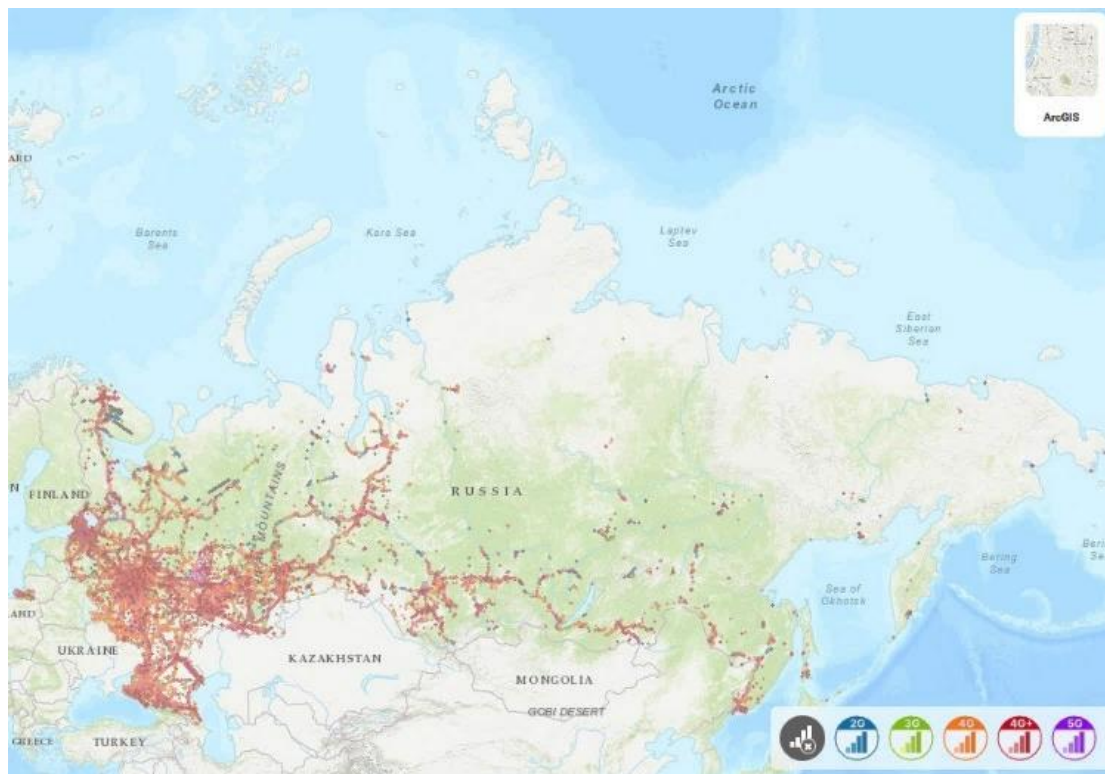


Рис. 1. Карта покрытия мобильных сетей оператора МегаФон

Fig. 1. Mobile Networks Coverage Map for Megafon



Рис. 2. Структура ГОНСС для FPV-управления БВС

Fig. 2. HSTNs Structure for UAVs FPV-Control

Описание эксперимента

Для исследования влияния размера кадров видеопотока на величину прикладной задержки и уровень потерь кадров в КИО космического сегмента ГОНСС были проведены натурные испытания. В качестве КИО космического сегмента для ОГ на НОО применяется система Старлинк [49], а для ОГ на ГСО: Ямал-402, Ямал-601 [50]. Структурная схема эксперимента приведена на рисунке 3.

Трафик для тестирования ОГ на НОО передавался через морской терминал ОГ «Старлинк» из акватории Средиземного моря, выгружался через наземную станцию приема (Starlink Gateway Station) в районе Бухареста и передавался через Интернет в Санкт-Петербург. В качестве спутникового абонентского терминала использовался терминал «Starlink Maritime» (рисунок 4а).

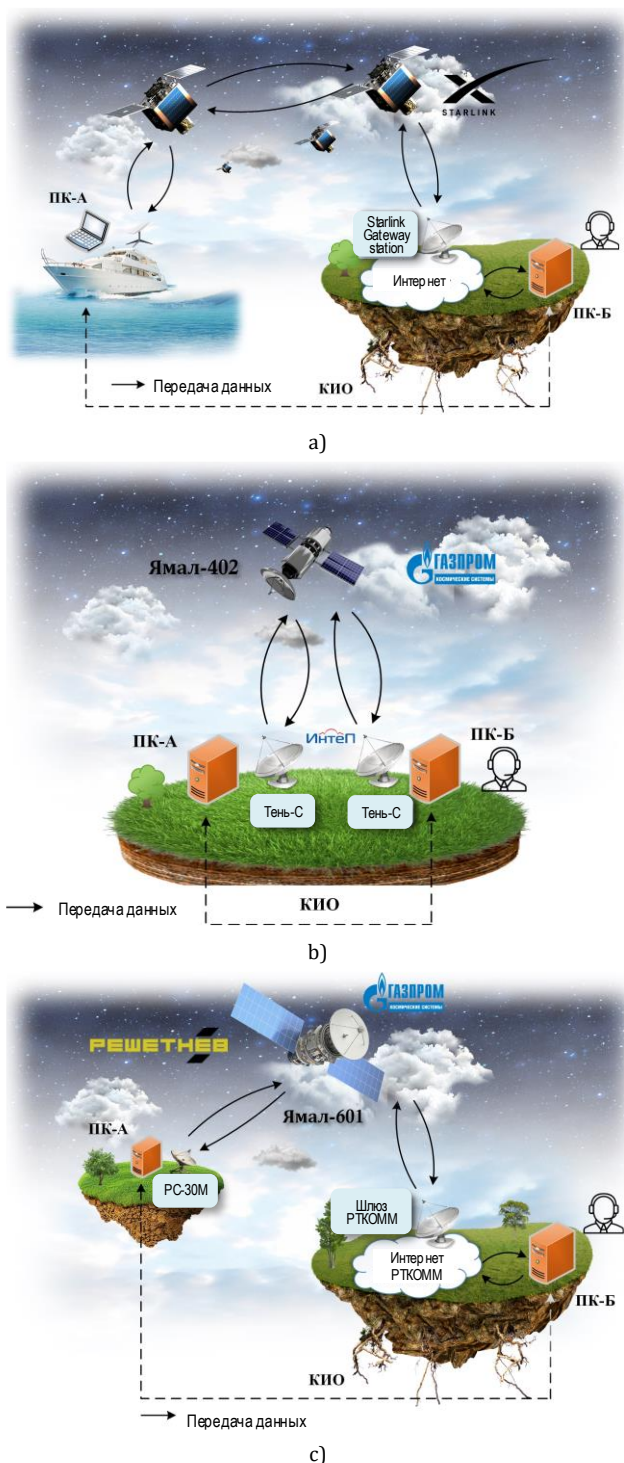


Рис. 3. Структурная схема эксперимента: а) Старлинк; б) Ямал-402; в) Ямал-601

Fig. 3. Structural Diagram of the Experiment: а) Starlink; б) Yamal-402; в) Yamal-601

Для тестирования прикладных задержек в КИО ОГ на ГСО использовался абонентский терминал СПС «Тень-С» (рисунок 4б) разработки ООО «КБ «Интеллектуальные приборы» (<https://intep.pro>), работающий со спутником Ямал-402 в *Ku*-диапазоне, а также абонентский терминал спутниковой связи РС-30М на базе спутникового модема Gilat

SkyEdge CPE (рисунок 4в) разработки ИСС «РЕШЕТНЁВ» (<https://www.iss-reshetnev.ru>), работающий со спутником Ямал-601 в *Ka*-диапазоне. Трафик передавался и принимался в Санкт-Петербурге. Скорости нисходящих и восходящих каналов передачи данных представлены в таблице 1.



а)



б)



в)

Рис. 4. Абонентские терминалы: а) Starlink Maritime; б) Тень-С; в) РС-30М

Fig. 4. Satellite Terminals: а) Starlink Maritime; б) Shadow-S; в) RS-30M

ТАБЛИЦА 1. Скорости каналов выгрузки и загрузки

TABLE 1. Upload and Download Channel Speeds

Терминал	Нисходящий канал (Download)	Восходящий канал (Upload)	Диапазон частот
Starlink Maritime	131 Мбит/с	31 Мбит/с	<i>Ku</i>
Тень-С	14 Кбит/с	14 Кбит/с	<i>Ku</i>
РС-30М	23 Мбит/с	1,76 Мбит/с	<i>Ka</i>

Задержка в КИО прикладного уровня (мс) оценивается в [42] как:

$$t_{\text{кио}} = t_c + t_p + t_{dp},$$

где t_c – сетевая задержка; t_p – задержка инкапсуляции кадров видеопотока; t_{dp} – задержка декапсуляции кадров видеопотока.

Потери пакетов (%) оцениваются по выражению:

$$\text{loss} = \frac{\text{frame}}{\text{all_frame}},$$

где frame – количество успешно принятых и восстановленных на станции ВП кадров; all_frame – количество отправленных с БВС кадров.

Пакеты, которые не удалось получить в течение 5 секунд (тайм-аут подключения), считаются потерянными. Натурные испытания проводятся в соответствии с методикой, описанной в [42].

Результаты эксперимента

В результате проведенного эксперимента были получены плотности вероятности величины прикладной задержки при использовании в качестве КИО ОГ Ямал-402 (рисунки 5а, 5с, 5е, 5г) и Ямал-601 (рисунки 5б, 5д, 5ф, 5h) при разной величине полезной нагрузки. Полученные плотности вероятности позволили сделать вывод, что величина прикладной задержки подчиняется усеченному двухпараметрическому закону бета-распределения при любых вариантах полезных нагрузок, где параметры усечения равны границам области допустимых значений величины прикладной задержки.

Для проверки гипотезы о подчинении величины прикладной задержки усеченному двухпараметрическому закону бета-распределения был использован критерий согласия Колмогорова – Смирнова [51].

Обработка результатов эксперимента позволила также определить интервалы изменения параметров формы (α и β) бета-распределения, которые принимают следующие значения:

$$\begin{aligned} 1 \leq \alpha \leq 4,5, \\ 1 \leq \beta \leq 4. \end{aligned} \quad (1)$$

Полученные интервалы (1) изменения параметров бета-распределения согласуются с полученными ранее в исследовании [42] параметрами формы закона распределения величины прикладной задержки в КИО при FVP-управлении БВС при использовании наземного сегмента ГОНСС.

Для определения характеристик закона бета-распределения [52] были использованы следующие выражения [42]:

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

$$\sigma = (t_{\text{кио}}^{\text{макс}} - t_{\text{кио}}^{\text{мин}}) \frac{\sqrt{\alpha\beta}}{(\alpha + \beta)\sqrt{\alpha + \beta + 1}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{кио}}^{\text{нв}}$ и σ – наиболее вероятная величина задержки и ее среднеквадратическое отклонение, определяемое из выборки.

Выражения (2) и (3) позволяют на основе статистических данных о наиболее вероятном, минимальном и максимальном значениях величины прикладной задержки определить параметры бета-распределения, такие как α и β , которые в дальнейшем могут быть использованы для моделирования прикладной задержки в канале информационного обмена. Исходя из этого, при моделировании КИО, представляющего собой ОГ КА на ГСО, целесообразно в качестве закона распределения величины прикладной задержки использовать бета-распределение с параметрами (1).

Графики зависимости величины прикладной задержки от размера передаваемой полезной нагрузки по КИО, представляющему собой ОГ КА Ямал-601 и Ямал-402 приведены на (рисунке 6) и показывают, что в случае использования в качестве КИО Ямал-601 зависимость величины прикладной задержки от размера передаваемой полезной нагрузки имеет вид логарифмической возрастающей функции, а в случае применения Ямал-402 – возрастающей линейной функции. При этом при использовании в качестве КИО Ямал-601 величина прикладной задержки резко возрастает (от 340 до 600 мс) на интервале полезной нагрузки от 100 до 1000 байт, а на интервале от 1000 до 15000 байт ее изменение имеет слабовыраженный вид (от 600 до 800 мс).

В результате проведенного эксперимента также были получены плотности вероятности величины прикладной задержки при использовании в качестве КИО ОГ «Старлинк» при разной величине полезной нагрузки. Полученные плотности вероятности позволили сделать вывод, что величина прикладной задержки при передаче полезной нагрузки в диапазоне от 100 до 3000 байт подчиняется также усеченному двухпараметрическому закону бета-распределения (рисунки 7а, 7с, 7е, 7г).

Интервалы изменения параметров формы (α и β) бета-распределения, полученные с использованием выражений (2), (3), принимают следующие значения:

$$\begin{aligned} 0,3 \leq \alpha \leq 3,6, \\ 0,8 \leq \beta \leq 4. \end{aligned} \quad (4)$$

Важно отметить, что в большинстве случаев значения параметров α и β принимают приблизительно равные значения, что позволит сделать вывод о приближении закона распределения величины прикладной задержки к нормальному.

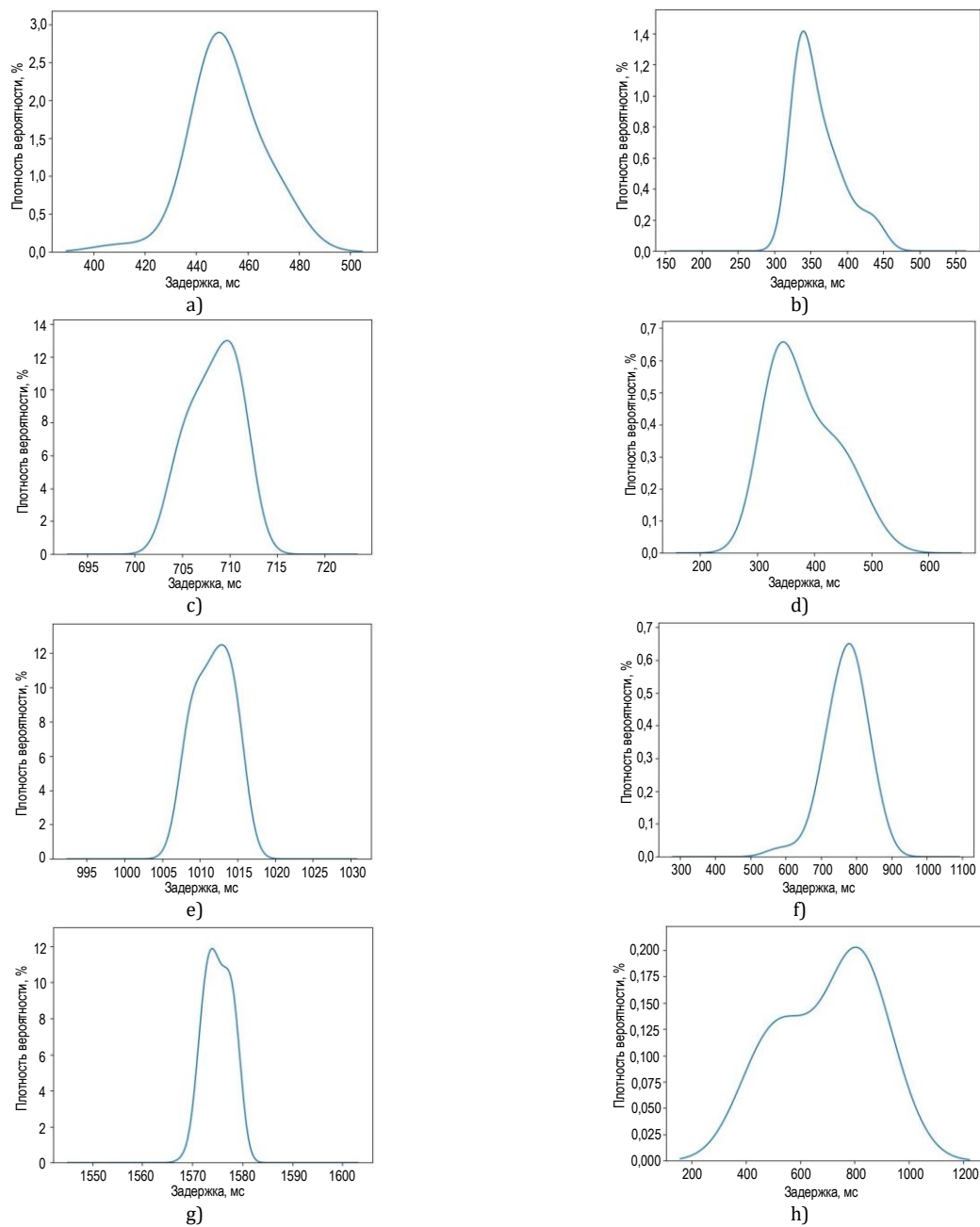


Рис. 5. Плотности вероятности величины прикладной задержки при использовании в качестве КИО Ямал-402 (слева) и Ямал-601 (справа) при разной величине полезной нагрузки: 100 байт (а и б); 500 байт (с и д); 1000 байт (е); 2000 байт (ф и г); 15000 байт (h)

Fig. 5. Probability Densities of The Applied Delay Value When Using Yamal-402 (Left) and Yamal-601 (Right) as an Information Exchange Channel (IEC) with Different Payload Values: 100 bytes (a and b); 500 bytes (c and d); 1000 bytes (e); 2000 bytes (f and g); 15000 bytes (h)

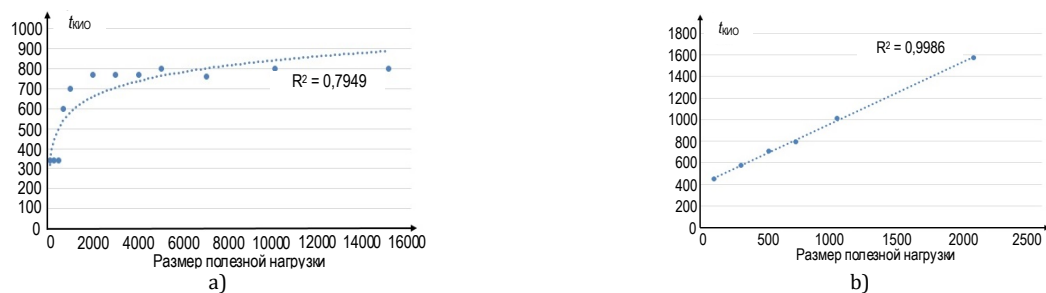


Рис. 6. Зависимость размера прикладной задержки КИО от размера передаваемой полезной нагрузки для Ямал-601 (а) и Ямал-402 (б)

Fig. 6. Dependence of the Applied Delay Size of the IEC on the Size of the Transmitted Payload for Yamal-601 (a) and Yamal-402 (b)

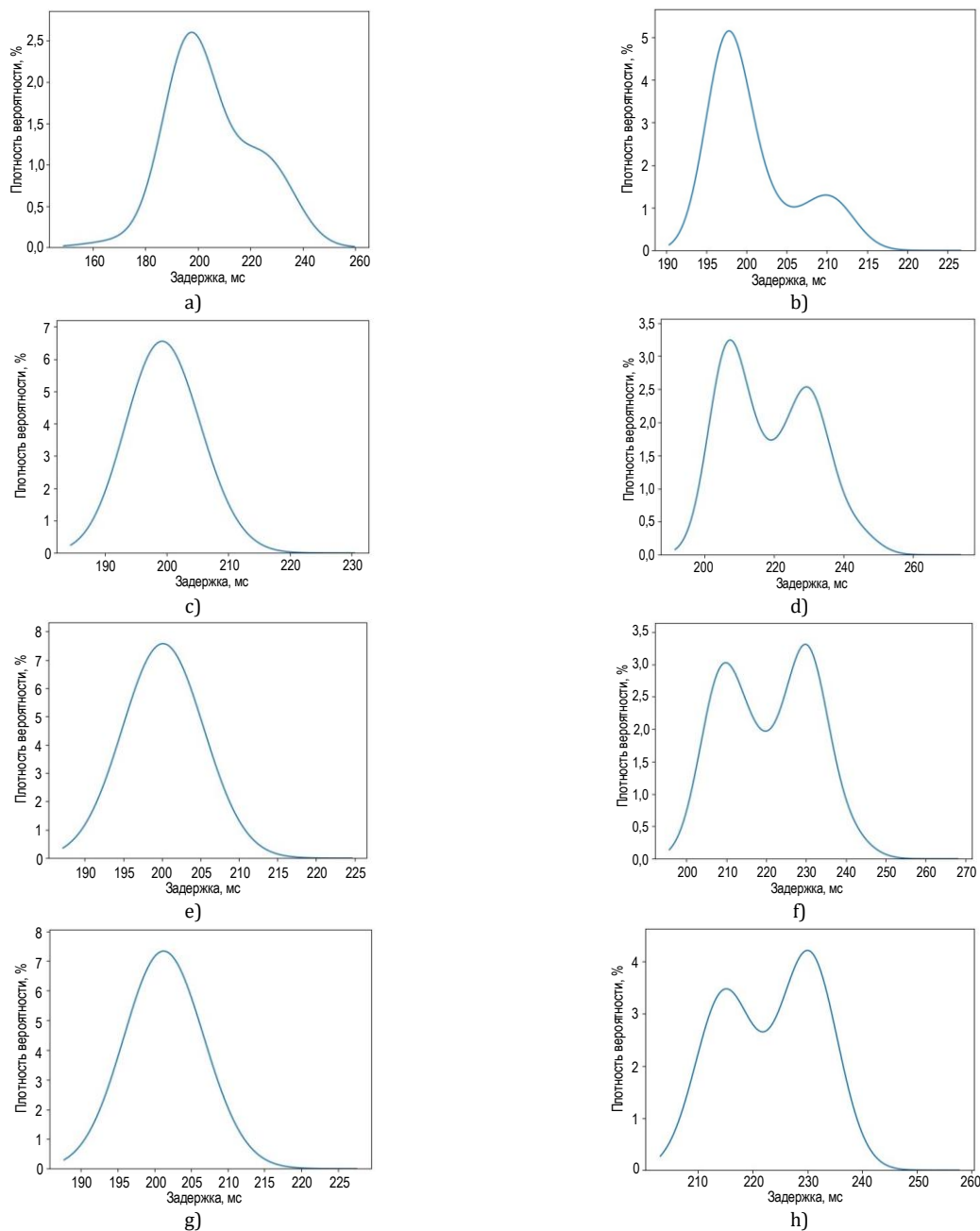


Рис. 7. Плотности вероятности величины прикладной задержки при использовании в качестве КИО ОГ «Старлинк» при величине полезной нагрузки от 100 до 3000 байт (слева) и от 3000 до 15000 байт (справа)

Fig. 7. Probability Densities of the Application Delay Value When Using the Starlink as IEC with a Payload Value from 100 to 3000 Bytes (Left) and from 3000 to 15000 Bytes (Right)

В свою очередь, обработка результатов эксперимента при передаче полезной нагрузки от 3000 до 15000 байт показала, что в таких случаях закон распределения прикладной задержки имеет двухмодульный вид (рисунки 7b, 7d, 7f, 7h). Закон распределения величины прикладной задержки при использовании в качестве КИО ОГ «Старлинк» и передаче полезной нагрузки в интервале от 3000 до 15000 байт представляет собой смесь нормальных распределений (рисунок 8).

Плотность вероятности величины прикладной задержки, являющаяся смесью двух нормальных распределений, представлена формулой:

$$f(t_{\text{кио}}) = af_1(t_{\text{кио}}) + bf_2(t_{\text{кио}}), \quad (5)$$

где a и b – весовые коэффициенты.

Параметры законов распределения $f_1(t_{\text{кио}})$, $f_2(t_{\text{кио}})$ при изменении величины передаваемой полезной нагрузки от 3000 до 15000 байт остаются неизменными и равны соответственно:

$$\begin{aligned} m_1 &= 205 \text{ мс}, \sigma_1 = 3 \text{ мс}, \\ m_2 &= 230 \text{ мс}, \sigma_2 = 10 \text{ мс}. \end{aligned} \quad (6)$$

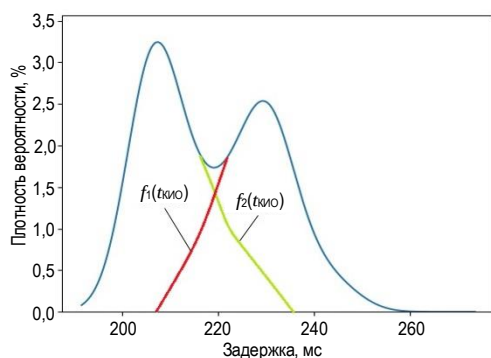


Рис. 8. Плотности вероятности величины прикладной задержки при использовании в качестве КИО ОГ Старлинка как смесь двух нормальных распределений

Fig. 8. Probability Densities of the Applied Delay Value When Using the Starlink as IEC as a Mixture of Two Normal Distributions

В свою очередь, вес каждого закона распределения при изменении величины полезной нагрузки изменяется. Так, при изменении полезной нагрузки от 3000 до 7000 байт наиболее весомым является закон распределения $f_1(t_{\text{КИО}})$, а от 7000 до 15000 байт – $f_2(t_{\text{КИО}})$.

Для определения весовых коэффициентов a и b был использован метод максимального правдоподобия. Основанием для выбора метода максимального правдоподобия является сравнительная простота и минимальные вычислительные ресурсы, необходимые для вычисления параметров смеси распределений, состоящих из двух нормальных распределений с известными параметрами. Также для этой цели могут быть использованы сеточный ЕМ-алгоритм и метод скользящего разделения смесей.

Исследования по результатам проведенного эксперимента зависимости потери кадров от величины передаваемой полезной нагрузки позволили сделать следующие выводы:

- при использовании в качестве КИО ОГ КА Ямал-402 потери кадров при изменении полезной нагрузки в диапазоне от 100 до 1000 байт являются незначительными и составляют менее 0,5 %, при значении полезной нагрузки 2000 байт возрастают до 8,5 %, а при увеличении полезной нагрузки свыше 2000 байт составляют 100 %, что обусловлено низкой скоростью передачи;

- при использовании в качестве КИО ОГ КА Ямал-601 и «Старлинка» изменение потери кадров при варьировании полезной нагрузки в диапазоне от 100 до 15000 байт не имеют ярко выраженной зависимости, средние значения потери кадров составляют 1,3 и 5,2 %, соответственно.

В таблице 2 представлены обобщенные результаты проведения эксперимента.

Пусть к системе FPV-управления предъявляется требование по задержке: не менее P % кадров должны поступать с БВС на СВП с задержкой, не

превышающей $t_{\text{КИО}}^{\text{пред}}$, – а также применяется нейросетевой кодек, в котором для передачи видеопотока используются только кадры, для декодирования которых достаточно информации, передаваемой по КИО [33–39]. Тогда при использовании j -й конфигурации нейросетевого кодека кадры видеопотока имеют средний размер $MSize_j$ с низким среднеквадратическим отклонением [36, 37]. Задержки передачи кадров видеопотока, закодированных j -й конфигурацией нейросетевого кодека, при передаче через спутниковый сегмент ГОНСС можно аппроксимировать как сумму времени кодирования t_c , времени декодирования t_{dc} и времени передачи $t_{\text{КИО}}$, имеющего плотность распределения вероятности $f(t_{\text{КИО}})$. Следовательно, необходимо, чтобы задержки передачи по КИО были меньше величины $t_{\text{КИО}}^{\text{пред}} - t_c - t_{dc}$.

Оптимальной конфигурацией нейросетевого кодека для передачи видеопотока при удовлетворении требований по величине задержки является такая, при которой выполняется условие:

$$\int_0^{t_{\text{КИО}}^{\text{пред}} - t_c - t_{dc}} f(t_{\text{КИО}}) dt \geq P,$$

при наименьшем $Msize$.

ТАБЛИЦА 2. Параметры законов распределения

TABLE 2. Parameters of Distribution Laws

ОГ КА	α	β	μ_1 / μ_2	σ_1 / σ_2	a	b
Ямал-601	[1,4.5]	[1,4]	–	–	–	–
Ямал-402	[1,4.5]	[1,4]	–	–	–	–
Старлинка 100–3000 байт	[0.3,3.6]	[0.8,4]	–	–	–	–
Старлинка 3000 байт	–	–	205/230	3/10	0.82	0.18
Старлинка 4000 байт	–	–	205/230	3/10	0.78	0.22
Старлинка 5000 байт	–	–	205/230	3/10	0.71	0.29
Старлинка 7000 байт	–	–	205/230	3/10	0.62	0.38
Старлинка 10000 байт	–	–	205/230	3/10	0.47	0.53
Старлинка 15000 байт	–	–	205/230	3/10	0.41	0.59

Таким образом, полученные знания о законах распределения величины задержки при использовании в качестве КИО ОГ Ямал-402, Ямал-601, «Старлинка» при различных полезных нагрузках могут быть использованы для определения оптимальной конфигурации нейросетевых кодеков, а также для моделирования КИО для передачи FPV-видеопотока космического сегмента ГОНСС с целью определения параметров КИО, позволяющих обеспечить максимум показателей эффективности их функционирования.

Заключение

В результате проведенных исследований были получены следующие результаты.

Во-первых, при использовании в качестве КИО ОГ КА на ГСО величина прикладной задержки подчиняется усеченному двухпараметрическому закону бета-распределения.

Во-вторых, при использовании в качестве КИО ОГ КА Ямал-601 зависимость величины прикладной задержки от размера передаваемой полезной нагрузки имеет вид логарифмической возрастающей функции, а в случае использования Ямал-402 – возрастающей линейной функции.

В-третьих, при использовании в качестве КИО ОГ КА на НОО и изменении полезной нагрузки от 100 до 3000 байт величина прикладной задержки подчиняется нормальному закону распределения.

В-четвертых, при использовании в качестве КИО ОГ КА на НОО и изменении полезной нагрузки от 3000 до 15000 байт закон распределения величин

прикладной задержки имеет бимодальный вид и представляет собой смесь двух нормальных законов распределения с неизменными параметрами и различными весовыми коэффициентами.

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.

Полученные результаты позволяют повышать эффективность выбора конфигураций нейросетевых кодеков для передачи видеопотока FPV-управления по спутниковому сегменту ГОНСС. Кроме того, результаты могут применяться при моделировании космического сегмента ГОНСС, построенного на основе различных орбитальных группировок космических аппаратов.

Список источников

1. Лукаев С.Л., Емельянов Н.А., Смирнов М.П. К вопросу дистанционного зондирования беспилотными летательными аппаратами в сельском хозяйстве // VI Международная научно-практическая конференция «Научно-образовательные и прикладные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции» (Чебоксары, Российская Федерация, 15 ноября 2022 г.). Чебоксары: Чувашский государственный аграрный университет, 2022. С. 632–635. EDN:IHDGLM
2. Хабибуллин И.И., Сахарова В.В., Сабиров Б.М. Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в сельском хозяйстве Российской Федерации // Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция молодых ученых «Прикладные исследования в агроинженерии» (Казань, Российская Федерация, 22 ноября 2023 г.). Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2024. С. 263–268. EDN:VSZMPJ
3. Кунин И.Е. Беспилотные летательные аппараты в сельском хозяйстве // XV Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство» (Белгород, Российская Федерация, 23–24 октября 2023 г.). Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. С. 117–121. EDN:EXZBEG
4. Глижинская Е.А. Использование беспилотных летательных аппаратов (дронов) в строительстве // Сборник статей магистрантов и аспирантов строительного факультета. СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2024. С. 106–112. EDN:BXIYTL
5. Кудасова А.С., Тютин А.Д., Сокольников Э.В. Применение беспилотных летательных аппаратов в строительстве // Инженерный вестник Дона. 2021. № 8(80). С. 31–38. EDN:ZSBCJR
6. Моисеева Н.А. Методы структурного синтеза каналов информационного обмена беспилотных транспортных средств // Международная молодежная конференция, приуроченная к 90-летию СГТУ имени Гагарина Ю.А. «Современные материалы и технологии» (Саратов, Российская Федерация, 27–28 мая 2020 г.). Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2020. С. 32–34. EDN:YXRPHY
7. Моисеев Д.В., Моисеева Н.А., Чужикова-Проскурнина О.Д. Реализация надёжных каналов информационного обмена между беспилотным транспортным средством и диспетчерским центром с высокой пропускной способностью // Сборник научных трудов «Морская стратегия и политика России в контексте обеспечения национальной безопасности и устойчивого развития в XXI веке». Севастополь: ЧВВМУ имени П.С. Нахимова, 2020. Т. 4(25). С. 258–262. EDN:EYEFHS
8. Моисеев Д.В., Моисеева Н.А., Чужикова-Проскурнина О.Д. Обеспечение надежности и высокой пропускной способности каналов информационного обмена между беспилотным транспортным средством и диспетчерским центром // III Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии в образовании и аграрном производстве» (Брянск, Российская Федерация, 18 марта 2020 г.). Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2020. С. 309–314. EDN:FDAYNQ
9. Chao H., Maheshwari A., Sudarsanan V., Tamaskar S., DeLaurentis D.A. UAV Traffic Information Exchange Network // Proceedings of the Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (Atlanta, Georgia, 25–29 June 2018). 2018. P. 3347. DOI:10.2514/6.2018-3347
10. de Resende H.C., Pinheiro J.F.N., Reiter P., Both C.B., Marquez-Barja J.M. 4G/5G performance of a multi-RAT UAV for medical parcel delivery // Proceedings of the 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC, Las Vegas, USA, 08–11 January 2022). IEEE, 2022. PP. 268–271. DOI:10.1109/CCNC49033.2022.9700528
11. Vijayaratnam M., Cagnazzo M., Valenzise G., Trioux A., Kieffer M. Towards Zero-Latency Video Transmission Through Frame Extrapolation // Proceedings of the International Conference on Image Processing (ICIP, Bordeaux, France, 18 October 2022). IEEE, 2022. PP. 2122–2126. DOI:10.1109/ICIP46576.2022.9897958

12. Bachhuber C., Steinbach E. A system for high precision glass-to-glass delay measurements in video communication // Proceedings of the International Conference on Image Processing (ICIP, Phoenix, USA, 25–28 September 2016). IEEE, 2016. PP. 2132–2136. DOI:10.1109/ICIP.2016.7532735
13. Bachhuber C., Steinbach E. A System for Precise End-to-End Delay Measurements in Video Communication // arXiv:1510.01134. 2015. DOI:10.48550/arXiv.1510.01134
14. Bachhuber C., Steinbach E., Freundl M., Reisslein M. On the Minimization of Glass-to-Glass and Glass-to-Algorithm Delay in Video Communication // IEEE Transactions on Multimedia. 2017. Vol. 20. Iss. 1. PP. 238–252. DOI:10.1109/TMM.2017.2726189
15. Kanj H., Trioux A., Cagnazzo M., Coudoux F.X., Corlay P., Kieffer M. Glass-to-Glass Delay Reduction: Encoding Rate Reduction vs. Video Frame Extrapolation // Proceedings of the 25th International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP, Poitiers, France, 27–29 September 2023). IEEE, 2023. PP. 1–6. DOI:10.1109/MMSP59012.2023.10337718
16. Bachhuber C., Steinbach E. Are Today's Video Communication Solutions Ready for the Tactile Internet? // Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW, San Francisco, USA, 19–22 March 2017). IEEE, 2017. PP. 1–6. DOI:10.1109/WCNCW.2017.7919060
17. Kumar R. Autonomous Control of Advanced Multirotor Unmanned Aerial Systems. PhD Thesis. University of Cincinnati, 2022.
18. Ebeid E., Skriver M., Terkildsen K.H., Jensen K., Schultz U.P. A survey of Open-Source UAV flight controllers and flight simulators // Microprocessors and Microsystems. 2018. Vol. 61. PP. 11–20. DOI:10.1016/j.micpro.2018.05.002
19. Al-Bahri M., Yankovsky A., Borodin A., Kirichek R. Testbed for Identify IoT-Devices Based on Digital Object Architecture // Proceedings of the 18th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking (NEW2AN 2018), and 11th Conference on Internet of Things, Smart Spaces (ruSMART 2018), St. Petersburg, Russian Federation, 27–29 August 2018. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, 2018. Vol. 11118. PP. 129–137. DOI:10.1007/978-3-030-01168-0_12. EDN:YAPAZN
20. Al-Bahri M., Yankovsky A., Kirichek R., Borodin A. Smart System Based on DOA & IoT for Products Monitoring & Anti-Counterfeiting // Proceedings of the 4th MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC, Muscat, Oman, 15–16 January 2019). IEEE, 2019. DOI:10.1109/ICBDSC.2019.8645610. EDN:TENQWL
21. Loughlin B.D. The PAL color television system // IEEE Transactions on Broadcast and Television Receivers. 1966. Vol. 12. Iss. 3. PP. 153–158.
22. Rec. ITU-R BT.470-7 (1970-1974-1986-1994-1995-1998). Conventional Television Systems.
23. Куйдин Р.А., Панин Д.В., Павлова Ю.Е., Палов П.В. Аналоговое и цифровое FPV // Материалы XXX Международной научно-практической конференции, Анапа, Российская Федерация, 12 мая 2021 г. «Наука. Образование. Инновации». Анапа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский центр экономических и социальных процессов» в Южном Федеральном округе, 2021. С. 113–116. EDN:JLXBKT
24. Townsend G.B. Colour performance of the Secam colour television system // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1963. Vol. 110. Iss. 8. PP. 1341–1349. DOI:10.1049/piee.1963.0190
25. Suzuki Y., Gai T., Yamakawa M., Sugiyura H. NTSC/PAL/SECAM digital video decoder with high-precision resamplers // IEEE Transactions on Consumer Electronics. 2005. Vol. 51. Iss. 1. PP. 287–294. DOI:10.1109/TCE.2005.1405734
26. Singh S., Lee H.W., Tran T.X., Zhou Y., Sichert M.L., Güvenç I. FPV Video Adaptation for UAV Collision Avoidance // IEEE Open Journal of the Communications Society. 2021. Vol. 2. PP. 2095–2110. DOI:10.1109/ojcoms.2021.3106274. EDN:ADCYJS
27. Rec. ITU-T H.264 (03/2003). Advanced Video Coding for Generic Audio-Visual Services.
28. ISO/IEC 23008 2:2013 (12/2013). Information technology. High efficiency coding and media delivery in heterogeneous environments. Part 2. High Efficiency Video Coding.
29. Rec. ITU-T H.266 (09/2023). Versatile Video Coding.
30. Bankoski J., Koleszar J., Quillio L., Salonen J., Wilkins P., Xu Y. VP8 Data Format and Decoding Guide. RFC 6386. 2011. DOI:10.17487/rfc6386
31. Grange A., de Rivaz P., Hunt J. VP9 Bitstream & Decoding Process Specification – v0.6. Google, Inc., 2016.
32. de Rivaz P., Haughton J. AV1 Bitstream & Decoding Process Specification. The Alliance for Open Media, 2018.
33. Ченский А.А., Березкин А.А., Киричек Р.В., Захаров А.А. Исследование методов латентного сжатия видеопотока при FPV управлении беспилотными системами // Электросвязь. 2024. № 6. С. 46–56. DOI:10.34832/ELSV.2024.55.6.014. EDN:FWBEQE
34. Ченский А.А., Березкин А.А., Киричек Р.В., Захаров А.А. Исследование методов квантования латентного пространства вариационного автокодировщика для кадров FPV видеопотока. Часть I // Электросвязь. 2024. № 6. С. 10–16. DOI:10.34832/ELSV.2024.55.6.011. EDN:GPNYSJ
35. Березкин А.А., Ченский А.А., Вивчарь Р.М., Киричек Р.В. Исследование методов квантования латентного пространства вариационного автокодировщика для кадров FPV видеопотока. Часть II // Электросвязь. 2024. № 7. С. 26–35. DOI:10.34832/ELSV.2024.56.7.005. EDN:NZSTKD
36. 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. 28–37. DOI:10.34832/ELSV.2024.58.9.004. EDN:MWXFXN
37. 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
38. Березкин А.А., Ченский А.А., Киричек Р.В. Маскирование кодированного FPV видеопотока при управлении БПЛА. Часть I. Модели и методика // Электросвязь. 2024. № 12-2. С. 32–45. DOI:10.34832/ELSV.2024.61.12.005. EDN:PDIIJE
39. Березкин А.А., Ченский А.А., Киричек Р.В. Маскирование кодированного FPV видеопотока при управлении БПЛА. Часть II. Обучение моделей и эксперименты // Электросвязь. 2025. № 5. С. 34–41. DOI:10.34832/ELSV.2025.67.5.005. EDN:HBJWPP

40. Jia Z., Li B., Li J., Xie W., Qi L., Li H., et al. Towards Practical Real-Time Neural Video Compression // arXiv:2502.20762. 2025. DOI:10.48550/arXiv.2502.20762
41. Kirichek R., Pham V.D., Kolehkin A., Al-Bahri M., Paramonov A. Transfer of Multimedia Data via LoRa // Proceedings of the 17th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking (NEW2AN 2017), and 3d Conference on Internet of Things, Smart Spaces (ruSMART 2017), and Third International Workshop on Nano-scale Computing and Communications, NsCC 2017, St. Petersburg, Russian Federation, 28–30 August 2017. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, 2017. Vol. 1053. PP. 708–720. DOI:10.1007/978-3-319-67380-6_67. EDN:ZHIASL
42. 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 // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 1. С. 7–17. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-1-7-17. EDN:FTRJGU
43. Jamalipour A. Low Earth Orbital Satellites for Personal Communication Networks. Artech House, Inc., 1997. 273 p.
44. Xia Z., Liu L., Hu C., Bu X. Inter-Satellite Link Channel Characterization of Laser Communication Systems // Proceedings of the 11th International Conference on Information, Communication and Networks (ICICN, Xi'an, China, 17–20 August 2023). IEEE, 2023. PP. 426–431. DOI:10.1109/ICICN59530.2023.10393617
45. Dong C., Li X. Design of a Data Distribution System for High Earth Orbit Satellites // Proceedings of the 8th International Conference on Electrical, Mechanical and Computer Engineering (ICEMCE, Xi'an, China, 25–27 October 2024). IEEE, 2024. PP. 1615–1619. DOI:10.1109/ICEMCE64157.2024.10862589
46. Roberts L.D. A lost Connection: Geostationary Satellite Networks and the International Telecommunication Union // Berkeley Technology Law Journal. 2000. Vol. 15. Iss. 3. P. 1095 DOI:10.15779/Z38DQ1J
47. Гриценко А.А. Спутниковые системы класса HTS // Connect. 2017. № 4. С. 120.
48. Li J., Li H., Lai Z., Wu Q., Liu Y., Zhang Q., et al. SatGuard: Concealing Endless and Bursty Packet Losses in LEO Satellite Networks for Delay-Sensitive Web Applications // Proceedings of the ACM Web Conference 2024 (Singapore, Singapore, 13–17 May 2024). New York: Association for Computing Machinery, 2024. PP. 3053–3063. DOI:10.1145/3589334.3645639
49. Michel F., Trevisan M., Giordano D., Bonaventure O. A first look at Starlink performance // Proceedings of the 22nd ACM Internet Measurement Conference (Nice, France, 25–27 October 2022). New York: Association for Computing Machinery, 2022. PP. 130–136. DOI:10.1145/3517745.356141
50. Михалев А.В., Белецкий А.Б., Лебедев В.П., Сыренова Т.Е., Хахинов В.В. Оптические эффекты полета ракеты-носителя “Протон-М” со спутником Ямал-601 в дальней от места старта зоне // Космические исследования. 2022. Т. 60. № 2. С. 125–133. DOI:10.31857/S0023420622020054. EDN:RNIXIC
51. Berger V.W., Zhou Y.Y. Kolmogorov–Smirnov Test: Overview // Wiley StatsRef: Statistics Reference Online. John Wiley & Sons, 2014. DOI:10.1002/9781118445112.stat06558
52. Gupta A.K., Nadarajah S. Handbook of Beta Distribution and Its Applications. Boca Raton: CRC press, 2004. 600 p. DOI:10.1201/9781482276596

References

1. Lukaev S.L., Emelyanov N.A., Smirnov M.P. To the question of remote sensing by drones in agriculture. *Proceedings of the Vllth International Scientific and Practical Conference on Scientific, Educational and Applied Aspekts of Production and Processing of Agricultural Products, 15 November 2022, Cheboksary, Russian Federation*. Cheboksary: Chuvash State Agrarian University Publ.; 2022. p.632–635. (in Russ.) EDN:IHDGLM
2. Habibullin I.I., Saharova V.V., Sabirov B.M. Use of unmanned aerial vehicles (UAV) in agriculture of the Russian Federation. *Proceedings of the All-Russian (National) Scientific and Practical Conference of Young Scientists on Applied Research in Agricultural Engineering, 22 November 2023, Kazan, Russian Federation*. Kazan: Kazan State Agrarian University Publ.; 2024. p.263–268. (in Russ.) EDN:VSZMPJ
3. Kunin I.E. Unmanned aerial vehicles in agriculture. *Proceedings of the XVth International Youth Forum "Education. Science. Production", 23–24 October 2023, Belgorod, Russian Federation*. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov Publ.; 2023. p.117–121. (in Russ.) EDN:EXZBEG
4. Glizhinskaja E.A. Utilization of unmanned aerial vehicle (drones) in the construction industry. *A Collection of Articles by Master's and Postgraduate Students of the Faculty of Civil Engineering*. St. Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering Publ.; 2024. p.106–112. (in Russ.) EDN:BXIYTL
5. Kudasova A.S., Tyutina A.D., Sokolnikova E.V. The use of unmanned aerial vehicles in construction. *Engineering journal of Don*. 2021;8(80):31–38. (in Russ.) EDN:ZSBCJR
6. Moiseeva N.A. Methods of structural synthesis of information exchange channels of unmanned aircraft vehicles. *Proceedings of the International Youth Conference dedicated to the 90th Anniversary of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov on Modern Materials and Technologies, Saratov, Russian Federation, 27–28 May 2020*. Saratov: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov Publ.; 2020. p.32–34. (in Russ.) EDN:YXRFHY
7. Moiseev D.V., Moiseeva N.A., Chuzhikova-Proskurnina O.D. Implementation of reliable channels of information exchange between an unmanned vehicle and a high-capacity dispatch center. *Collection of Scientific Papers on Maritime Strategy and Policy of Russia in the Context of Ensuring National Security and Sustainable Development in the 21st Century, vol.4(25)*. Sevastopol: Nakhimov Black Sea Higher Naval School Publ.; 2020. p.258–262. (in Russ.) EDN:EYEFHS
8. Moiseev D.V., Moiseeva E.A., Chuzhikova-Proskurnina O.D. Ensuring reliability and high capacity of information exchange channels between unmanned vehicles and dispatch center. *Proceedings of the IIIrd International Scientific and Practical Conference on Information Technologies in Education and Agricultural Production, 18 March 2020, Bryansk, Russian Federation*. Bryansk: Bryansk State Agrarian University Publ.; 2020. p.309–314. (in Russ.) EDN:FDAYNQ
9. Chao H., Maheshwari A., Sudarsanan V., Tamaskar S., DeLaurentis D.A. UAV Traffic Information Exchange Network. *Proceedings of the Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 25–29 June 2018, Atlanta, Georgia*. 2018. p.3347. DOI:10.2514/6.2018-3347
10. de Resende H.C., Pinheiro J.F.N., Reiter P., Both C.B., Marquez-Barja J.M. 4G/5G performance of a multi-RAT UAV for medical parcel delivery. *Proceedings of the 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference, CCNC, 08–11 January 2022, Las Vegas, USA*. IEEE; 2022. p.268–271. DOI:10.1109/CCNC49033.2022.9700528

11. Vijayaratnam M., Cagnazzo M., Valenzise G., Trioux A., Kieffer M. Towards Zero-Latency Video Transmission Through Frame Extrapolation. *Proceedings of the International Conference on Image Processing, ICIP, 18 October 2022, Bordeaux, France*. IEEE; 2022. p.2122–2126. DOI:10.1109/ICIP46576.2022.9897958
12. Bachhuber C., Steinbach E. A system for high precision glass-to-glass delay measurements in video communication. *Proceedings of the International Conference on Image Processing, ICIP, 25–28 September 2016, Phoenix, USA*. IEEE; 2016. p.2132–2136. DOI:10.1109/ICIP.2016.7532735
13. Bachhuber C., Steinbach E. A System for Precise End-to-End Delay Measurements in Video Communication. *arXiv:1510.01134*. 2015. DOI:10.48550/arXiv.1510.01134
14. Bachhuber C., Steinbach E., Freundl M., Reisslein M. On the Minimization of Glass-to-Glass and Glass-to-Algorithm Delay in Video Communication. *IEEE Transactions on Multimedia*. 2017;20(1):238–252. DOI:10.1109/TMM.2017.2726189
15. Kanj H., Trioux A., Cagnazzo M., Coudoux F.X., Corlay P., Kieffer M. Glass-to-Glass Delay Reduction: Encoding Rate Reduction vs. Video Frame Extrapolation. *Proceedings of the 25th International Workshop on Multimedia Signal Processing, MMSP, 27–29 September 2023, Poitiers, France*. IEEE; 2023. p.1–6. DOI:10.1109/MMSP59012.2023.10337718
16. Bachhuber C., Steinbach E. Are Today's Video Communication Solutions Ready for the Tactile Internet? *Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference Workshops, WCNCW, 19–22 March 2017, San Francisco, USA*. IEEE; 2017. p.1–6. DOI:10.1109/WCNCW.2017.7919060
17. Kumar R. *Autonomous Control of Advanced Multirotor Unmanned Aerial Systems*. PhD Thesis. University of Cincinnati; 2022.
18. Ebeid E., Skriver M., Terkildsen K.H., Jensen K., Schultz U.P. A survey of Open-Source UAV flight controllers and flight simulators. *Microprocessors and Microsystems*. 2018;61:11–20. DOI:10.1016/j.micpro.2018.05.002
19. Al-Bahri M., Yankovsky A., Borodin A., Kirichek R. Testbed for Identify IoT-Devices Based on Digital Object Architecture. *Proceedings of the 18th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking, NEW2AN 2018, and 11th Conference on Internet of Things, Smart Spaces, ruSMART 2018, 27–29 August 2018, St. Petersburg, Russian Federation. Lecture Notes in Computer Science, vol.11118*. Cham: Springer; 2018. p.129–137. DOI:10.1007/978-3-030-01168-0_12. EDN:YAPAZN
20. Al-Bahri M., Yankovsky A., Kirichek R., Borodin A. Smart System Based on DOA & IoT for Products Monitoring & Anti-Counterfeiting. *Proceedings of the 4th MEC International Conference on Big Data and Smart City, ICBDS, 15–16 January 2019, Muscat, Oman*. IEEE; 2019. DOI:10.1109/ICBDS.2019.8645610. EDN:TENQWL
21. Loughlin B.D. The PAL color television system. *IEEE Transactions on Broadcast and Television Receivers*. 1966;12(3): 153–158.
22. Rec. ITU-R BT.470-7 (1970-1974-1986-1994-1995-1998). *Conventional Television Systems*.
23. Kuidin R.A., Panin D.V., Pavlova U.E., Palov P.V. Analogue and digital FPV. *Proceedings of the XXXth International Scientific and Practical Conference "Science. Education. Innovations"*, Anapa, Russian Federation, 12 May 2021. Anapa: LLC "Research Center for Economic and Social Processes" in the Southern Federal District, 2021. p.113–116. (in Russ.). EDN:JLXBKT
24. Townsend G.B. Colour performance of the Secam colour television system. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 1963;110(8):1341–1349. DOI:10.1049/piee.1963.0190
25. Suzuki Y., Gai T., Yamakawa M., Sugiura H. NTSC/PAL/SECAM digital video decoder with high-precision resamplers. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 2005;51(1):287–294. DOI:10.1109/TCE.2005.1405734
26. Singh S., Lee H.W., Tran T.X., Zhou Y., Sichitiu M.L., Güvenç I. FPV Video Adaptation for UAV Collision Avoidance. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2021;2:2095–2110. DOI:10.1109/ojcoms.2021.3106274. EDN:ADCYJS
27. Rec. ITU-T H.264 (03/2003). *Advanced Video Coding for Generic Audio-Visual Services*.
28. ISO/IEC 23008 2:2013 (12/2013). *Information technology. High efficiency coding and media delivery in heterogeneous environments. Part 2. High Efficiency Video Coding*.
29. Rec. ITU-T H.266 (09/2023). *Versatile Video Coding*.
30. Bankoski J., Koleszar J., Quillio L., Salonen J., Wilkins P., Xu Y. *VP8 Data Format and Decoding Guide*. RFC 6386. 2011. DOI:10.17487/rfc6386
31. Grange A., de Rivaz P., Hunt J. *VP9 Bitstream & Decoding Process Specification – v0.6*. Google, Inc.; 2016.
32. de Rivaz P., Haughton J. *AV1 Bitstream & Decoding Process Specification*. The Alliance for Open Media; 2018.
33. Berezkin A.A., Chenskiy A.A., Kirichek R.V., Zaharov A.A. Research of latent video stream compression methods for FPV control of UAVs. *Electrosvyaz*. 2024;6:46–56. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2024.55.6.014. EDN:FWBEQE
34. Berezkin A.A., Chenskiy A.A., Kirichek R.V., Zaharov A.A. Research of latent space quantization methods of variational autoencoder for FPV video stream frames. Part I. *Electrosvyaz*. 2024;6:10–16. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2024.55.6.011. EDN:GPNYSJ
35. Berezkin A.A., Chenskiy A.A., Vivchar R.M., Kirichek R.V. Research of latent space quantization methods of variational autoencoder for FPV video stream frames. Part II. *Electrosvyaz*. 2024;7:26–35. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2024.56.7.005. EDN:NZSTKD
36. Berezkin 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. *Electrosvyaz*. 2024;9:28–37. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2024.58.9.004. EDN:MWXFXN
37. Berezkin 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 system. Part II. Experiment. *Electrosvyaz*. 2024;10: 59–69. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2024.59.10.009. EDN:IWGLJY
38. Berezkin A.A., Chenskiy A.A., Kirichek R.V. Masking encrypted FPV video stream when controlling UAVs. Part I. Models and methodology. *Electrosvyaz*. 2024;12-2:32–45. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2024.61.12.005. EDN:PDIIJE
39. Berezkin A.A., Chenskiy A.A., Kirichek R.V. Masking encrypted FPV video stream when controlling UAVs. Part II: Models training and experiments. *Electrosvyaz*. 2025;5:34–41. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2025.67.5.005. EDN:HBJWPW
40. Jia Z., Li B., Li J., Xie W., Qi L., Li H., et al. Towards Practical Real-Time Neural Video Compression. *arXiv:2502.20762*. 2025. DOI:10.48550/arXiv.2502.20762

41. Kirichek R., Pham V.D., Kolehkin A., Al-Bahri M., Paramonov A. Transfer of Multimedia Data via LoRa. *Proceedings of the 17th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking (NEW2AN 2017), and 3d Conference on Internet of Things, Smart Spaces (ruSMART 2017), and Third International Workshop on Nano-scale Computing and Communications, NsCC 2017, 28–30 August 2017, St. Petersburg, Russian Federation. Lecture Notes in Computer Science, vol.1053*. Cham: Springer; 2017. p.708–720. DOI:10.1007/978-3-319-67380-6_67. EDN:ZHIASL
42. 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
43. Jamalipour A. *Low Earth Orbital Satellites for Personal Communication Networks*. Artech House, Inc.; 1997. 273 p.
44. Xia Z., Liu L., Hu C., Bu X. Inter-Satellite Link Channel Characterization of Laser Communication Systems. *Proceedings of the 11th International Conference on Information, Communication and Networks, ICICN, 17–20 August 2023, Xi'an, China*. IEEE; 2023. p.426–431. DOI:10.1109/ICICN59530.2023.10393617
45. Dong C., Li X. Design of a Data Distribution System for High Earth Orbit Satellites. *Proceedings of the 8th International Conference on Electrical, Mechanical and Computer Engineering, ICEMCE, 25–27 October 2024, Xi'an, China*. IEEE; 2024. p.1615–1619. DOI:10.1109/ICEMCE64157.2024.10862589
46. Roberts L.D. A lost Connection: Geostationary Satellite Networks and the International Telecommunication Union. *Berkeley Technology Law Journal*. 2000;15(3):1095 DOI:10.15779/Z38DQ1J
47. Gritsenko A.A. HTS class satellite systems. *Connect*. 2017;4:120. (in Russ.)
48. Li J., Li H., Lai Z., Wu Q., Liu Y., Zhang Q., et al. SatGuard: Concealing Endless and Bursty Packet Losses in LEO Satellite Networks for Delay-Sensitive Web Applications. *Proceedings of the ACM Web Conference 2024, 13–17 May 2024, Singapore, Singapore*. New York: Association for Computing Machinery; 2024. p.3053–3063. DOI:10.1145/3589334.3645639
49. Michel F., Trevisan M., Giordano D., Bonaventure O. A first look at Starlink performance. *Proceedings of the 22nd ACM Internet Measurement Conference, 25–27 October 2022, Nice, France*. New York: Association for Computing Machinery; 2022. p.130–136. DOI:10.1145/3517745.356141
50. Mihalev A.V., Beletskij A.B., Lebedev V.P., Syrenova T.E., Hahinov V.V. Optical effects of the Proton-M launch vehicle flight with Yamal-601 satellite in the far zone from the launch site. *Kosmicheskie issledovaniya*. 2022;60(2);125–133. (in Russ.) DOI:10.31857/S0023420622020054. EDN:RNIXIC
51. Berger V.W., Zhou Y.Y. Kolmogorov-Smirnov Test: Overview. *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*. John Wiley & Sons; 2014. DOI:10.1002/9781118445112.stat06558
52. Gupta A.K., Nadarajah S. *Handbook of Beta Distribution and Its Applications*. Boca Raton: CRC press; 2004. 600 p. DOI:10.1201/9781482276596

Статья поступила в редакцию 16.06.2025; одобрена после рецензирования 10.07.2025; принята к публикации 15.07.2025.

The article was submitted 16.06.2025; approved after reviewing 10.07.2025; accepted for publication 15.07.2025.

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
 <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.