

Научная статья

УДК 004.056(075.58)

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-1-7-15>

EDN:OGFQRW



# Требования к качеству видеопотока при управлении беспилотными системами от первого лица

 Александр Александрович Березкин, [berezkin.aa@sut.ru](mailto:berezkin.aa@sut.ru)

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

## Аннотация

*Управление беспилотными системами от первого лица предполагает передачу видеопотока от беспилотной системы к внешнему пилоту. Качество передаваемого видеопотока напрямую влияет на оценку внешним пилотом текущей полетной обстановки и формирование корректных и своевременных управляющих воздействий. В статье исследуется зависимость вероятности достижения цели функционирования беспилотной системы от значений объективных метрик качества видеопотока (SSIM, PSNR).*

**Актуальность** работы обусловлена необходимостью определения параметров системы видеокодирования при FPV-управлении беспилотной системы в зависимости от заданной вероятности достижения цели ее функционирования.

**Используемые методы:** при обработке результатов натуральных экспериментов были использованы методы статистического анализа, теории планирования эксперимента и теории вероятностей.

**Результаты:** обоснованы количественные значения требований к объективным метрикам качества передаваемого видеопотока при использовании стандартных видеокодеков для заданной вероятности достижения цели функционирования при FPV-управлении беспилотными системами различного назначения.

**Новизна** полученных результатов заключается в том, что требования к показателям качества передаваемого видеопотока задаются не экспертным путем, а экспериментально – на основе анализа качества передаваемого видеопотока, позволившего сформировать управление беспилотной системой, при котором были достигнуты цели ее функционирования.

**Практическая значимость:** определены требуемые значения показателей качества FPV-видеопотока, при которых возможно FPV-управление при заданной вероятности достижения цели функционирования беспилотной системы.

**Ключевые слова:** управление от первого лица, беспилотная система, беспилотное транспортное средство, качество видеопотока, обоснование требований

**Финансирование:** Научная статья подготовлена в рамках прикладных научных исследований СПбГУТ, регистрационный номер 1025040100166-2-2.2.4;2.2.5;2.2.6 в ЕГИСУ НИОКТР.

**Ссылка для цитирования:** Березкин А.А. Требования к качеству видеопотока при управлении беспилотными системами от первого лица // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 1. С. 7–15. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-1-7-15. EDN:OGFQRW

Original research  
<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-1-7-15>  
EDN:OGFQRW

# Quality Requirements for First Person View Unmanned Systems Control Service

✉ **Alexandr A. Berezkin**, [berezkin.aa@sut.ru](mailto:berezkin.aa@sut.ru)

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

## Annotation

*Unmanned systems' first-person view control requires transmitting the video stream from the unmanned system to its operator. The quality of the transmitted video stream directly affects the external pilot's assessment of the current flight situation and the formation of appropriate and timely control commands. The paper investigates the dependence of the unmanned system's operational objective achievement probability on the objective video stream quality metrics (SSIM, PSNR). **Relevance** of this work is based on the necessity to determine the unmanned system FPV control video coding system parameters depending on the specified unmanned system's operational objective achievement probability.*

**Methods used.** *When processing the results of natural experiments, methods of statistical analysis, experimental design theory and probability theory were used.*

**Results.** *Quantitative values of video stream quality metrics requirements are justified when using standard video codecs for a given operational objective achievement probability in unmanned systems FPV control for various purposes.*

**Novelty** of the results is that the requirements for the transmitted video stream quality metrics are determined not by experts, but by experiments based on the analysis of the transmitted video stream quality, which allowed to develop the unmanned system control that achieved its operational goals.

**Practical significance.** *The required values of FPV video stream quality metrics have been determined, at which FPV control is possible with a given unmanned system's operational objective achievement probability.*

**Keywords:** *first person view control, unmanned system, unmanned ground vehicle, video stream quality, requirements estimation*

**Funding:** *The scientific article was prepared within the framework of applied scientific research SPbSUT, registration number 1025040100166-2-2.2.4;2.2.5;2.2.6 in the information system (<https://www.rosrid.ru/information>).*

**For citation:** Berezkin A.A. Quality Requirements for First Person View Unmanned Systems Control Service. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(1):7–15. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-1-7-15. EDN:OGFQRW

## Введение

Беспилотная система (БС) – это электромеханическая система, которая может применяться для выполнения заданий без оператора на борту [1]. К ним относятся: беспилотные наземные транспортные средства (БНТС) [2]; беспилотные надводные аппараты (БНА) [3]; беспилотные подводные аппараты (БПА) [4]; беспилотные космические системы (БКС) [1]; беспилотные воздушные суда (БВС) [5]. Из них наибольшее применение получили БВС, ко-

торые применяются в широком множестве областей народного хозяйства: сельском хозяйстве, строительстве, картографии, экологическом мониторинге, мониторинге линейных энергетических линий [6–8], кинематографе [9], сборе данных с мобильных сенсорных сетей [10], защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций [11].

Среди широкого круга задач, которые выполняют БС, существуют и такие, автоматизация которых невозможна или затруднена. К ним, в частности, относится оценка обстановки в чрезвычайных

ситуациях, поиск людей в зонах бедствий, доставка продуктов питания и медикаментов. К подобным задачам относятся и съемка фильмов в кинематографе. Для выполнения таких задач может применяться определенный тип управления БС: управление от первого лица (*от англ. First Person View control – FPV-управление*) [6]. FPV-управление предполагает передачу телеметрических данных и видеопотока в сторону внешнего пилота, а также команд управления в направлении БС. Видеопоток и телеметрические данные формируют у внешнего пилота понимание текущей полетной обстановки на стороне БС, на основании которого, а также – текущей компетенции, внешний пилот отправляет через технические средства станции внешнего пилота поток команд управления к БС.

В системах визуального управления, включая системы FPV-управления, критическим параметром, характеризующим минимизацию временной задержки в канале «сенсор–контроллер», является задержка типа «стекло–алгоритм» (G2A, *аббр. от англ. Glass-to-Algorithm*). Данный параметр определяется как временной интервал между моментом регистрации событийной информации (фотонного потока, прошедшего сквозь оптическую систему видеокamеры) и моментом доступности первого сформированного видеокadра для алгоритма цифровой обработки. В случае отображения видеопотока оператору-наблюдателю основным показателем качества становится задержка типа «стекло–стекло» (G2G, *аббр. от англ. Glass-to-Glass latency*), предъявляющая менее жесткие требования. Задержка G2G определяется как временной интервал от прохождения фотонного потока некоторого события через оптику видеокamеры до момента передачи этого оптического сигнала через дисплейную систему оператора (рисунок 1).

В соответствии с вышеизложенным, будем называть такой канал передачи информации «верхнего уровня» *каналом информационного обмена (КИО)*, где задержка G2G характеризует временную задержку передачи видеокadра полетной обстановки до элементов отображения на стороне станции

внешнего пилота. Видеопоток, телеметрические данные и команды управления передаются через КИО. Большой объем видеопотока при передаче приводит к повышенным требованиям к полосе пропускания канала связи и большим задержкам прикладного уровня (задержкам в КИО). В интересах решения этой проблемы применяются механизмы сжатия кадров видеопотока с потерями [6] путем использования как стандартных (H264, H265, H266, VP8, VP9, AV1 [12–14]), так и нейросетевых (NVC [6–8], DCVC-RT [15]) видеокодеков.

Как известно, увеличение степени сжатия FPV-видеопотока приводит к увеличению искажения отображаемой полетной ситуации. Чем больше такие искажения, тем меньше корректной высококачественной информации получает внешний пилот и, как следствие, тем больше отправляемые команды управления не соответствуют такой ситуации. В результате при достаточном сильном сжатии кадров видеопотока команды управления перестают соответствовать полетной ситуации, что ставит под угрозу достижение цели функционирования БС. Также существует риск ее потери или повреждения. Соответственно, возникает задача оценки уровня искажения отражаемой полетной ситуации, при котором достижение целей функционирования БС становится невозможным. При рассмотрении FPV-управления БС как услуги реального времени, возникает проблема формирования требований к качеству видеопотока, которое необходимо для оказания такой услуги.

Подход к обоснованию требований к качеству видеопотока был сформулирован в работе [16], исходя из вероятности достижения цели функционирования БС. В рамках данного подхода на первом этапе вычисляются метрики качества всех кадров видеопотока, где их значения в целом представляют собой средние значения метрик отдельных кадров. После этого оценивается вероятность достижения цели функционирования БС на основе оценки видеопотоков, при которых удалось достичь эту цель.

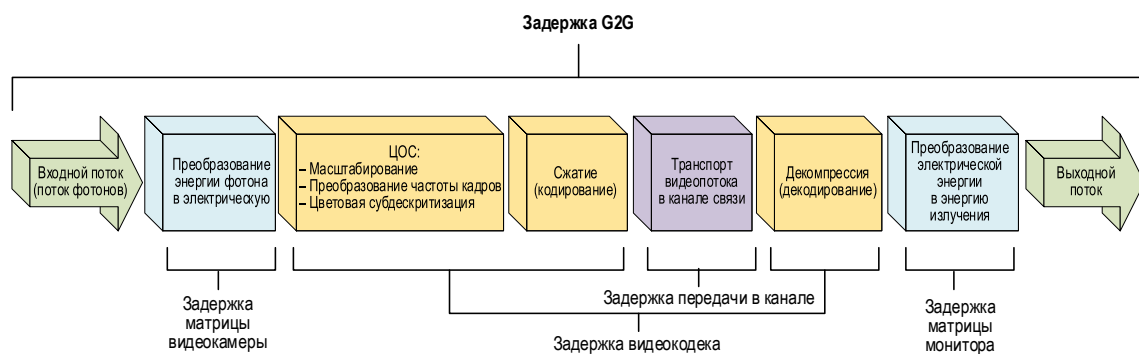


Рис. 1. Задержка G2G  
Fig. 1. G2G Latency

Требования оцениваются как средние значения метрик при вероятности, большей или равной требуемой. В качестве показателей качества отдельных кадров и всего видеопотока рассматриваются объективные метрики качества видеопотока: пиковое отношение сигнала к шуму (PSNR, аббр. от англ. Peak Sound-to-Noise Ratio) [17, 18] и структурное сходство (SSIM, аббр. от англ. Structural Similarity) [19].

Целью настоящей работы является апробация вышеописанного подхода и определение требуемых значений SSIM и PSNR, при которых цель функционирования БС достигается при заданной вероятности. Для этого использованы вероятности достижения цели и метрики качества видеопотока.

В научно-технической литературе существуют публикации, в которых требования к услуге FPV-управления от первого лица исследуются экспериментально с привлечением БС в реальной и / или моделируемой среде. При этом в большинстве из данных исследований рассматриваются: задержки и потери кадров видеопотока [20], общие моменты FPV-управления [21, 22], требования к показателю уровня принимаемого сигнала RSSI (аббр. от англ. Received Signal Strength Indicator) [23].

Получение требований к значениям метрик качества видеопотока на основе испытаний в реальной или моделируемой среде выполняется в единичных исследованиях. Например, работа [24] – испытания проводились в симуляторе управления БС Orga FPV.SkyDive; задержка видеопотока варьировалась в пределах 14–34 мс со средним значением 25 мс; потери пакетов составляли 0 %; задержка команд управления составляла менее 1 мс; к испытаниям были привлечены 16 пилотов; в качестве метрики качества использовалась широко распространенная [25–27] субъективная метрика качества видеопотока – средняя оценка мнений (MOS, аббр. от англ. Mean Opinion Score).

В результате авторами в [24] были сделаны следующие выводы:

1) влияние разрешения на качество восприятия кадров видеопотока – разрешение 800×600 и более увеличивают метрику MOS при полосе пропускания 3–8 Мбит/с;

2) при низкой полосе пропускания качество восприятия кадров видеопотока возрастает при увеличении интенсивности видеопотока с 30 до 60 FPS (аббр. от англ. Frame Per Second – количество кадров в секунду); при средней полосе пропускания (3 Мбит/с и выше) увеличение интенсивности видеопотока с 30 до 60 FPS не оказывает существенного влияния на качество восприятия;

3) существует значительная проблема так называемой «симуляционной болезни» и, как следствие, резкое падение желания пилотов продолжать испытания при падении метрики MOS ниже 3,5.

Новизна настоящей работы заключается в том, что оценка требований к качеству видеопотока проводится на основе подхода [16] с натурными экспериментами по прохождению динамического маршрута при управлении БС от первого лица. При этом применяются объективные метрики качества PSNR и SSIM.

### Методика экспериментов

Структурная схема поля проведения эксперимента представлена на рисунке 2 и включает в себя статические блоки в количестве 7 шт. и динамически произвольно перемещающиеся объекты-препятствия (роботы-пылесосы) в количестве 6 шт. (рисунок 3).

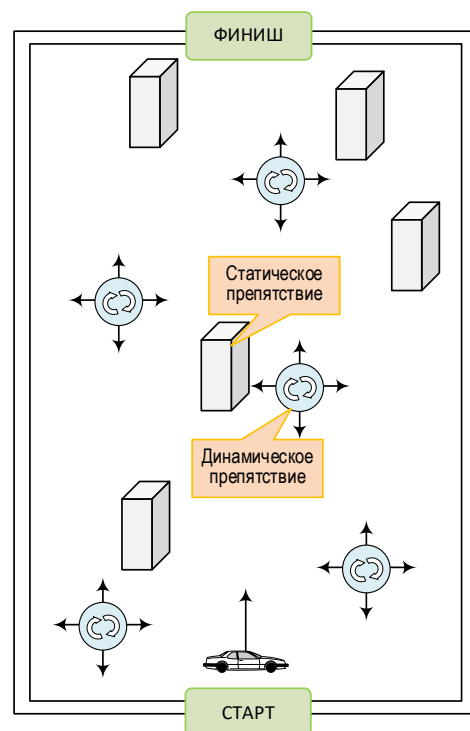


Рис. 2. Конфигурация экспериментов

Fig. 2. Experiments Configuration



Рис. 3. Фото зоны эксперимента

Fig. 3. Experiments Demonstration

Задачей оператора, управляющего БНТС от первого лица, является преодоление полосы препятствий исключительно на основе получаемого видеопотока (рисунок 4). При успешном прохождении фиксируется «успех», при столкновении со статическим или динамическим препятствием – «неуспех» прохождения.

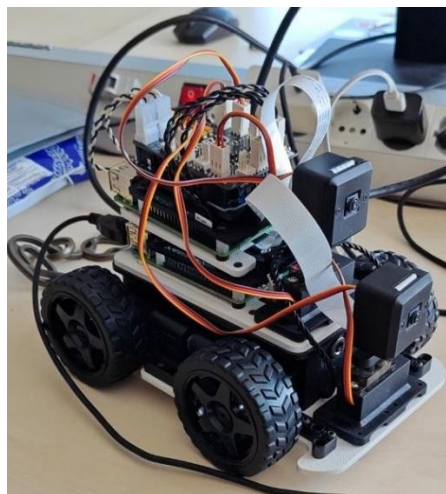


Рис. 4. Беспилотное наземное транспортное средство

Fig. 4. Unmanned Ground Vehicle

Видеопоток записывается камерой, установленной на БНТС и подключенной по интерфейсу MIPI-CSI с последующей передачей по Wi-Fi с ограничением полосы пропускания до 300 Кбит/с и потерями пакетов по значению параметра *loss* соответствующей конфигурации испытаний. Вариация параметра *loss* обеспечивает изменчивость качества получаемого видеопотока, сжатого стандартным видеокодеком AVC/H.264. Выбор только одного параметра *loss* обоснован тем, что существует зависимость между потерями пакетов и объективными метриками качества видеопотока при использовании видеокодека AVC/H.264 [28]. Управление передачей видеопотока осуществляется с помощью прикладного протокола RTP. Передача команд управления осуществляется по Bluetooth. Натурные эксперименты проводятся в 6 конфигурациях (таблица 1). В каждой конфигурации проводится 100 заездов. Итого проведено 600 заездов.

ТАБЛИЦА 1. Конфигурации натурных экспериментов

TABLE 1. Full-Scale Experiments Configuration

Номер конфигурации	<i>loss</i> , %
1	0
2	1
3	5
4	10
5	15
6	20

Для последующей оценки качества видеопотока с помощью объективных метрик записывается два видеопотока: исходный на БНТС и восстановленный на станции внешнего пилота (СВП). Часть заездов проводится в дневное время суток (рисунок 5), а часть – в ночное (рисунок 6). При каждом заезде статические и динамические препятствия расставляются заново в случайном порядке. В результате каждого заезда фиксируются «успех» – *success*. Показатель *success* может быть равен 0 в случае столкновения БНТС с препятствием или 1 в случае успешного прохождения динамического маршрута.



a)



b)

Рис. 5. Пример кадров видеопотока в дневное время суток: а) исходный кадр; б) восстановленный кадр

Fig. 5. Video Stream Frames Example in Day: a) Source Frame; b) Restored Frame



a)



b)

Рис. 6. Пример кадров видеопотока в ночное время суток: а) исходный кадр; б) восстановленный кадр

Fig. 6. Video Stream Frames Example in Night: a) Source Frame; b) Restored Frame

На основе исходного и восстановленного видеопотока для каждой конфигурации испытаний рассчитываются средние значения метрик SSIM и PSNR и вероятности успешного прохождения динамического маршрута ( $P$ ). На основе этих значений в соответствии с [16] предъявляются требования к минимальным значениям метрик SSIM и PSNR для FPV-управления БС при различных значениях  $P$ .

### Результаты экспериментов

Результаты экспериментов показали, что вероятность успеха прохождения динамического маршрута зависит от значений объективных метрик качества – SSIM и PSNR (рисунок 7).

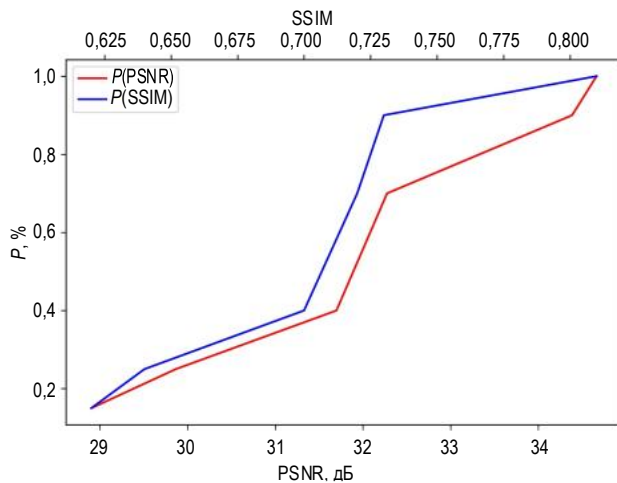
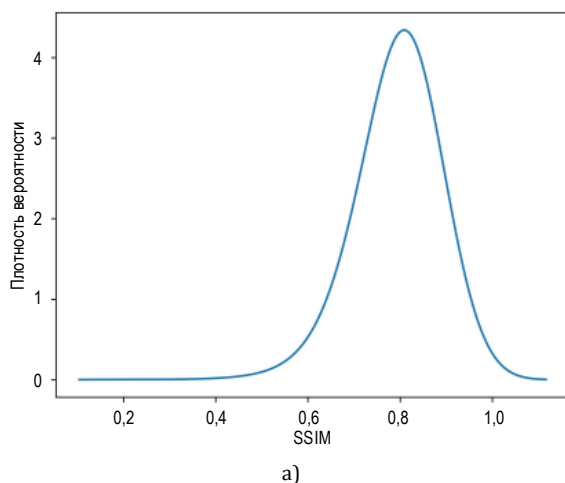


Рис. 7. Зависимость вероятности успеха выполнения задания на FPV-управление от метрики качества видеопотока

Fig. 7. FPS Control Task Success Completion Rate Dependence on Video Stream Frames Quality Metric

В результате экспериментов были получены характеристики законов распределения метрик качества видеопотока для различных конфигураций испытаний (таблица 2, где СЗ – среднее значение; МЕД – медиана;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклоне-



а)

ние; НВ – наиболее вероятное значение). Для восстановления плотности вероятности метрик качества видеопотока был использован метод Парзена – Розенблатта с определением полосы пропускания по правилу Стерджеса (для первой конфигурации экспериментов распределения приведены на рисунке 8) [16].

ТАБЛИЦА 2. Результаты экспериментов по значениям метрик качества видеопотока

TABLE 2. Video Stream Quality Metric Values Experiments Results

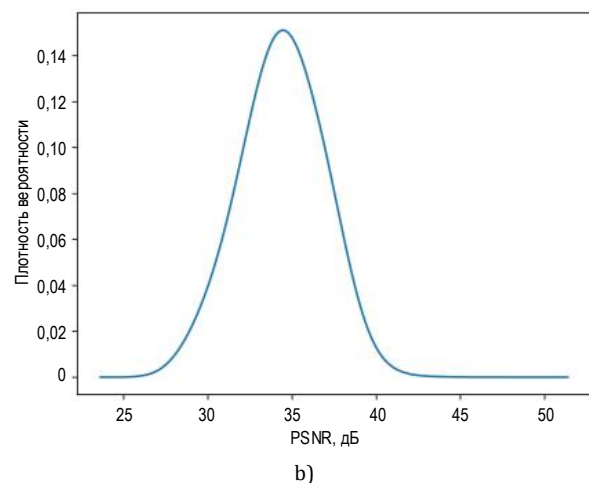
№	1	2	3	4	5	6	
$P$	1,00	0,90	0,70	0,40	0,25	0,15	
SSIM	СЗ	0,79	0,72	0,71	0,68	0,65	0,61
	МЕД	0,80	0,73	0,72	0,69	0,64	0,61
	$\sigma$	0,08	0,11	0,11	0,14	0,15	0,12
	НВ	0,81	0,73	0,72	0,70	0,63	0,61
PSNR	СЗ	34,67	34,39	32,28	31,70	29,87	28,90
	МЕД	34,97	34,42	31,93	31,20	29,48	28,65
	$\sigma$	2,29	2,32	2,44	2,22	1,78	0,95
	НВ	35,56	34,47	31,17	30,67	29,46	28,58

Для нахождения количественных требуемых значений метрик качества SSIM и PSNR были найдены наиболее вероятные их значения только для успешных заездов при каждой конфигурации (таблица 3).

ТАБЛИЦА 3. Наиболее вероятные значения успешных заездов и требования

TABLE 3. The Most Probable Values of Successful Races and the Quality Metrics Requirements

№	1	2	3	4	5	6
$P$	1,00	0,90	0,70	0,40	0,25	0,15
SSIM <sub>НВ</sub>	0,81	0,73	0,72	0,70	0,64	0,62
PSNR <sub>НВ</sub>	35,56	34,47	31,00	30,49	29,16	28,62



б)

Рис. 8. Распределение плотности вероятности метрик качества на примере первой конфигурации эксперимента: а) SSIM; б) PSNR

Fig. 8. Experiment First Configuration Quality Metrics Distribution Example: а) SSIM; б) PSNR

Согласно [16], требования к значениям метрик качества видеопотока при FPV-управлении БС вычисляются как средние значения метрик, при которых достигается цель функционирования БС. Пусть необходимо определить требования к значениям некоторой метрики  $M$  для  $N$ -й вероятности успеха. Тогда за требование  $M_r(N)$  принимается среднее арифметическое значение метрик  $M_i$ , при которых вероятность успеха  $P$  больше или равна  $N$ :

$$\forall M_i: P \geq N: M_r(N) = \frac{\sum_i M_i}{k},$$

где  $k$  – количество допустимых индексов  $i$ .

Так, для 90 % вероятности успеха достижения цели функционирования БС:

$$SSIM_{тр} \geq 0,77, PSNR_{тр} \geq 35,02.$$

В свою очередь для  $P = 95$  %:

$$SSIM_{тр} \geq 0,81, PSNR_{тр} \geq 35,56.$$

### Заключение

В настоящей работе была проведена серия натуральных экспериментов для определения требований к метрикам качества кадров видеопотока

при FPV-управлении БС в зависимости от успешности прохождения динамического маршрута. При ухудшении качества видеопотока уменьшается вероятность достижения цели функционирования БС и такая зависимость близка к линейной. При этом из-за наличия других стохастических факторов возможен разброс между значениями метрик качества и вероятностью успешного достижения цели. Найдены средние значения, медианы, среднеквадратические отклонения и наиболее вероятные значения метрик для каждой конфигурации экспериментов. Кроме того, найдены наиболее вероятные значения метрик для успешных заездов в каждой конфигурации.

Целью настоящего исследования была апробация подхода к обоснованию требований, предложенного в [16]. На основе данного подхода определены требования к значениям метрик для различных вероятностей достижения цели функционирования БС при управлении от первого лица. Например, для вероятности успешного прохождения динамического маршрута 90 %:  $SSIM_{тр} \geq 0,77$  и  $PSNR_{тр} \geq 35,02$ , а для вероятности 95 %:  $SSIM_{тр} \geq 0,81$  и  $PSNR_{тр} \geq 35,56$ . Таким образом, можно сделать вывод об успешности апробации предложенного подхода.

**Благодарности:** автор выражает благодарность аспиранту и инженеру Центра перспективных проектов и разработок Санкт-Петербургского университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича Александру Александровичу Ченскому за помощь в оформлении статьи, создании схем и графиков, а также кандидату технических наук, доценту кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича Роману Михайловичу Вивчарю за помощь в методологическом аспекте исследования.

### Список источников

1. Chen J., Sun J., Wang G. From Unmanned Systems to Autonomous Intelligent Systems // Engineering. 2022. Vol. 12. PP. 16–19. DOI:10.1016/j.eng.2021.10.007. EDN:ZERUNX
2. Ni J., Hu J., Xiang C. A review for design and dynamics control of unmanned ground vehicle // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D. Journal of Automobile Engineering. 2021. Vol. 235. Vol. 4. PP. 1084–1100. DOI:10.1177/0954407020912097
3. Liu Z., Zhang Y., Yu X., Yuan C. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges // Annual Reviews in Control. 2016. Vol. 41. PP. 71–93. DOI:10.1016/j.arcontrol.2016.04.018
4. Wibisono A., Piran M.J., Song H.K., Lee B.M. A survey on unmanned underwater vehicles: Challenges, enabling technologies, and future research directions // Sensors. 2023. Vol. 23. Iss. 17. PP. 7321. DOI:10.3390/s23177321. EDN:AJQRAP
5. Laghari A.A., Jumani A.K., Laghari R.A., Nawaz H. Unmanned aerial vehicles: A review // Cognitive Robotics. 2023. Vol. 3. PP. 8–22. DOI:10.1016/j.cogr.2022.12.004. EDN:PYFLLT
6. Березкин А.А., Ченский А.А., Киричек Р.В., Захаров А.А. Исследование методов латентного сжатия видеопотока при FPV управлении беспилотными системами // Электросвязь. 2024. № 6. С. 26–36. DOI:10.34832/ELSV.2024.55.6.014. EDN:FWBEQE
7. 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
8. 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:IWGLJY
9. Krátký V., Alcántara A., Capitán J., Štěpán P., Saska M., Ollero A. Autonomous Aerial Filming With Distributed Lighting by a Team of Unmanned Aerial Vehicles // IEEE Robotics and Automation Letters. 2021. Vol. 6. Iss. 4. PP. 7580–7587. DOI:10.1109/LRA.2021.3098811. EDN:KUQTMX
10. Pirmagomedov R., Kirichek R., Blinnikov M., Koucheryavy A. UAV-based gateways for wireless nanosensor networks deployed over large areas // Computer Communications. 2019. Vol. 146. PP. 55–62. DOI:10.1016/j.comcom.2019.07.026. EDN:WTWZWC
11. Dinh T.D., Pham V.D., Kirichek R., Koucheryavy A. Flying Network for Emergencies // Proceedings of the 21st International Conference on Distributed Computer and Communication Networks (DCCN, Moscow, Russia, 17–21 September 2018). Cham: Springer International Publishing, 2018. PP. 58–70. DOI:10.1007/978-3-319-99447-5\_6. EDN:XXXINF

12. Grois D., Nguyen T., Marpe D. Performance comparison of AV1, JEM, VP9, and HEVC encoders // Proceedings of the Conference on Optical Engineering + Applications "Applications of Digital Image Processing XL" (San Diego, United States, 6–10 August 2017). SPIE, 2018. Vol. 10396. PP. 68–79. DOI:10.1117/12.2283428
13. Mansri I., Doghmane N., Kouadria N., Harize S., Bekhouch A. Comparative Evaluation of VVC, HEVC, H.264, AV1, and VP9 Encoders for Low-Delay Video Applications // Proceedings of the Fourth International Conference on Multimedia Computing, Networking and Applications (MCNA, Valencia, Spain, 19–22 October 2020). IEEE, 2020. PP. 38–43. DOI:10.1109/MCNA50957.2020.9264275
14. Layek M.A., Thai N.Q., Hossain M.A., Thu N.T., Tuyen L.P., Talukder A. Performance analysis of H.264, H.265, VP9 and AV1 video encoders // Proceedings of the 19th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS, Seoul, Korea (South), 27–29 September 2017). IEEE, 2017. PP. 322–325. DOI:10.1109/APNOMS.2017.8094162
15. Jia Z., Li B., Li J., Xie W., Qi L., Li H., Lu Y. Towards Practical Real-Time Neural Video Compression // Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR, 11–15 June 2025, Nashville, USA). 2025. PP. 12543–12552.
16. Березкин А.А., Вивчарь Р.М., Киричек Р.В. Подход к обоснованию требований к качеству видеопотока при FPV-управлении беспилотными системами // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 4. С. 7–15. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-4-7-15. EDN:JQQCXK
17. Березкин А.А., Вивчарь Р.М., Киричек Р.В. Модель системы управления мобильными роботизированными комплексами различного назначения // Электросвязь. 2023. № 8. С. 12–18. DOI:10.34832/ELSV.2023.45.8.002. EDN:XXOJNM
18. Fardo F.A., Conforto V.H., De Oliveira F.C., Rodrigues P.S. A formal evaluation of PSNR as quality measurement parameter for image segmentation algorithms // arXiv preprint arXiv:1605.07116. 2016.
19. Nilsson J., Akenine-Möller T. Understanding SSIM // arXiv preprint. 2020. DOI:10.48550/arXiv.2006.13846
20. González N., Solera M., Ruiz F., Gijón C., Toril M. A quality of experience model for live video in first-person-view drone control in cellular networks // Computer Networks. 2023. Vol. 237. P. 110089. DOI:10.1016/j.comnet.2023.110089. EDN:NLXOYI
21. Li S., Zhang Y., Edwards S., Blythe P.T. Exploration into the needs and requirements of the remote driver when teleoperating the 5G-enabled level 4 automated vehicle in the real world—a case study of 5G connected and automated logistics // Sensors. 2023. Vol. 23. Iss. 2. P. 820. DOI:10.3390/s23020820. EDN:JJHIFE
22. Jarvis B., Toumeh C., Floreano D. First-Person View Interfaces for Teleoperation of Aerial Swarms // IEEE Robotics and Automation Letters. 2025. Vol. 10. Iss. 5. PP. 4476–4483. DOI:10.1109/lra.2025.3553062. EDN:EKKALY
23. Inam R., Schrammar N., Wang K., Karantelakis A., Mokrushin L., Feljan A.V., Fersman E. Feasibility assessment to realise vehicle teleoperation using cellular networks // Proceedings of the 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC, Rio de Janeiro, Brazil, 01–04 November 2016). IEEE, 2016. PP. 2254–2260. DOI:10.1109/ITSC.2016.7795920
24. Silic M., Suznjevic M., Skorin-Kapov L. QOE Assessment of FPV Drone Control in a Cloud Gaming Based Simulation // Proceedings of the 13th International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX, Montreal, Canada, 14–17 June 2021). IEEE, 2021. PP. 175–180. DOI:10.1109/QoMEX51781.2021.9465385
25. Streijl R.C., Winkler S., Hands D.S. Mean opinion score (MOS) revisited: methods and applications, limitations and alternatives // Multimedia Systems. 2016. Vol. 22. Iss. 2. PP. 213–227. DOI:10.1007/s00530-014-0446-1. EDN:FYGVYF
26. Xu J., Xing L., Perkis A., Jiang Y. On the Properties of Mean Opinion Scores for Quality of Experience Management // Proceedings of the International Symposium on Multimedia (Dana Point, USA, 05–07 December 2011). IEEE, 2011. PP. 500–505. DOI:10.1109/ISM.2011.88
27. Ribeiro F., Florêncio D., Zhang C., Seltzer M. CrowdMOS: An approach for crowdsourcing mean opinion score studies // Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP, Prague, Czech Republic, 22–27 May 2011). IEEE, 2011. PP. 2416–2419. DOI:10.1109/ICASSP.2011.5946971
28. Tommasi F., De Luca V., Melle C. Packet losses and objective video quality metrics in H.264 video streaming // Journal of Visual Communication and Image Representation. 2015. Vol. 27. PP. 7–27. DOI:10.1016/j.jvcir.2014.12.003

## References

1. Chen J., Sun J., Wang G. From Unmanned Systems to Autonomous Intelligent Systems. *Engineering*. 2022;12:16–19. DOI:10.1016/j.eng.2021.10.007. EDN:ZERUNX
2. Ni J., Hu J., Xiang C. A review for design and dynamics control of unmanned ground vehicle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2020. 235(4):1084–1100. DOI:10.1177/0954407020912097
3. Liu Z., Zhang Y., Yu X., Yuan C. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*. 2016;41:71–93. DOI:10.1016/j.arcontrol.2016.04.018
4. Wibisono A., Piran M.J., Song H.K., Lee B.M. A survey on unmanned underwater vehicles: Challenges, enabling technologies, and future research directions. *Sensors*. 2023;23(17):7321. DOI:10.3390/s23177321. EDN:AJQRAP
5. Laghari A.A., Jumani A.K., Laghari R.A., Nawaz H. Unmanned aerial vehicles: A review. *Cognitive Robotics*. 2023;3:8–22. DOI:10.1016/j.cogr.2022.12.004. EDN:PYFLLT
6. 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;6:26–36. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2024.55.6.014. EDN:FWBEQE
7. 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
8. 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:IWGJLY


9. Krátký V, Alcántara A., Capitán J., Štěpán P., Saska M., Ollero A. Autonomous Aerial Filming With Distributed Lighting by a Team of Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2021;6(4):7580–7587. DOI:10.1109/LRA.2021.3098811. EDN:KUQTMX
10. Pirmagomedov R., Kirichek R., Blinnikov M., Koucheryavy A. UAV-based gateways for wireless nanosensor networks deployed over large areas. *Computer Communications*. 2019;146:55–62. DOI:10.1016/j.comcom.2019.07.026. EDN:WTWZWC
11. Dinh T.D., Pham V.D., Kirichek R., Koucheryavy A. Flying Network for Emergencies. *Proceedings of the 21st International Conference on Distributed Computer and Communication Networks, DCCN, 17–21 September 2018, Moscow, Russia*. Cham: Springer International Publishing; 2018. p.58–70. DOI:10.1007/978-3-319-99447-5\_6. EDN:XXXINF
12. Grois D., Nguyen T., Marpe D. Performance comparison of AV1, JEM, VP9, and HEVC encoders. *Proceedings of the Conference on Optical Engineering + Applications “Applications of Digital Image Processing XL”, 6–10 August 2017, San Diego, United States*. SPIE; 2018. vol.10396. p.68–79. DOI:10.1117/12.2283428
13. Mansri I., Doghmane N., Kouadria N., Harize S., Bekhouch A. Comparative evaluation of VVC, HEVC, H. 264, AV1, and VP9 encoders for low-delay video applications. *Proceedings of the Fourth International Conference on Multimedia Computing, Networking and Applications, MCNA, 19–22 October 2020, Valencia, Spain*. IEEE; 2020. p.38–43. DOI:10.1109/MCNA50957.2020.9264275
14. Layek M.A., Thai N.Q., Hossain M.A., Thu N.T., Tuyen L.P., Talukder A. Performance analysis of H.264, H.265, VP9 and AV1 video encoders. *Proceedings of the 19th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium, APNOMS, 27–29 September 2017, Seoul, Korea (South)*. IEEE; 2017. p.322–325. DOI:10.1109/APNOMS.2017.8094162
15. Jia Z., Li B., Li J., Xie W., Qi L., Li H., Lu Y. Towards Practical Real-Time Neural Video Compression. *Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR, Nashville, USA, 11–15 June 2025*. 2025. p.12543–12552.
16. Berezkin A.A., Vivhcar R.M., Kirichek R.V. Approach to Video Stream Quality Requirements Justification for FPV Control of Unmanned Systems. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(4):7–15. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-4-7-15. EDN:JQCXK
17. Berezkin A.A., Vivhcar R.M., Kirichek R.V. Model of the mobile robotic complex management system. *Electrosvyaz*. 2023;8:12–18. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2023.45.8.002. EDN:XXOJNM
18. Fardo F.A., Conforto V.H., De Oliveira F.C., Rodrigues P.S. A formal evaluation of PSNR as quality measurement parameter for image segmentation algorithms. *arXiv preprint arXiv:1605.07116*. 2016.
19. Nilsson J., Akenine-Möller T. Understanding SSIM. *arXiv preprint*. 2020. DOI:10.48550/arXiv.2006.13846
20. González N., Solera M., Ruiz F., Gijón C., Toril M. A quality of experience model for live video in first-person-view drone control in cellular networks. *Computer Networks*. 2023;237:110089. DOI:10.1016/j.comnet.2023.110089. EDN:NLYOYI
21. Li S., Zhang Y., Edwards S., Blythe P.T. Exploration into the needs and requirements of the remote driver when teleoperating the 5G-enabled level 4 automated vehicle in the real world—a case study of 5G connected and automated logistics. *Sensors*. 2023;23(2):820. DOI:10.3390/s23020820. EDN:JJHIFE
22. Jarvis B., Toumeh C., Floreano D. First-Person View Interfaces for Teleoperation of Aerial Swarms. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2025;10(5):4476–4483. DOI:10.1109/lra.2025.3553062. EDN:EKKALY
23. Inam R., Schrammar N., Wang K., Karapantelakis A., Mokrushin L., Feljan A.V., Fersman E. Feasibility assessment to realise vehicle teleoperation using cellular networks. *Proceedings of the 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC, 01–04 November 2016, Rio de Janeiro, Brazil*. IEEE; 2016. p.2254–2260. DOI:10.1109/ITSC.2016.7795920
24. Silic M., Suznjevic M., Skorin-Kapov L. QOE Assessment of FPV Drone Control in a Cloud Gaming Based Simulation. *Proceedings of the 13th International Conference on Quality of Multimedia Experience, QoMEX, 14–17 June 2021, Montreal, Canada*. IEEE; 2021. p.175–180. DOI:10.1109/QoMEX51781.2021.9465385
25. Streijl R.C., Winkler S., Hands D.S. Mean opinion score (MOS) revisited: methods and applications, limitations and alternatives. *Multimedia Systems*. 2016;22(2):213–227. DOI:10.1007/s00530-014-0446-1. EDN:FYGVYF
26. Xu J., Xing L., Perkins A., Jiang Y. On the Properties of Mean Opinion Scores for Quality of Experience Management. *Proceedings of the International Symposium on Multimedia, 05–07 December 2011, Dana Point, USA*. IEEE; 2011. p.500–505. DOI:10.1109/ISM.2011.88
27. Ribeiro F., Florêncio D., Zhang C., Seltzer M. CrowdMOS: An approach for crowdsourcing mean opinion score studies. *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP, 22–27 May 2011, Prague, Czech Republic*. IEEE; 2011. p.2416–2419. DOI:10.1109/ICASSP.2011.5946971
28. Tommasi F., De Luca V., Melle C. Packet losses and objective video quality metrics in H.264 video streaming. *Journal of Visual Communication and Image Representation*. 2015;27:7–27. DOI:10.1016/j.jvcir.2014.12.003

Статья поступила в редакцию 12.12.2025; одобрена после рецензирования 10.02.2026; принята к публикации 16.02.2026.

The article was submitted 12.12.2025; approved after reviewing 10.02.2026; accepted for publication 16.02.2026.

## Информация об авторе:

**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>

Автор сообщает об отсутствии конфликтов интересов.

The author declares no conflicts of interests.