

Научная статья

УДК 004.05

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-4-7-15>

Подход к обоснованию требований к качеству видеопотока при FPV-управлении беспилотными системами

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

Роман Михайлович Вивчарь, vivchar.rm@sut.ru

Руслан Валентинович Киричек, kirichек@sut.ru

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

Аннотация

В настоящее время ключевую роль в различных отраслях экономики РФ играют гибридные орбитально-наземные сети связи, важной составной частью которых являются беспилотные системы на FPV-управлении. Важным элементом таких систем являются каналы информационного обмена, в составе которых широкое распространение получило использование нейросетевых кодеков. Главным критерием успешности решения ими своих целевых задач является удовлетворение требований к качеству восстановленного видеопотока, что обуславливает особенную **актуальность** обоснования этих требований.

Целью настоящей статьи является представление подхода к количественному обоснованию требований к качеству передаваемого видеопотока.

Сущность представленного подхода заключается в том, что требуемые значения показателей качества передаваемого изображения, используемые для обоснования приемлемых нейросетевых кодеков, определяются путем анализа различных видеопотоков, на основе которых формировались воздействия по управлению беспилотными системами, позволившие достичь целей их функционирования. Рассмотрены основные этапы подхода и их логическая взаимосвязь.

Предложенный подход базируется на использовании **методов** статистического и риск-анализа, теории планирования эксперимента и теории вероятностей.

Научная новизна предложенного подхода заключается в том, что требования к качеству передаваемого от беспилотной системы к оператору видеопотока, используемые для обоснования приемлемых нейросетевых кодеков, рассчитываются путем анализа совокупности видеопотоков, позволивших достичь целей ее функционирования, что дает возможность избавиться от субъективизма присущего используемым в настоящее время для решения этой задачи экспертным методам.

Теоретическая значимость: доказана возможность использования имитационного моделирования каналов информационного обмена для решения задачи коррекции требований к показателям качества восстановленного видеопотока при FPV-управлении. Предложенный подход также вносит вклад в совершенствование научно-методического аппарата в области проектирования альтернативных кодеков сжатия видеопотока с потерями.

Практическая значимость предложенного подхода заключается в том, что полученные с помощью него требования к показателям качества передаваемого видеопотока **могут быть в дальнейшем использованы** для обоснования оптимальных проектных решений по созданию каналов информационного обмена между беспилотными системами и оператором, что существенно повысит эффективность использования этих систем.

Ключевые слова: гибридные сети, беспилотные средства, FPV-управление, качество восстановленного видеопотока, риск, метод ядерной оценки плотности, требования, нейросетевые кодеки

Источник финансирования: статья подготовлена в рамках прикладных научных исследований СПбГУТ, регистрационный номер 1023031600087-9-2.2.4;2.2.5;2.2.6;1.2.1;2.2.3 в ЕГИСУ НИОКТР.

Ссылка для цитирования: 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:JQCSXK

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-4-7-15>

Approach to Video Stream Quality Requirements Justification for FPV Control of Unmanned Systems

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

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

Ruslan V. Kirichek, kirichek@sut.ru

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

Annotation

Currently, hybrid orbital-ground communication networks play a key role in various sectors of the Russian economy, an important part of which are unmanned systems based on FPV control. One of the key elements of such systems is information exchange channels. The main criterion for the success of their objectives is to meet the requirements for the quality of the transmitted video stream, which makes it particularly **relevant** to substantiate these requirements.

The purpose of this article is to present an approach to the quantitative justification of the requirements for the quality of the transmitted video stream.

The essence of the presented approach lies in the fact that the required values of the transmitted image quality indicators, used to justify acceptable neural network codecs, are determined by analyzing various video streams, on the basis of which the impacts on the control of unmanned systems that allowed to achieve the goals of their functioning were formed. The main stages of the approach and their logical interrelation are considered.

The proposed approach is based on the use of **methods** of statistical and risk analysis, the theory of experiment planning and probability theory.

Scientific novelty of the proposed approach lies in the fact that the requirements to the quality of the video stream transmitted from the unmanned system to the operator, used to justify acceptable neural network codecs, are calculated by analyzing the totality of video streams that allowed to achieve the goals of its functioning, which allows to get rid of the subjectivism inherent in the expert methods currently used to solve this problem.

Theoretical significance of the proposed approach lies in the fact that the necessity and possibility of not only substantiating the requirements for the quality indicators of the transmitted video stream for FPV control, but also their correction has been proved.

Practical significance. The requirements for the quality indicators of the transmitted video stream obtained using the proposed approach can be further used to justify optimal design solutions for creating information exchange channels between unmanned systems and the operator, which will significantly increase the efficiency of using these systems.

Keywords: hybrid networks, unmanned vehicles, FPV control, the quality of the restored video stream, risk, nuclear probability density estimation method, requirements, neural network codecs

Funding: The scientific article was prepared within the framework of applied scientific research SPbSUT, registration number 1023031600087-9-2.2.4;2.2.5;2.2.6;1.2.1;2.2.3 in the information system (<https://www.rosrid.ru/information>).

For citation: Berezkin A.A., Vivchar 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:JQQCXK

Введение

В настоящее время все более существенную роль в различных отраслях экономики РФ играют

цифровые системы и сервисы. Это вызывает рост требований к услугам связи, особенно в части покрытия, скорости, задержки и надежности переда-

чи данных. Для удовлетворения названных требований активно внедряются новые поколения технологий связи, одним из которых являются создаваемые гибридные орбитально-наземные сети связи (ГОНСС) [1, 2]. В силу своих технологических особенностей и взаимодействия с наземной инфраструктурой связи такие спутниковые и орбитально-наземные системы связи в перспективе окажут существенное влияние на рынки спутниковой, фиксированной и мобильной связи не только в России, но и во всем мире, в соответствии со Стратегией развития отрасли связи Российской Федерации до 2035 г. (распоряжение Правительства РФ от 24 ноября 2023 г. № 3339-р).

Важным элементом ГОНСС выступают различные беспилотные средства (БС), основным назначением которых является сбор информации и осуществление различных действий за пределами прямой видимости оператора [3]. Использование глобальных сетей обеспечивает управление БС на больших расстояниях, что особенно актуально в различных сферах народного хозяйства, например, в сельскохозяйственной отрасли, а также для решения задач МЧС.

Так как задержка в каналах передачи связи при использовании ГОНСС соизмерима с задержкой в мобильных сетях связи, что подтверждается результатами испытаний Бюро 1440 своей низкоорбитальной спутниковой группировки, то широкое распространение нашли БС, оснащенные системой FPV-управления (*аббр. от англ. First Person View* – вид от первого лица) [4].

Одним из ключевых элементов таких систем являются каналы информационного обмена (КИО), назначением которых является передача видеопотока от БС к оператору, а также команд управления. Следовательно, объектом представленных исследований является процесс информационного обмена при FPV-управлении БС. Одним из элементов КИО являются нейросетевые кодеки (НК), предназначенные для сжатия и восстановления передаваемого видеопотока. Эффективность решения КИО своих целевых задач определяется успешностью их проектирования, одной из ключевых задач которого является выбор приемлемого НК. При этом главным критерием является удовлетворение требований к качеству восстановленных после сжатия и передачи изображений, составляющих видеопоток. Следовательно, в процессе проектирования КИО при выборе приемлемого НК одной из ключевых задач является обоснование требований к изменению качества восстановленного видеопотока.

Целью настоящей статьи является представление методики, позволяющей на количественном уровне оценить требования к изменению качества восстановленного видеопотока, что позволит осу-

ществить выбор приемлемого варианта НК и, в конечном итоге, повысит эффективность процесса проектирования БС на FPV-управлении.

Содержание и этапы подхода к обоснованию требований к качеству восстановленного видеопотока при FPV-управлении

В результате анализа критериев эффективности КИО при FPV-управлении было установлено, что наиболее часто используемыми показателями качества восстановленного видеопотока являются [5, 6]:

- показатель структурного сходства (SSIM, *аббр. от англ. Structure Similarity*), характеризующий тенденции к общности между исходным и сжатым изображением; достоинством критерия является учет не только яркости и цвета изображения, но также его текстуры и контрастности; его целесообразно использовать в качестве показателя, характеризующего пофрагментное сходство исходного и полученного кадров для оценки изменения качества кадров видеопотока при передаче его по каналам информационного обмена; это необходимо для определения требований к проектируемым видеокodeкам, используемым в задаче FPV-управления;

- Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), характеризующий отношение сигнала к шуму между двумя изображениями [7];

- вероятность сбоя.

При этом, говоря о показателях качества восстановленного видеопотока в предлагаемой статье, понимаются критерии, которые характеризуют изменение качества исходного видеопотока при его прохождении по каналам информационного обмена (кодирование, декодирование, непосредственная передача по каналу).

Представленные выше показатели позволяют провести объективное тестирование, главным достоинством которого является возможность автоматизировать этот процесс, что дает возможность оценить качество изменения исходного видеопотока при большом количестве вариантов используемых НК. В качестве требуемого значения вероятности сбоя целесообразно использовать величину, обратную доверительной вероятности отсутствия сбоев при передаче видеопотока, которая может быть рассчитана при заданном уровне, принимающим решения, уровне значимости. Следовательно, говоря об обосновании требований к показателям качества восстановленного видеопотока, в дальнейшем будем понимать под этим обоснование требуемых значений SSIM и PSNR.

Сущность рассматриваемого подхода заключается в анализе различных видеопотоков, на основе которых осуществлялось управление БС, позволившее достичь целей его функционирования, а

также – в обосновании по результатам проведенного выше анализа требуемых значений показателей качества восстановленного видеопотока от БС к оператору. Основные этапы подхода и их логическая взаимосвязь представлена на рисунке 1.

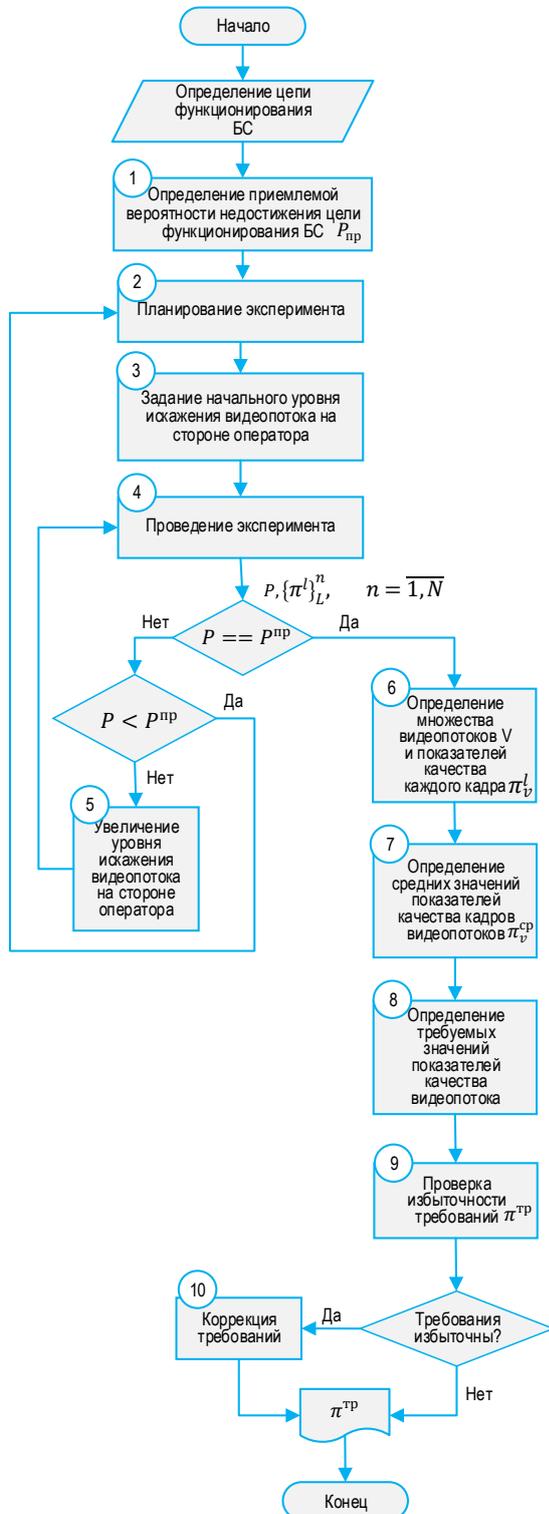


Рис. 1. Структурно-логическая схема подхода к обоснованию требований к качеству передаваемого видеопотока

Fig. 1. Structure and Logic Diagram of the Approach to Substantiation of Requirements to Transmitted Video Stream Quality

На этапе обоснования исходных данных для расчета требуемых значений показателей качества восстановленного видеопотока при FPV-управлении определяется цель функционирования БС, которая выступает в данном случае целью суперсистемы, которая представляет собой систему его функционирования. Например, прохождение БС динамического маршрута между разными точками пространства за установленное время, отыскание с помощью БС определенных объектов в течение установленного времени и другие. От точности определения цели функционирования БС зависит в конечном итоге адекватность обоснования требований к качеству восстановленного видеопотока, а, следовательно, успешность решения задачи выбора нужного варианта НК.

Задачей *первого этапа* является определение приемлемой вероятности недостижения цели функционирования БС, подобранной ранее, и сопутствующего при этом ущерба. Данные показатели выступают в качестве показателей риска недостижения цели функционирования БС [8]. Для определения этих показателей могут быть использованы различные методы, например, представленные в [10]. В данной статье предлагается использовать широко известный метод, основанный на вероятностной оценке показателей риска (PRA, аббр. от англ. Probabilistic Risk Assessment) [9, 10], в соответствии с которым показатели риска недостижения цели функционирования БС определяются путем выполнения последовательных действий:

- идентификации всех сценариев недостижения цели (I);
- определении вероятности появления каждого i -го сценария P_i и возможных последствий S_i .

Вероятности реализации сценариев определяются путем перемножения вероятности появления инициирующего нежелательного фактора на вероятности появления последующих нежелательных факторов при условии того, что предыдущие события уже наступили:

$$P_i = p(A_i^1)p(A_i^2|A_i^1)\dots p(A_i^{J_i}|A_i^1\dots A_i^{J_i-1}),$$

где $p(A_i^1)$ – вероятность появления инициирующего нежелательного фактора; J_i – количество нежелательных факторов, входящих в i -й сценарий; $p(A_i^2|A_i^1), \dots, p(A_i^{J_i}|A_i^1\dots A_i^{J_i-1})$ – условные вероятности появления последующих нежелательных факторов.

Определение вероятностей появления нежелательных факторов (джиттера, сетевой задержки, потери пакетов), в том числе и условных, предлагается проводить на основе анализа статистических данных или с помощью экспертных методов.

Вероятность недостижения цели функционирования БС вычисляется путем суммирования показателей риска всей совокупности сценариев:

$$P_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^I P_i.$$

Необходимость оценивания приемлемых показателей риска недостижения цели функционирования БС связана с тем, что этот процесс подвержен влиянию различных факторов неопределенности, и, следовательно, это целесообразно учитывать при обосновании требований к показателям качества видеопотока.

Вторым этапом обоснования требований к показателям качества восстановленного видеопотока является планирование эксперимента, воспроизводящего процесс достижения цели функционирования БС. Такой эксперимент должен включать в себя как натурную часть, так и вычислительную. Натурная часть эксперимента заключается в воссоздании реальных условий для функционирования БС. Предлагается для этого разработать специальный динамически меняющийся маршрут прохождения БС от одной точки к другой в условиях воздействия различных неблагоприятных факторов, например, таких как появление на маршруте различных препятствий, изменение освещения и т. д. Успешным достижением цели функционирования БС в этом случае будет безаварийное прохождение маршрута в течение заданного времени. Вычислительная часть эксперимента заключается в имитации того же самого маршрута с помощью средств вычислительной техники. Для этого предлагается использовать имитационную модель, представленную в [7]. Данная модель будет в дальнейшем необходима для проверки корректности задания требований к показателям качества восстановленного видеопотока, о чем будет сказано ниже.

Важным элементом планирования эксперимента является обоснование количества опытов (N), позволяющих в полной мере учесть стохастичность воспроизводимого процесса функционирования БС. Для определения числа опытов могут быть использованы детерминированный и вероятностный методы.

Недостатком применения детерминированного метода является тот факт, что для определения числа опытов используются приближительные методы расчета и оценить объективно точность результатов исследования не представляется возможным. В этой связи актуальным становится использование для определения числа опытов вероятностного метода, в общем случае представляющего собой сложный процесс, включающий ряд шагов.

Шаг 1. Оценка факторов, влияющих на объем выборки.

Шаг 2. Подбор метода расчета размера выборки.

Шаг 3. Расчет размера выборки.

Шаг 4. Оценка стандартного отклонения от среднего значения в выборочной совокупности.

Шаг 5. Расчет предельной ошибки выборки.

Шаг 6. Оценка среднего значения признака в генеральной совокупности.

Использование вероятностного метода позволит определить такое число опытов, которое в полной мере обеспечит репрезентативность выборки передаваемых видеопотоков, что, в свою очередь, повысит адекватность определения требуемых показателей их качества.

На *третьем этапе* определяется начальный уровень искажения видеопотока на стороне оператора, что позволит смоделировать возможное воздействие нежелательных факторов при прохождении видеопотока по КИО от БС к оператору. Для этого предлагается использовать специализированное программное обеспечение – эмулятор сети NetDisturb [11], которое позволяет вносить в поток пакетов (IPv4, IPv6) искажения, связанные с задержками, джиттером, дублированием и потерями пакетов, а также ограничением полосы пропускания канала связи. NetDisturb позволяет исказить потоки по IP-сетям, помогая изучать поведение приложений, устройств или служб в «нарушенной» сетевой среде. Данные искажения позволяют ухудшить качество итогового изображения, выводимого на средства отображения оператора, на уровне приложения FPV-управления в соответствии с логикой работы кодеков стандартов h264/h265.

Обоснованность использования NetDisturb в ходе моделирования воздействий нежелательных факторов обусловлена тем, что ГОНСС для управления БС включает в себя наземный сегмент сети связи, реализуемый на базе существующих сотовых сетей связи, а также космический сегмент, включающий в себя механизмы передачи трафика космических аппаратов, находящихся в том числе на различных орбитах, с целью глобального покрытия. В состав таких механизмов входит и маршрутизация трафика, что обеспечивается на сетевом уровне и представляет собой пакеты данных. Поэтому ГОНСС с точки зрения сети связи обеспечивает маршрутизацию пакетов данных и может рассматриваться как классическая сеть с коммутацией пакетов: моделирование задержек, джиттера и ограничения полосы пропускания с помощью пакета NetDisturb позволяет управлять потоком пакетов на уровне приложения FPV-управления БС.

Количество опытов N и начальный уровень искажения видеопотока на стороне оператора являются исходными данными для проведения натурной части эксперимента, являющегося *четвертым этапом* обоснования требований. Результатом проведения натурального эксперимента должны быть:

– фактическая вероятность недостижения цели функционирования БС, которая вычисляется следующим образом:

$$P = \frac{N^{ny}}{N},$$

где N^{ny} – количество опытов, в которых цель функционирования БС не была достигнута;

– множество значений показателей качества всех кадров видеопотоков в каждом опыте:

$$\{\pi^l\}_L^n, \quad n = \overline{1, N},$$

где π^l – значение показателя качества (SSIM или PSNR) l -го кадра видеопотока; L – общее количество кадров видеопотока.

Для определения показателей качества необходимо использовать выражения, представленные в [7]; переход к дальнейшим этапам будет зависеть от ряда условий:

$$P = P_{пр}, \quad (1)$$

$$P < P_{пр}. \quad (2)$$

В случае, если условия (1) и (2) не выполняются, то реализуется *пятый этап*, заключающийся в увеличении степени искажения видеопотока на стороне оператора, после которого необходимо вновь перейти к четвертому этапу. Если же условие (2) выполняется, то это говорит о том, что неправильно определены характеристики эксперимента, в этом случае необходимо их уточнение на втором этапе.

В случае, если условие (1) выполняется, то осуществляется переход на *шестой этап* – определение множества видеопотоков V , передаваемых оператору, которые позволили достичь цели функционирования БС.

Обработка полученного в результате эксперимента множества $\{\pi^l\}_L^n$, $n = \overline{1, N}$ позволит на *седьмом этапе* получить математическое ожидание показателя качества π_v^{cp} для видеопотока в целом.

Это становится возможным за счет определения с помощью метода ядерной оценки [12, 13] плотностей вероятностей SSIM и PSNR $f_v(\pi_v)$ и вычисления на их основе математического ожидания этих показателей:

$$\pi_v^{cp} = \int_{-\infty}^{\infty} \pi_v f_v(\pi_v) d\pi_v. \quad (3)$$

Полученные математические ожидания (3) позволяют на *восьмом этапе* определить требуемые значение каждого из показателей качества восстановленного видеопотока:

$$\pi^{тр} = \frac{\sum_{v=1}^V \pi_v^{cp}}{V}.$$

Далее важным этапом обоснования требований к показателям качества восстановленного видеопотока при FPV-управлении является их проверка на избыточность (*девятый этап*). Сущность такой проверки заключается в нахождении зависимости вероятности достижения всех требований к показателям качества восстановленного видеопотока, полученных ранее, от вариантов, используемых НК (4), и оценивании количества таких вариантов, при которых значение вероятности достижения всех требований близко к единице. В качестве такой зависимости может быть использована модель, структурно-логическая схема которой представлена на рисунке 2.

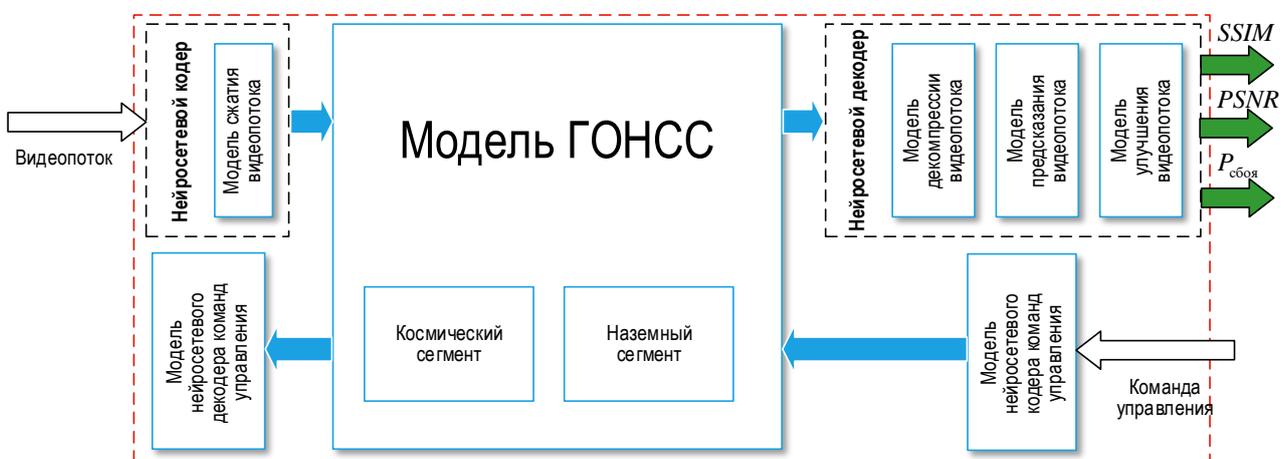


Рис. 2. Структурно-логическая схема модели информационного обмена между беспилотными средствами и оператором

Fig. 2. Structure and Logic Diagram of the Information Exchange Model between Unmanned Vehicles and Operator

В качестве моделей сжатия, декомпрессии, предсказания и улучшения видеопотока используются модели, представленные в [3]:

$$P[(SSIM(\mathbf{w}_\theta) \geq SSIM^{TP}), (PSNR(\mathbf{w}_\theta) \geq PSNR^{TP})] = f(\mathbf{w}_\theta), \quad (4)$$

где P – вероятность достижения всех требований к показателям качества восстановленного видеопотока; $\mathbf{w}_\theta \in W$ – θ -ый вариант НК; W – множество вариантов НК.

Зависимость (4) может быть получена путем проведения имитационного моделирования информационного обмена между БС и оператором при использовании различных вариантов НК (\mathbf{w}).

Целесообразность использования в качестве критерия проверки избыточности задания требований к показателям качества восстановленного видеопотока вероятности достижения всех требований одновременно определена в [14].

Для получения зависимости (4) должна быть использована имитационная модель, упомянутая при описании второго этапа. Если в результате анализа зависимости (4) окажется более одного решения, при котором вероятность достижения всех требований близка к единице, как, например, на рисунке 3 (решения 2, 3, 4, 7, 10, 12), то это позволяет сделать вывод о слишком широком диапазоне требуемых значений показателей качества восстановленного видеопотока.

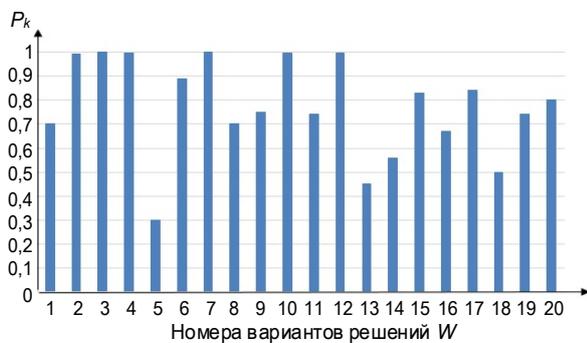


Рис. 3. Зависимость вероятности достижения всех требований к показателям качества видеопотока от вариантов решений по созданию КИО

Fig. 3. Dependence of Achieving All the Requirements Probability to Video Stream Quality Indicators on the Solutions Options for the Creation of IECs

Данное обстоятельство объясняется тем, что при полученных выше решениях весь диапазон значений плотности вероятности системы случайных величин SSIM и PSNR соответствуют таким их значениям, которые лежат внутри области заданных требований. Если в этом случае построить плотности вероятности SSIM и PSNR при параметрах КИО, соответствующих вариантам решений 2, 3, 4, 7, 10, 12, и рассматривать при этом SSIM и PSNR не как систему случайных величин, а как от-

дельные случайные величины, то можно увидеть следующую картину (рисунок 4).

При всех вариантах НК почти все возможные значения SSIM и PSNR принадлежат области заданных требований (см. рисунок 4). При этом в случае варианта 12 (\mathbf{w}_{12}) минимальные значения SSIM меньше, чем при других вариантах и меньше требуемого значения, равного 0,85. Таким образом видно, что если оставить требования к значениям показателей качества видеопотока в исходном виде, то можно получить множество решений, которые будут обладать высокой вероятностью достижения этих требований, но при этом характеризоваться меньшим значением показателя SSIM.

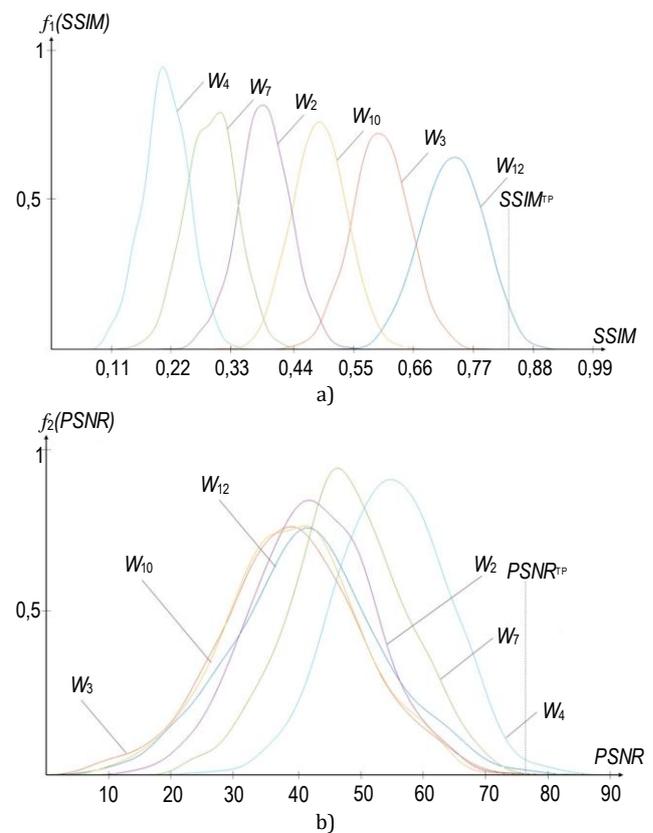


Рис. 4. Плотности вероятности SSIM (а) и PSNR (б) при различных вариантах решений по созданию КИО
Fig. 4. Probability Densities of SSIM (a) and PSNR (b) under Different IECs Solutions Options

Коррекция требований позволит получать только одно решение (рисунок 5), при котором вероятность достижения требуемых показателей качества видеопотока будет такой же высокой, как и при начально заданных требованиях, но такое решение позволит повысить либо показатель SSIM, либо PSNR, либо и то, и другое. Из рисунка видно, что при изменении требований удастся все равно получить оптимальное решение при \mathbf{w}_7 , при котором $P_k(\mathbf{w}) \approx 1$.

Таким образом можно сделать вывод, что предложенный научно-методический аппарат позво-

ляет наряду с обоснованием требуемых значений показателей качества восстановленного видеопотока при FPV-управлении также корректировать эти значения в случае необходимости.

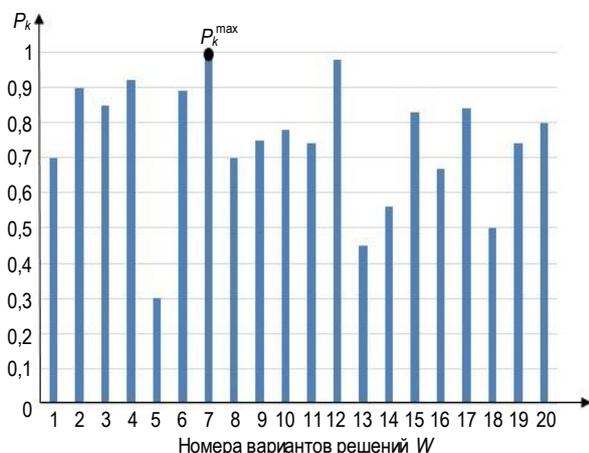


Рис. 5. Зависимость вероятности достижения всех требований к показателям качества от вариантов решений по созданию КИО при уменьшении требуемого значения показателя SSIM

Fig. 5. Dependence of Achieving All Requirements Probability to Video Stream Quality Indicators on the Solutions Variants for the Creation of KIO when the Required SSIM Indicator Value Decreases

Заключение

В результате проведенных исследований был разработан оригинальный подход к обоснованию требований к показателям качества восстановленного видеопотока при FPV-управлении, которые позволят в процессе проектирования КИО осуществить выбор приемлемого варианта НК.

Научная новизна предложенного подхода заключается в том, что требуемые значения показателей, характеризующих качество восстановленного видеопотока, с помощью которого формируются воздействия по управлению БС, рассчитываются путем анализа различных видеопотоков, позволивших достичь целей его функционирования. Это позволяет избавиться от субъективизма, присущего используемым в настоящее время для решения этой задачи экспертным методам.

Кроме того, предложенный научно-методический аппарат позволяет не только обосновать требования к показателям качества восстановленного видеопотока при FPV-управлении с точки зрения достижения цели функционирования БС, но и корректировать эти требования в случае, если они заданы некорректно.

Список источников

1. Гриценко А.А. Гибридные радиосети, или Третья технологическая волна в развитии спутниковых систем // Connect. 2023. № 11-12. С. 48–53.
2. Тихвинский В., Стрелец М. Перспективы создания спутникового сегмента 5G // Первая миля. 2018. № 1(70). С. 16–25. DOI:10.22184/2070-8963.2018.70.1.16.25. EDN:YRTPCM
3. Березкин А.А., Вивчарь Р.М., Слепнев А.В., Киричек Р.В., Захаров А.А. Метод сжатия видеопотока при управлении беспилотными системами в гибридных орбитально-наземных сетях связи // Электросвязь. 2023. № 10. С. 48–56. DOI:10.34832/ELSV.2023.47.10.007. EDN:HRBGLL
4. Матарас А.А., Гуляев И.Ю. Анализ применения FPV дронов в ходе боевых действий 2014-2023 гг. // Актуальные вопросы повышения эффективной огневой подготовки в силовых структурах: теория и практика (III Макаровские чтения), Пермь, Россия, 23 мая 2023. Всероссийский сборник научно-практических материалов. Пермь: Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации, 2023. Т. 3. С. 135–141. EDN:XCNJAX
5. Kumar P., Parmar A. Versatile Approaches for Medical Image Compression: A Review // Procedia Computer Science. 2020. Vol. 167. PP. 1380–1389. DOI:10.1016/j.procs.2020.03.349
6. Старовойтов В.В. Уточнение индекса SSIM структурного сходства изображений // Информатика. 2018. Т. 15. № 3. С. 41–55. EDN:XZOOHR
7. 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
8. Звягин В.И., Птушкин А.И., Трудов А.В. Риск как одно из свойств качества решений, принимаемых в условиях неопределенности // Надежность. 2018. Т. 18. № 4(67). С. 45–50. EDN:VNPHJG
9. ГОСТ Р ИСО 11231-2013 Менеджмент риска. Вероятностная оценка риска на примере космических систем. М.: Стандартинформ, 2014.
10. NASA/SP-2011-3421 (12/2011) Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners NASA.
11. NetDisturb // ZTI Communications. URL: <https://www.zti-communications.com/netdisturb> (дата обращения 08.07.2024)
12. Поршенев С.В., Копосов А.С. Использование аппроксимации Розенблатта-Парзена для восстановления функции распределения непрерывной случайной величины с ограниченным одномодальным законом распределения // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 92. С. 1–27. EDN:RNEGNN
13. Маслаков М.Л., Терновая А.К. Построение плотности распределения вероятностей КАМ сигналов // Цифровая обработка сигналов. 2021. № 3. С. 36–40. EDN:FIACYQ
14. Березкин А.А., Вивчарь Р.М., Киричек Р.В. Многокритериальная оценка эффективности управления беспилотными системами в гибридных сетях связи // Труды учебных заведений связи. Т. 10. № 1. 2024. С. 18–25. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-18-25. EDN:VLZDQC

References

1. Gritsenko A.A. Hybrid radio networks, or the Third technological wave in the development of satellite systems. *Connect.* 2023;11-12:48–53. (in Russ.)
2. Tikhvinsky V., Strelets M. Prospects for creation of satellite segment for 5G. *Last Mile.* 2018;1(70):16–25. DOI:10.22184/2070-8963.2018.70.1.16.25. (in Russ.) EDN:YRTPCM
3. Berezkin A.A., Vivchar R.M., Slepnev A.V., Kirichek R.V., Zaharov A.A. Method of video stream compression when controlling unmanned systems in hybrid orbital-terrestrial communication networks. *Electrosvyaz.* 2023;10:48–56. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2023.47.10.007. EDN:HRBGLL
4. Mataras A.A., Gulyaev I.U. Evolution of FPV drone use during combat operations 2014–2023. *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference Actual Issues of Increasing Effective Firearms Training in Power Structures: Theory and Practice (III Makarov Readings), 23 May 2023, Perm, Russia, vol.3.* Perm: Perm Military Institute of the National Guard Troops of the Russian Federation Publ.; 2023. p.135–141. (in Russ.) EDN:XCNJAX
5. Kumar P., Parmar A. Versatile Approaches for Medical Image Compression: A Review. *Procedia Computer Science.* 2020; 167:1380–1389. DOI:10.1016/j.procs.2020.03.349
6. Starovoitov V.V. Enhancement of the structural similarity index SSIM. *Informatics.* 2018;15(3):41–55. (in Russ.) EDN:XZOOHR
7. Berezkin A.A., Vivchar 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
8. Zviagin V.I., Ptushkin A.I., Trudov A.V. Risk as one of the properties of decisions taken under uncertainty. *Dependability.* 2018;18(4):45–50. (in Russ.) EDN:VNPHJG
9. ISO 11231:201 Space systems. Probabilistic risk assessment. Moscow: Standardinform Publ.; 2014. (in Russ.)
10. NASA/SP-2011-3421 Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners NASA. December 2011.
11. ZTI Communications. NetDisturb. URL: <https://www.zti-communications.com/netdisturb> [дата обращения 08.07.2024]
12. Porshnev S.V., Kuposov A.S. Using Rozenblatt-Parzen approximation for recovering a cumulative distribution function of continuous random variable with a bounded single-mode distribution rule. *Scientific journal of KubSAU.* 2013;92:1–27. (in Russ.) EDN:RNEGGN
13. Maslakov M.L., Ternovaya A.K. Estimation of the probability density function of QAM signals. *Digital Signal Processing.* 2021;3:36–40. (in Russ.) EDN:FIACYQ
14. Berezkin A., Vivchar R., Kirichek R. Multi-Criteria Evaluation of UAV Control Efficiency in Hybrid Communication Networks. *Proceedings of Telecommunication Universities.* 2024;10(1):18–25. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-18-25. EDN:VLZDQC

Статья поступила в редакцию 29.07.2024; одобрена после рецензирования 26.08.2024; принята к публикации 27.08.2024.

The article was submitted 29.07.2024; approved after reviewing 26.08.2024; accepted for publication 27.08.2024.

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>

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.