

На правах рукописи

Березкин Александр Александрович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСА МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ПО
УМЕНЬШЕНИЮ ЗАДЕРЖКИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ ПРИ
ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С БЕСПИЛОТНЫМИ СИСТЕМАМИ В ГИБРИДНЫХ
ОРБИТАЛЬНО-НАЗЕМНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ**

2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» на кафедре сетей связи и передачи данных.

Научный консультант: доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Санкт-Петербурга
Киричек Руслан Валентинович

Официальные
оппоненты: **Канаев Андрей Константинович,**
доктор технических наук, профессор,
Петербургский государственный университет путей
связи Императора Александра I, кафедра
электрической связи, профессор кафедры

Колбанёв Михаил Олегович,
доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный экономический
университет, кафедра информационных систем и
технологий, профессор кафедры

Карташевский Игорь Вячеславович,
доктор технических наук, доцент,
Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики, Научно-
исследовательская лаборатория «Инновационные
проекты», заведующий лабораторией.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук» (ИПУ РАН), г. Москва

Защита состоится 14 октября 2026 года в 14.00 на заседании диссертационного совета 55.2.004.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», по адресу: Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, ауд. 554/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУТ по адресу Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1 и на сайте www.sut.ru.

Автореферат разослан 10 августа 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 55.2.004.01,
канд. техн. наук, доцент

А.Г. Владыко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. С бурным ростом использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в различных областях народного хозяйства возникает необходимость в более сложных системах связи, где требование к высокой пропускной способности каналов связи и минимальной задержке становится критическим. В последние годы беспилотные системы (БС), включая беспилотные авиационные системы, автономные наземные и морские платформы, получили широкое распространение и активно внедряются в различные сферы деятельности. Существенное расширение областей применения БС сопровождается ростом требований к телекоммуникационному обеспечению процессов управления информационными потоками и мониторинга.

Наиболее жесткие требования формируются в режиме дистанционного взаимодействия от первого лица (FPV, *аббр. от англ. First Person View*), при которых оператор, ориентируясь преимущественно на видеопоток, поступающий с бортовой камеры, корректирует движение БС путём отправки команд в рамках информационного потока для взаимодействия оператора с беспилотной системой (КВО). Задержки доставки видеок кадров, задержки их обработки и отображения, а также рассинхронизация FPV-видеопотока и КВО непосредственно влияют на вероятность достижения целей функционирования беспилотной системы.

Практические коммерческие решения передачи FPV-видео и телеметрии по сетям связи 3G/LTE/LTE adv, 5G/IMT-2020 (например, Sky Drone FPV 2/3, Parrot ANAFI Ai, ElSight Halo, CUAV LTE-Link SE, VD-PRO 4G/5G и др.) достигают задержки передачи видео от 150 до 400 мс. Указанные уровни задержек, будучи приемлемыми для широкого класса задач наблюдения и мониторинга, не обеспечивают выполнение требований по задержке, сформулированных в рекомендации 3GPP TS 22.829 для сценариев взаимодействия оператора и беспилотной системы с использованием видеопотока (в частности, 100 мс для взаимодействия оператора и БПЛА по видео и 360 мс для команд управления линии C2 в режиме BVLOS с неограниченной дальностью), и тем самым отражают фундаментальную ограниченность существующих каналов информационного обмена прикладного уровня при работе через сети мобильной связи 3G/LTE/LTE adv.

В соответствии со Стратегией развития отрасли связи Российской Федерации на период до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 24 ноября 2023 г. №3339-р, одной из задач, которую необходимо решить для достижения цели по построению современной информационной инфраструктуры Российской Федерации, обеспечивающей национальный контроль и устойчивость единой сети электросвязи Российской Федерации, является создание до 2030 года российской низкоорбитальной спутниковой группировки для оказания услуг связи на всей территории Российской Федерации с формированием к 2035 году на основе данной группировки гибридной сети связи с предоставлением услуг передачи данных на ее основе. Указанная задача предполагает создание и внедрение гибридных сетей связи, в том числе в целях развития комплексов на основе беспилотных авиационных систем (БАС), а также подвижных платформ с использованием БАС. Реализация указанной стратегии формирует технологические предпосылки для использования гибридных

орбитально-наземных сетей связи (ГОНСС) в задачах БАС на больших расстояниях и в труднодоступных районах.

В части спутниковых систем связи ситуация усугубляется тем, что даже при использовании низкоорбитальных спутниковых группировок задержка в типовых сервисах составляет величины порядка 0,5–1,5 с и выше, а для геостационарных систем – еще больше, что принципиально выводит «классическое» FPV за пределы допустимых значений задержки. При этом на уровне доступных коммерческих решений не выявлены специализированные системы FPV, в которых производителем были бы заявлены и гарантированы сквозные задержки передачи видеопотока через спутниковый сегмент на уровне, сопоставимом с требованиями 3GPP. Даже в наиболее развитых научных школах спутниковой видеопередачи центральным проектным компромиссом остается обеспечение устойчивости и приемлемого качества видеопотока за счет использования видеокодексов, FEC и протокольных механизмов управления доставкой, тогда как минимизация задержки на уровне приложения до уровней, требуемых для FPV, системно не является главной целью. Этот вывод напрямую поддерживает тезис актуальности, где при включении спутникового сегмента ГОНСС в контур БАС задержка на уровне приложения определяется структурой канала информационного обмена (видеокодек, протокол управления видеопотоком, сеть передачи данных), а не только радиодоступом. Поэтому достижение целевых требований по задержке требует специализированных методов ее сокращения и проектирования модельного и протокольного уровня каналов информационного обмена, ориентированного именно на взаимодействие оператора с беспилотными системами в режиме FPV.

Кроме вышесказанного следует отметить, что видеопоток в системах FPV является не просто средством наблюдения, а основным информационным потоком, в котором визуальная информация непосредственно преобразуется оператором в КВО. Поэтому перцептивное качество восстановленного FPV-видеопотока должно рассматриваться как функционально значимый параметр контура взаимодействия, а не как вторичная характеристика. Требования к перцептивному качеству восстановленного видеопотока имеют пороговый характер и должны формулироваться как минимально достаточные для распознавания и принятия решения при одновременной минимизации задержки на уровне приложения.

Таким образом, актуальность исследования обусловлена развитием гибридных орбитально-наземных сетей связи, что одновременно расширяет зону доступности канала для взаимодействия оператора с беспилотной системой и обостряет противоречие между нормативно заданными целевыми требованиями по задержке и фактически достигаемыми значениями в существующих каналах информационного обмена. В этой связи необходима разработка специализированных методов уменьшения задержки (при сохранении требуемого перцептивного качества восстановленного видеопотока) и механизмов управления видеопотоком и КВО на прикладном уровне каналов информационного обмена.

Цель исследования. Целью диссертационной работы является уменьшение задержки информационных потоков при взаимодействии оператора с беспилотной системой от первого лица на фрагменте гибридной орбитально-наземной сети связи.

Достижение поставленной цели возможно за счет совершенствования каналов связи и алгоритмов обработки передаваемой информации. Однако улучшение характеристик каналов связи ограничено фундаментальными физическими факторами, такими как скорость распространения электромагнитных волн и неизбежные сетевые задержки, связанные с маршрутизацией и обработкой данных. В условиях спутникового сегмента ГОНСС данные ограничения приобретают определяющий характер и не могут быть устранены исключительно за счет протокольной оптимизации.

Совершенствование стандартных видеокодеков и протоколов управления видеопотоком в составе каналов информационного обмена также рассматривается как возможный путь снижения задержки. Однако повышение эффективности сжатия видеоданных, как правило, сопровождается ростом вычислительной сложности алгоритмов кодирования и декодирования, увеличением буферизации и внутренних структурных и алгоритмических задержек даже при снижении битовой скорости передачи.

В связи с этим в диссертационной работе предлагается **нейросетевой подход**, предполагающий использование методов глубокого обучения на всех этапах функционирования системы FPV: при сжатии видеопотока, при предсказании видеокадров для компенсации задержки передачи и контроля интенсивности видеокадров, а также при обработке и сжатии КВО. Такой подход позволяет уменьшить влияние сетевых задержек и повысить согласованность FPV-видеопотока и КВО при сохранении требуемого уровня перцептивного качества восстановленного видеопотока.

Дополнительным аргументом в пользу нейросетевого подхода является возможность целенаправленного смещения компромисса «скорость→задержка←качество» в сторону минимизации задержки, что соответствует специфике взаимодействия в режиме FPV. Вследствие своей универсальности стандартные системы видеокодирования неизбежно реализуют сбалансированную оптимизацию и включают механизмы буферизации и усложненные процедуры предсказания и энтропийного кодирования на уровне пикселей изображения, которые в совокупности формируют внутреннюю и сетевую задержку.

Тем самым нейросетевой подход рассматривается в работе как средство перераспределения ресурсов обработки и пропускной способности в пользу уменьшения задержки FPV-видеопотока и КВО на уровне приложения. Такое снижение может быть достигнуто за счет уменьшения объема передаваемых данных и сокращения времени, необходимого для восстановления полезной информации на приемной стороне, при одновременном соблюдении требований к перцептивному качеству восстановленного видеопотока. Однако в спутниковых каналах (космический сегмент ГОНСС), где задержка распространения значима, дополнительный эффект может быть получен путем предсказания будущих видеокадров с использованием моделей, способных учитывать динамику сцены и БПЛА. Таким образом, задача уменьшения задержки видеопотока и КВО естественным образом приводит к необходимости совместного применения методов сжатия и методов предсказания.

Разработанность темы исследования.

Определяющий вклад в теоретические и экспериментальные исследования научных проблем, связанных с управлением передачей информационных потоков,

оптимизацией передачи трафика, моделированием каналов информационного обмена и организацией архитектуры каналов связи (в том числе с помощью ретрансляторов) внесли российские и зарубежные ученые Кучерявый А. Е., Парамонов А. И., Киричек Р. В., Фокин Г. А., Владимиров С. С., Мутханна А. С. А., Гайдамака Ю. В., Гольдштейн Б. С., Вишневский В. М., Карташевский В. Г., Кучерявый Е. А., Шнепс-Шнеппе М. А., Макаренко С. И., Саенко И. Б., Сиверс М. А., Пшеничников А. П., Канаев А. К., Ананьев А. В., Боев Н. М., Соколов Н. А., Яновский Г. Г., Полтавский А. В., Войткевич К. Л., Степанов С. Н., Слюсар В. И., Fettweis G., Griner J., Bovik A., Hashemi M., Alouini M.-S., Saad W. и др. Несмотря на глубокую проработку физического и канального уровней (L1–L2) для взаимодействия оператора с беспилотной системой с помощью прямого радиоканала (в том числе в режиме BVLOS), в исследованиях не учитываются показатели задержек и потерь видеок кадров и КВО на прикладном уровне (L7) при использовании нейросетевых видеокодеков в условиях гибридной сети связи с учетом спутниковых систем на геостационарной орбите.

В области исследований, направленных на системный уровень спутникового видеовещания и связанных с формированием стандартов семейства DVB-S2, а также в области сжатия видеоданных, разработки видеокодеков и исследовании качества видеопотока хорошо известны работы Кривошеева М. И., Гоголя А. А., Парамонова А. И., Маколкиной М. А., Абилова А. В., Цыцулина А. К., Обуховой Н. А., Лысенко Н. В., Колмогорова А. Н., Шелухина О. И., Шмакова П. В., Дворковича А. В., Ярославского Л. П., Визильтера Ю. В., Ватолина Д. С., Morello A., Ahmed N., Wiegand T., Chiariglione L., Rao K. R., Sullivan G. J., Terriberry T., Wells N., Ohm J.-R. и др. Исследования показывают, что даже при оптимизации спутникового физического уровня основная часть системной устойчивости и приемлемой задержки достигается через управляемую избыточность и буферизацию, а не через минимизацию задержки как таковой. Кроме того, существующие исследования в данной области не могут обойти основные физические ограничения спутниковых каналов связи и уменьшить задержку распространения цифрового видеопотока, в том числе нейросетевых видеокодеков.

Исследования, направленные на уменьшение задержки передачи и сжатия КВО, базируются на теоретических трудах таких ученых, как Кучерявый А. Е., Парамонов А. И., Киричек Р. В., Владимиров С. С., Мутханна А. С. А., Вишневский В. М., Гайдамака Ю. В., Макаренко С. И., Боев Н. М., Мирошников В. И., Абросимов Л. И., Fettweis G., Latva-aho M., Popovski P., Giambene G. и др. Существующий научно-методический аппарат, связанный с оптимизацией передачи КВО в ГОНСС ограничен экспертным нормированием показателей и не учитывает динамическую вариативность параметров спутниковых и наземных сегментов ГОНСС, что приводит к возникновению «длинных хвостов» в распределении задержек. Для обеспечения детерминированного отклика в условиях нестационарного информационного обмена обоснована необходимость разработки методов сжатия КВО на прикладном уровне, где используется объединение нейросетевых автокодировщиков для сверхплотного сжатия КВО в латентное пространство признаков нейронной сети и адаптивных помехоустойчивых кодов для предотвращения потерь КВО при ошибках их восстановления из сверхплотного латентного пространства. Следует отметить, что применение механизмов помехоустойчивого кодирования в области латентных

признаковых пространств нейронных сетей для обеспечения сжатия данных никак не изучены.

Основные научные достижения в области разработки методик оценки эффективности систем информационного обмена при взаимодействии оператора с беспилотными системами базируется на достижениях системного анализа, теории информации и развития сетей связи, представленных в трудах Кучерявого А. Е., Гольдштейна Б. С., Киричка Р. В., Вишневого В. М., Маколкиной М. А., Кучерявого Е. А., Шелухина О. И., Абилова А. В., Bovik A., Popovski P., Giambene G., Timmerer C., Saad W. и др. Основные научные достижения данных исследований заключаются в создании многопараметрических моделей, связывающих физические показатели каналов связи (задержки, джиттер, вероятность битовой ошибки) с функциональной эффективностью контура взаимодействия оператора с беспилотной системой. Учеными обоснованы критерии оценки устойчивости информационного обмена в условиях стохастической динамики среды, разработаны метрики качества восприятия видеoinформации и формализованы требования к детерминированности доставки КВО. Однако совокупный анализ показал, что в существующих методиках для задач многокритериальной оценки эффективности используются частные критерии или их аддитивные свертки с весовыми коэффициентами, определяемыми с помощью экспертных методов, без учета вероятности достижения комплекса целей функционирования беспилотной системы. Кроме того, существующие подходы рассматривают требуемые показатели качества видеопотока на сетевом уровне в отрыве от динамики FPV и не обеспечивают прямой математической связи между параметрами канала информационного обмена и вероятностью достижения общей цели функционирования беспилотной системы.

Настоящая диссертационная работа в отличие от известных подходов к методам уменьшения задержки FPV-видеопотока и КВО предлагает методы уменьшения задержек кадров видеопотока на прикладном уровне (канале информационного обмена) на основе нейросетевых технологий за счет обработки информации во внутреннем латентном пространстве признаков нейронной сети через развернутую инфраструктуру фрагмента ГОНСС.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются каналы информационного обмена для взаимодействия оператора с беспилотной системой на фрагменте гибридной орбитально-наземной сети связи. Предметом исследования является комплекс моделей и методов уменьшения задержки информационных потоков в каналах информационного обмена за счет сжатия и предсказания FPV-видеопотока и команд взаимодействия оператора.

Таким образом, исходя из вышесказанного, имеет место **противоречие**, которое заключается с одной стороны в необходимости уменьшения задержки информационных потоков в каналах информационного обмена с учетом требований к перцептивному качеству восстановленного FPV-видеопотока при взаимодействии с беспилотными системами в гибридных орбитально-наземных сетях связи, а с другой стороны существует несовершенство научно-методического аппарата обоснования облика системы информационного обмена, а также методик оценки ее эффективности.

В связи с изложенным диссертационная работа, в которой решается **научная проблема**, направленная на разрешение указанного противоречия, является актуальной.

Цель работы достигается путем последовательного решения следующих задач:

- анализ текущего положения в области исследования беспилотных авиационных систем и их применения, роли и места гибридных орбитально-наземных сетей связи в области взаимодействия оператора с беспилотными системами, а также анализ подходов к управлению БПЛА,

- разработка метода обоснования архитектуры системы информационного обмена для взаимодействия оператора с беспилотными системами на фрагменте гибридной орбитально-наземной сети связи,

- разработка моделей каналов информационного обмена беспилотных систем фрагмента гибридной орбитально-наземной сети связи,

- разработка методов по уменьшению задержки передачи кадров FPV-видеопотока беспилотных систем на основе нейросетевого сжатия,

- разработка метода уменьшения задержки передачи FPV-видеопотока беспилотных систем на основе предсказания будущих кадров нейросетевой предсказательной моделью,

- разработка метода адаптивного сжатия команд взаимодействия оператора с беспилотной системой на основе нейросетевых автокодировщиков и помехоустойчивых кодов,

- анализ эффективности предложенных методов сжатия FPV-видеопотока и команд взаимодействия оператора по сравнению с существующими по параметрам задержки и потери кадров FPV-видеопотока, а также качеству восстановленных видеокадров,

- разработка методики оценки эффективности функционирования системы информационного обмена при взаимодействии оператора с беспилотными системами на фрагменте гибридной орбитально-наземной сети связи.

Научная новизна.

1. Разработан новый метод обоснования архитектуры системы информационного обмена для взаимодействия оператора с беспилотными системами, отличающаяся от известных возможностью учета в ее составе спутникового сегмента гибридной орбитально-наземной сети связи, состоящего из спутниковых группировок космических аппаратов на геостационарной и низкой околоземной орбитах, за счет снижения задержек передачи информационных потоков до требуемых значений.

2. Разработаны модели каналов информационного обмена беспилотных систем фрагмента гибридной орбитально-наземной сети связи для передачи информационных потоков при взаимодействии с беспилотными системами, отличающиеся от известных тем, что учитываются показатели задержек и потерь кадров FPV-видеопотока и команд взаимодействия оператора на уровне приложения при использовании нейросетевых видеокодексов. На базе серии натурных экспериментов определены законы распределения параметров задержки уровня приложения для различных каналов информационного обмена фрагментов гибридной сети связи.

3. Разработаны методы сжатия FPV-видеопотока в каналах информационного обмена беспилотных систем на основе нейросетевых моделей вариационных

автокодировщиков и глубокого сжатия контекста, отличающееся от известных тем, что учитывается специфика взаимодействия оператора с беспилотной системой в режиме FPV, при котором ключевым показателем эффективности является задержка передачи FPV-видеопотока на уровне приложения при сохранении устойчивости к потерям фрагментов видеок кадров, что достигается за счет преобразования пиксельного представления отдельных видеок кадров во внутреннее латентное пространство признаков нейронной сети с последующим его квантованием, сжатием и передачей по каналу информационного обмена.

4. Разработан метод уменьшения задержки кадров FPV-видеопотока беспилотных систем на основе предсказания будущих кадров, обеспечивающий уменьшение задержки в канале информационного обмена космического сегмента фрагмента гибридной орбитально-наземной сети связи, отличающийся от известных тем, что данный метод позволяет уменьшить не только задержку сериализации и задержку в очередях, но и задержку распространения цифрового FPV-видеопотока в том числе нейросетевых видеокодексов.

5. Разработан метод адаптивного сжатия и агрегации команд взаимодействия оператора с беспилотными системами, отличающийся от известных тем, что для уменьшения задержек передачи информационного потока команд взаимодействия на прикладном уровне используется объединение нейросетевых автокодировщиков для сверхплотного сжатия в латентное пространство признаков нейронной сети и адаптивных помехоустойчивых кодов для предотвращения потерь команд взаимодействия оператора при ошибках их восстановления из сверхплотного латентного пространства. Разработанная нейронная сеть обеспечивает сжатие команд с потерями, для устранения которых применяется помехоустойчивый код Рида-Соломона, работающий в режиме исправления ошибок.

6. Разработана комплексная методика оценки эффективности функционирования системы информационного обмена при взаимодействии оператора с беспилотными системами на фрагменте гибридной орбитально-наземной сети связи, в которой, в отличие от известного подхода к решению многокритериальных задач, основанного на использовании в качестве скалярного показателя эффективности различных сверток заданных критериев с весовыми коэффициентами, определяемыми с помощью экспертных методов, предложено использовать в качестве такого показателя вероятность достижения комплекса целей функционирования беспилотной системы.

Теоретическая значимость работы. Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в развитии научно-методического аппарата построения и оценки каналов информационного обмена для взаимодействия оператора с беспилотными системами в гибридных орбитально-наземных сетях связи за счет разработки нового комплекса взаимосвязанных моделей и методов, учитывающих специфику уровня приложения FPV. В работе получили дальнейшее развитие подходы к обоснованию архитектуры системы информационного обмена, моделированию задержек и потерь FPV-видеопотока и КВО, экспериментальному определению требований к перцептивному качеству восстановленного видеопотока на основе вероятности достижения целей функционирования беспилотной системы, а также к многокритериальной оценке эффективности, в которой вместо традиционных экспертно

задаваемых сверток частных критериев предложено использовать вероятность достижения комплекса целей функционирования беспилотной системы. Существенное теоретическое значение имеют также разработанные методы нейросетевого сжатия FPV-видеопотока, метод уменьшения задержки передачи FPV-видео за счет предсказания будущих кадров и метод адаптивного сжатия и агрегации КВО, основанные на обработке данных во внутреннем латентном пространстве признаков нейронной сети, что расширяет существующие представления о возможностях уменьшения задержки информационных потоков в каналах информационного обмена и формирует теоретическую основу для дальнейшего развития систем FPV в наземных и спутниковых сегментах гибридных сетей связи.

Практическая ценность работы. Практическая ценность работы состоит в создании нейросетевого видеокодека для кодирования FPV-видеопотока с низкой задержкой в гибридной орбитально-наземной сети связи, а также протокола прикладного уровня FPV-CTVP (First Person View – Command Telemetry Video Protocol) для управления информационными потоками беспилотных систем. Использование разработанной архитектуры системы информационного обмена и методов нейросетевого сжатия FPV-видеопотока позволяют уменьшить задержку его передачи в HD качестве в спутниковой геостационарной сети связи в среднем на 78% с экономией пропускной способности на 40% по сравнению со стандартными видеокодеками. Для наземного сегмента фрагмента гибридной орбитально-наземной сети связи (мобильная сеть связи LTE/LTE adv общего пользования), такая задержка уменьшается в среднем на 20% при экономии пропускной способности на 53%. Разработанная нейросетевая модель маскирования видеопотока позволяет уменьшить размер сжатой бинарной последовательности на выходе нейросетевого видеокодера при дополнительной экономии пропускной способности на 25%. Дополнительно разработанный метод предсказания кадров видеопотока позволяет уменьшить задержку передачи цифрового FPV-видеопотока беспилотных систем на 40–120 мс в зависимости от его динамики, что позволяет сократить задержки передачи цифрового FPV-видеопотока нейросетевых видеокодеков (в зависимости от конфигурации) на 18–40% через каналы информационного обмена космического сегмента фрагмента гибридной орбитально-наземной сети связи, состоящего из группировок космических аппаратов на низкой околоземной орбите, и на 5–30% – на геостационарной орбите, а также расширить возможность передачи информационных потоков при взаимодействии с беспилотными системами при использовании каналов связи с большими задержками распространения цифрового видеопотока. Метод сжатия команд взаимодействия оператора с беспилотными системами в отличие от известных обеспечивает положительное сжатие данных протокола CRSF и на 9,71% выше, чем ближайший по коэффициенту сжатия алгоритм Brotli, что позволяет уменьшить необходимую скорость в канале информационного обмена. Самостоятельную практическую ценность имеют полученные автором научно-обоснованные требования к перцептивному качеству восстановления видеопотока, при котором вероятность достижения цели функционирования беспилотной системы будет не ниже заданной. Кроме этого, разработанная методика оценки эффективности функционирования системы информационного обмена при взаимодействии оператора с беспилотными системами позволяет оценить вероятность

попадания значений показателей эффективности каналов информационного обмена в область заданных требований, и на основе ее оценки обосновать параметры системы информационного обмена, а также на базе разработанных имитационных моделей каналов информационного обмена произвести сравнительную оценку существующих систем информационного обмена в каналах информационного обмена фрагмента гибридной орбитально-наземной сети связи.

Реализация результатов работы. Полученные в диссертационной работе результаты внедрены в научно-практическую деятельность ФГУП «Космическая связь» при проектировании гибридных сетей связи для реализации возможности удаленного визуального (фото и видео) мониторинга и управления устройствами IoT, в АО «РЕШЕТНЕВ» при выполнении инициативных научно-исследовательских работ, в ООО «КБ «Интеллектуальные приборы» при разработке интегрированных спутниковых радиолиний и системы подвижной спутниковой связи для БАС, а также видеосистемы для устойчивого телеуправления удаленными и подвижными объектами, в ФГБУ «16 Центральный научно-исследовательский испытательный ордена Красной Звезды институт имени маршала войск связи А.И.Белова» Министерства обороны Российской Федерации при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича при реализации особо значимого проекта ИЦК «Спутниковая связь» в решении прикладной задачи «Разработка программно-аппаратного комплекса управления БАС в гибридных орбитально-наземных сетях связи», чтении лекций, проведении практических занятий и лабораторных работ. Акты реализации диссертационных исследований представлены в Приложении В.

Методы исследования. При проведении исследований были использованы методы теории интерполяции, теории помехоустойчивого кодирования, теории оптимизации, теории вероятностей, теории машинного обучения и нейронных сетей, а также методы математической статистики и имитационного моделирования.

Основные научные результаты, выносимые на защиту.

1. Метод обоснования архитектуры системы информационного обмена для взаимодействия оператора с беспилотными системами на фрагменте гибридной орбитально-наземной сети связи, позволяющий учесть структуру гибридных орбитально-наземных сетей связи, в состав которых входит спутниковый сегмент, состоящий из спутниковых группировок космических аппаратов на геостационарной и низкой околоземной орбитах. [3, 9, 38].

2. Модели каналов информационного обмена беспилотных систем фрагмента гибридной орбитально-наземной сети связи, позволяющие установить зависимость между параметрами каналов информационного обмена и показателями эффективности их функционирования [8, 11, 17].

3. Комплекс методов по уменьшению задержки передачи кадров FPV-видеопотока беспилотных систем на основе нейросетевого сжатия, позволяющий уменьшить задержку передачи цифрового FPV-видеопотока и требования к пропускной способности каналов информационного обмена фрагмента гибридной орбитально-наземной сети связи [2, 21, 26, 29, 30].

4. Метод уменьшения задержки передачи FPV-видеопотока беспилотных систем на основе предсказания будущих кадров нейросетевой предсказательной моделью, позволяющий уменьшить задержку передачи цифрового FPV-видеопотока с использованием нейросетевых видеокодеков в каналах информационного обмена фрагмента гибридной орбитально-наземной сети связи [15, 25].

5. Метод адаптивного сжатия команд взаимодействия оператора с беспилотными системами на основе нейросетевых автокодировщиков и помехоустойчивых кодов, позволяющий уменьшить требования к пропускной способности канала информационного обмена [5, 6].

6. Комплексная методика оценки эффективности функционирования системы информационного обмена при взаимодействии оператора с беспилотными системами на фрагменте гибридной орбитально-наземной сети связи, позволяющая оценить вероятность попадания значений показателей эффективности каналов информационного обмена в область заданных требований, и на основе ее оценки обосновать параметры системы информационного обмена [4, 12, 27, 33].

Достоверность результатов. Степень достоверности полученных результатов подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами натурных экспериментов и имитационного моделирования, а также широким спектром публикаций и выступлений на международных научных конференциях и симпозиумах.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждались и были одобрены на следующих конгрессах, симпозиумах и конференциях: 25 и 27-й международных конференциях «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь» (DCCN) (Москва, 2022, 2024); 6, 8 и 9-й международных конференциях «Информация, управление и коммуникационные технологии» (ICST) (Астрахань, 2022; Владикавказ, 2024; Гомель, 2025); Международной конференции по современным системам вычислений и связям следующего поколения ICACNGC (Санкт-Петербург, 2023); VII международной научно-практической конференции «Актуальные исследования и инновации в науке и технике» (Москва, 2023); XIII и XIV международных научно-технических и научно-методических конференциях «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (АПИНО) (Санкт-Петербург, 2024, 2025); Региональной научно-методической конференции магистрантов и их руководителей «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики» (ПКМ-2023) (Санкт-Петербург, 2023); V Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов и их руководителей «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации» (ПКМ-2024) (Санкт-Петербург, 2024), Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов, аспирантов и их руководителей «Перспективные телекоммуникационные технологии и развитие цифровых кластеров в России и мире» (ПКМ-2025) (Санкт-Петербург, 2025); 79-й и 80-й научно-технических конференциях СПб НТО РЭС им. А.С. Попова (Санкт-Петербург, 2024, 2025); Научно-практической конференции с международным участием «Актуальные проблемы информатизации в цифровой экономике и научных исследованиях» (Москва, 2024); 4-й Международной конференции по сетям будущего и распределенным системам (ICFNDS-2021) (Санкт-Петербург, 2021); 13-м

международном конгрессе по ультрасовременным телекоммуникациям и системам управления (ICUMT-2021) (Брно, Чехия, 2021); 65-й и 66-й Научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов НТК ППС (Санкт-Петербург, 2025, 2026); XIX международном симпозиуме, посвященного 300-летию РАН и 100-летию академика В.П. Макеева «Фундаментальные и прикладные проблемы науки» (Челябинск, 2024); XXVIII международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2025) (Санкт-Петербург, 2025); VI международной конференции по нейронным сетям и нейротехнологиям (NeuroNT'2025) (Санкт-Петербург, 2025); VIII международной научно-технической конференции «Радиотехника, электроника и связь» (РЭиС-2025).

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 84 опубликованных работах, в том числе в 38 работах, опубликованных в журналах из перечня ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации; 7 работах, в изданиях, включенных в международные базы цитирования; 1 монографии; 5 результатах интеллектуальной деятельности; 3 отчетах о НИР; 30 работах в других научных изданиях и материалах конференций.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа выполнена по специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций и соответствует следующим пунктам паспорта специальности: 1, 2, 3, 4, 5, 11, 18, 19.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и 3 приложений. Работа содержит 523 страницы машинописного текста, 152 рисунка, 67 таблиц и список литературы из 491 наименования.

Личный вклад автора. Все основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Экспериментальные исследования проведены под научным руководством автора при его непосредственном участии.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены цели, задачи, новизна и практическая значимость работы, сформулирована научная проблема, объект и предмет исследований, а также новые научные результаты, выносимые на защиту.

Глава 1 диссертационной работы посвящена анализу технологических и телекоммуникационных предпосылок, определяющих современный облик взаимодействия с беспилотными авиационными системами (БАС) от первого лица и формирующих требования к каналам информационного обмена в условиях необходимости глобального покрытия и работы за пределами прямой видимости. Приведена характеристика БАС как киберфизических систем XXI века, систематизированы варианты управления БАС, раскрыта специфика FPV как наиболее требовательного к задержке класса приложений. Рассмотрены современные технологии цифрового кодирования видеоинформации и проведен анализ источников задержек в видеосистемах реального времени. Рассмотрены гибридные сети связи как базовая инфраструктура для обеспечения FPV с глобальным покрытием, включая NTN, интегрированные сети «космос-воздух-земля-море» (SAGSINs) и гибридные орбитально-

наземные сети (HSTNs). В выводах по главе 1 обобщено, что экспоненциальный рост областей применения БАС и смещение управления в область загоризонтного объективно формируют потребность в контроле полетов в реальном времени при глобальном покрытии связью, при этом режим FPV выступает предельным по требованиям к задержке сценарием, что делает задачу уменьшения задержки видеопотока ключевой научно-технической проблемой последующих глав диссертации.

Глава 2 диссертационной работы посвящена разработке архитектуры системы информационного обмена (СИО) для взаимодействия оператора с беспилотными системами в ГОНСС. Введено понятие *канала информационного обмена* (КИО) как канала передачи информационного потока «верхнего уровня». В качестве показателей задержек кадров FPV-видео T_3^B и КВО T_3^K обосновано использование задержки «стекло-стекло» G2G (Glass-to-Glass) и задержки «движения к фотону» M2P (Motion-to-Photon latency).

Минимизация величины T_3^B и T_3^K является одним из ключевых показателей эффективности системы FPV. Передача информационных потоков в рамках FPV осуществляется на прикладном уровне КИО. На рисунке 1 представлена структурная схема фрагмента ГОНСС с КИО различной топологии.

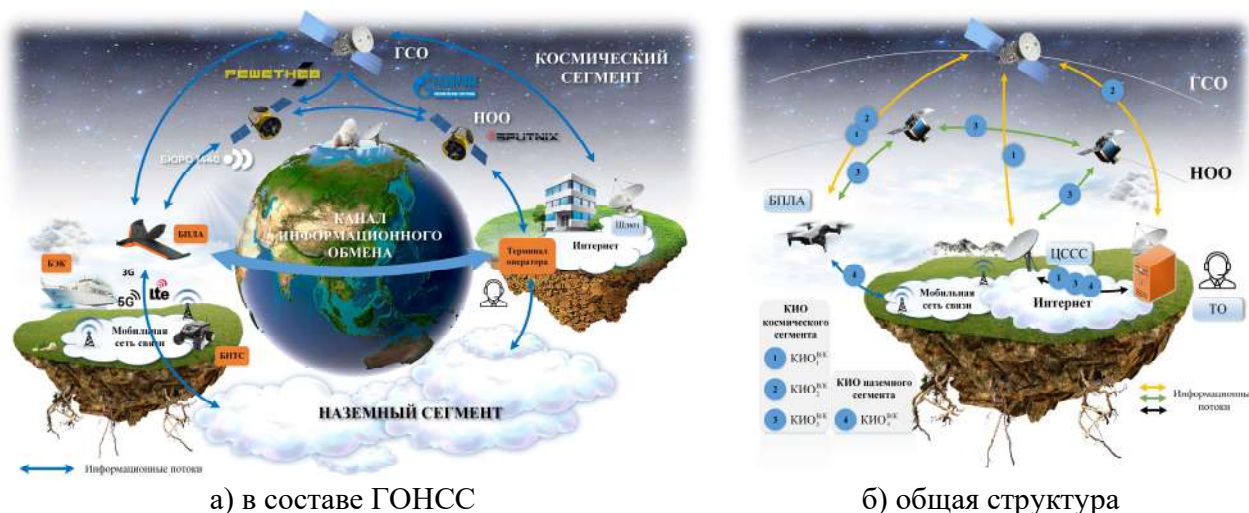


Рисунок 1 – Каналы информационного обмена

Еще одним значимым показателем эффективности системы FPV на прикладном уровне является перцептивное качество восстановленного видеопотока. Для его характеристики в диссертационном исследовании обосновано использование объективных вычислимых метрик качества DISTs (для оценки текстурного сходства и устойчивости к пространственным искажениям) и SSIM (дополнительный показатель для оценки локального сходства на уровне пикселей изображения). Введен показатель вероятности потерь $P_{\text{потерь}}$, который характеризует долю потерянных видеок кадров или КВО, для более полной оценки качества передачи FPV-видео и КВО в соответствующем КИО. Следовательно, в качестве показателей эффективности системы FPV необходимо использовать такие показатели эффективности функционирования (ПЭФ), как:

$$\{T_3^B, T_3^K, \text{DISTs}, \text{SSIM}, P_{\text{потерь}}\}. \quad (1)$$

Формально цель диссертационного исследования заключается в обосновании облика системы информационного обмена (СИО), при котором будет соблюдаться минимизация ПЭФ T_3^B и T_3^K при обеспечении требуемого перцептивного качества восстановленного видеопотока. Параметрами, характеризующими облик системы FPV, являются параметры моделей кодирования и КИО. При этом задача установления зависимости ПЭФ СИО от параметров, характеризующих облик этой системы, может быть представлена в следующем виде.

Дано:

$\text{КИО} = \{\text{кио}_i\}_I$ – множество I структур КИО наземного и космического сегментов ГОНСС;

$V = \{v_i\}_{I_V}$ – множество I_A моделей видеокодеков;

$\mathbf{v}_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iJ_{vi}}]^T$ – вектор, характеризующий параметры v_{ij} i -ой модели

видеокодека;

J_{vi} – количество параметров i -ой модели видеокодека;

$C = \{\mathbf{c}_i\}_{I_C}$ – множество I_C вариантов моделей кодеков КВО;

$\mathbf{c}_i = [c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{iJ_{ci}}]^T$ – вектор, характеризующий параметры c_{ij} i -ого кодека КВО;

J_{ci} – количество параметров i -ого кодека КВО.

Найти: $w^* = \arg \min_{w \in \Delta} \begin{cases} T_3^B(w) \\ T_3^K(w) \end{cases}$, где $w = (\text{кио}_i, v_{ij}, c_{ij})$,

$$\begin{aligned} \Delta &= \left\{ w \mid P[\text{DISTS}(w) \in \Pi_1; \text{SSIM}(w) \in \Pi_2; P_{\text{потерь}}(w) \in \Pi_3] \geq P^{\text{тр}} \right\}, \\ \tilde{\Pi} &= \left\{ \Pi_1 = \{0; \text{DISTS}^{\text{тр}}\}, \Pi_2 = \{0; \text{SSIM}^{\text{тр}}\}, \Pi_3 = \{0; P_{\text{потерь}}^{\text{тр}}\} \right\}, \\ P[\{\text{DISTS}, \text{SSIM}, P_{\text{потерь}}\} \in \tilde{\Pi}] &= \\ &= \underbrace{\int \int \int}_{\tilde{\Pi}} (\text{DISTS}, \text{SSIM}, P_{\text{потерь}}) dP_{\text{потерь}} d\text{SSIM} d\text{DISTS}, \end{aligned} \quad (2)$$

где w – параметры, характеризующие облик СИО, Π_1, Π_2, Π_3 – области заданных требований к каждому из ПЭФ.

Для решения поставленной задачи необходимо поэтапно решить следующие частные задачи:

1. Формализация и определение множества возможных структур КИО кио_i .
2. Определение пространства вариантов моделей видеокодеков $V v_{ij}$.
3. Определение множества вариантов моделей кодеков КВО с последующей фильтрацией для выбора наиболее соответствующих критериям эффективности и точности $C c_{ij}$.
4. Создание и построение моделей КИО на основе заданных параметров и требований.

Более формально это можно записать следующим образом.

Дано: $w = (\text{КИО}_i, v_{ij}, c_{ij})$

Найти: $T_3^B = f_1(w); T_3^K = f_2(w); \text{DISTS} = f_3(w); \text{SSIM} = f_4(w); P_{\text{потерь}} = f_5(w),$ (3)

где f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 – зависимости ПЭФ СИО от параметров, характеризующих облик этой системы.

Реализация указанных этапов обеспечит переход к разработке комплексной модели функционирования СИО, обобщенная структурная схема которой представлена на рисунке 2, где представлены отдельные КИО как для передачи видеопотока КИО^В, так и для передачи КВО КИО^К в космическом и наземном сегментах фрагмента ГОНСС, а также производный показатель рассинхронизации видеопотока и КВО T_p . Данная модель позволяет выявить функциональную зависимость между параметрами, определяющими структуру СИО и показателями её эффективности (1).

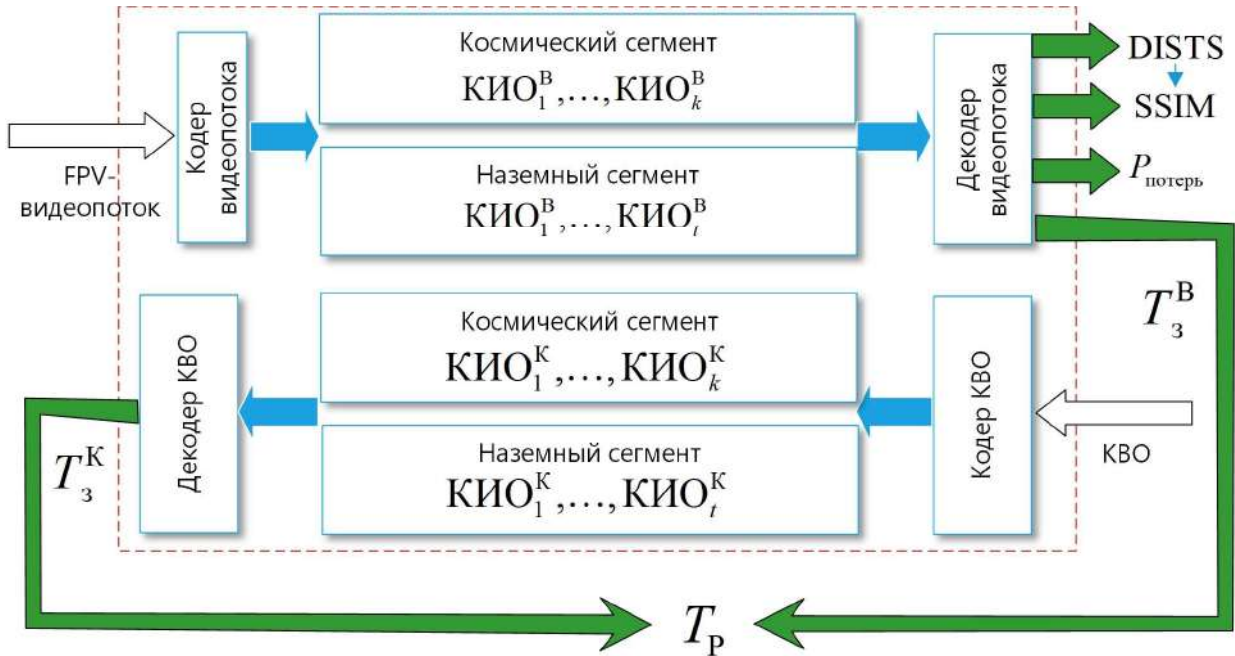


Рисунок 2 – Структурно-логическая схема модели СИО

Процесс функционирования СИО характеризуется влиянием множества неопределённых факторов различной природы, что обуславливает стохастический характер значений показателей эффективности (ПЭ). В связи с этим целесообразно перейти от задачи детерминированного анализа (2) к задаче вероятностного моделирования, заключающейся в определении зависимости вероятности достижения комплекса целей функционирования БС от заданных параметров, характеризующих облик (структуру) СИО.

Формально данная задача может быть представлена следующим образом:

$$P[(T_3^B \leq T_3^{B \text{ тр}}), (T_3^K \leq T_3^{K \text{ тр}}), (\text{SSIM} \geq \text{SSIM}^{\text{тр}}), (\text{DISTS} \leq \text{DISTS}^{\text{тр}}), (P_{\text{потерь}} \leq P_{\text{потерь}}^{\text{тр}})] = f(w), \quad (4)$$

где $T_3^{B \text{ тр}}, T_3^{K \text{ тр}}, \text{SSIM}^{\text{тр}}, \text{DISTS}^{\text{тр}}, P_{\text{потерь}}^{\text{тр}}$ – требуемые значения ПЭФ СИО.

Определение вероятности (4) должно выполняться на основе статистической обработки результатов многократного имитационного моделирования работы СИО при фиксированных исходных условиях. Зависимость (4) позволяет при обосновании параметров, описывающих структуру СИО, учитывать множественность её функциональных целей. При этом необходимо задать требуемые значения ПЭФ ($T_3^{\text{B тр}}, T_3^{\text{K тр}}, \text{SSIM}^{\text{тр}}, \text{DISTS}^{\text{тр}}, P_{\text{потерь}}^{\text{тр}}$). Поскольку в большинстве случаев жёстко формализованные требования к значениям этих показателей отсутствуют, их определение должно исходить из целей функционирования самой БС. Следует отметить, что в международных рекомендациях 3GPP TS 22.829 для задачи FPV нормативно определены только требуемые величины задержек видеопотока $T_3^{\text{B тр}} = 100$ мс и команд управления для линии C2 при VLOS $T_3^{\text{K тр}} \leq 10$ мс, при загоризонтном управлении такая задержка возрастает до $T_3^{\text{K тр}} \leq 360$ мс (для линий C2 при BVLOS).

Для нахождения вероятности (4) необходимо убедиться в независимости случайных величин с помощью процедур корреляционного анализа для попарного оценивания зависимостей показателей. При количестве таких показателей равном пяти сложность такого анализа становится значительной. В этой связи необходимо перейти к нахождению плотности вероятности системы ПЭФ $f(T_3^{\text{B}}, T_3^{\text{K}}, \text{SSIM}, \text{DISTS}, P_{\text{потерь}})$, где последующее её интегрирование даст искомую вероятность (4). Под восстановлением плотности вероятности ПЭФ СИО понимается процесс получения ее значений в различных точках многомерного пространства, заданного ПЭФ СИО, на основе выборки, полученных с помощью имитационного моделирования процесса функционирования КИО СИО.

Для решения задачи восстановления плотности вероятности ПЭФ СИО в работе использован метод Парзена-Розенблатта, который дает возможность получения функции плотности вероятности ПЭФ СИО в явном виде даже при малом объеме выборки исходных данных:

$$f(T_3^{\text{B}}, T_3^{\text{K}}, \text{SSIM}, \text{DISTS}, P_{\text{потерь}}) = \frac{1}{E} \sum_{i=1}^E \frac{1}{h_{T_3^{\text{B}}}} Y\left(\frac{T_3^{\text{B}} - T_{3i}^{\text{B}}}{h_{T_3^{\text{B}}}}\right) \times \frac{1}{h_{T_3^{\text{K}}}} Y\left(\frac{T_3^{\text{K}} - T_{3i}^{\text{K}}}{h_{T_3^{\text{K}}}}\right) \times \frac{1}{h_{\text{SSIM}}} Y\left(\frac{\text{SSIM} - \text{SSIM}_i}{h_{\text{SSIM}}}\right) \times \frac{1}{h_{\text{PSNR}}} Y\left(\frac{\text{DISTS} - \text{DISTS}_i}{h_{\text{PSNR}}}\right) \times \frac{1}{h_{P_{\text{потерь}}}} Y\left(\frac{P_{\text{потерь}} - P_{\text{потерь } i}}{h_{P_{\text{потерь}}}}\right). \quad (5)$$

Полученная плотность вероятности (5) позволит на основе ее многократного интегрирования оценить значение вероятности достижения комплекса целей функционирования СИО:

$$P = \int_{P_{\text{потерь}}^{\text{тр}}} \int_{\text{DISTS}^{\text{тр}}} \int_{\text{SSIM}^{\text{тр}}} \int_{T_3^{\text{K тр}}} \int_{T_3^{\text{B тр}}} f(T_3^{\text{B}}, T_3^{\text{K}}, \text{SSIM}, \text{DISTS}, P_{\text{потерь}}) dP_{\text{потерь}} d\text{DISTS} d\text{SSIM} dT_3^{\text{K}} dT_3^{\text{B}}. \quad (6)$$

Результаты проведённого анализа указывают на целесообразность применения метода стохастического численного интегрирования на основе алгоритма Монте-Карло для расчёта вероятности (6).

Далее в *разделе 2.2* представлены вероятностные модели КИО наземного и космического сегментов ГОНСС, включая частные случаи для низкоорбитальных и геостационарных спутниковых систем.

Различные структуры КИО (рис. 16) представляют собой совокупность множества сегментов передачи данных, каждый из которых характеризуется собственной функцией распределения задержек и вероятностей потерь кадров FPV-видеопотока и КВО. Объединение этих сегментов формирует структуру *гибридного КИО*.

Как показали результаты исследований, распределение задержки уровня приложения FPV наземного (3G/LTE/LTE adv) сегмента для различных вариантов расположения БПЛА (от 0 до 6600 км до СВП) и космического сегмента ГОНСС от размера полезной нагрузки подчиняется закону *усеченного двухпараметрического бета-распределения*, где соответствие подтверждено критериями Пирсона и Колмогорова–Смирнова. В части космического сегмента фрагмента ГОНСС исследования проведены для орбитальной группировки (ОГ) ГСО «Ямал-601» и ОГ НОО «Старлинк» для европейского и тихоокеанского регионов.

Параметры формы бета-распределения для различных гибридных сегментов ГОНСС и типов передачи, включающих в себя сегмент Интернет (рис. 16), представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры формы бета-распределения

Сегмент ГОНСС	Тип	α	β	μ , мс	σ , мс
Наземный	3G/LTE	$2 \leq \alpha \leq 9$	$2 \leq \beta \leq 14$	$17 \leq m \leq 4354$	$0,1 \leq \sigma \leq 76$
Космический	ГСО	$1 \leq \alpha \leq 4,5$	$1 \leq \beta \leq 4$	$360 \leq m \leq 1575$	$2 \leq \sigma \leq 183$
	НОО	$0,3 \leq \alpha \leq 3,6$	$0,8 \leq \beta \leq 4$	см. (8)	см. (8)

Результаты исследований показали, что T_3^B наземного сегмента практически не зависит от расстояния между БПЛА и терминала оператора (ТО) в пределах до размера полезной нагрузки (сжатого бинарного представления кадра видеопотока и КВО) в 15 килобайт.

Важно отметить, что при передаче кадров размера более 3 килобайт через гибридный КИО космического сегмента с НОО, реализуемого ОГ «Старлинк», плотность вероятности величины T_3^B представляет собой смесь двух нормальных распределений:

$$f(T_3^B) = af_1(T_3^B) + bf_2(T_3^B) \quad (7)$$

где a и b – весовые коэффициенты.

Параметры законов распределения (7) $f_1(T_3^B)$ и $f_2(T_3^B)$ при размере кадров видеопотока до 3 килобайт равны соответственно:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 205 \text{ мс}, \sigma_1 = 3 \text{ мс}, \\ \mu_2 &= 230 \text{ мс}, \sigma_2 = 10 \text{ мс}, \end{aligned} \quad (8)$$

а изменение весовых коэффициентов при изменении полезной нагрузки от 3 до 15 килобайт для НОО для различных регионов представлены в табл. 2.

Полученные распределения и зависимости математического ожидания задержки от размера полезной нагрузки положены в основу имитационных моделей КИО^B и КИО^K

(рис. 2), и выбора параметров нейросетевых видеокодеков (НВК) и нейросетевых кодеков КВО (НККВО).

Таблица 2

Изменение вестовых коэффициентов смеси распределений для НОО

Полезная нагрузка		3 КБ	4 КБ	5 КБ	7 КБ	10 КБ	15 КБ
<i>a</i>	Европейский	0,82	0,78	0,71	0,62	0,47	0,41
	Тихоокеанский	0,8	0,78	0,68	0,62	0,55	0,4
<i>b</i>	Европейский	0,18	0,22	0,29	0,38	0,53	0,59
	Тихоокеанский	0,2	0,22	0,32	0,38	0,45	0,6

В разделе 2.3 разработана интегрированная архитектура СИО для взаимодействия с БС в ГОНСС (рис. 3), основанная на концепции КИО и обеспечивающая совместную передачу FPV-видеопотока, телеметрии и КВО по единому разработанному протоколу управления информационными потоками прикладного уровня FPV-CTVP (FPV Command, Telemetry, Video Protocol). Предлагаемая архитектура СИО включает в себя как наземный сегмент, представленный в виде мобильной сети связи, так и космический сегмент, включающий в себя спутниковые системы связи как на ГСО, так и на НОО. Основные компоненты системы сведены к специализированным функциональным модулям на стороне БПЛА и оператора, ориентированных на адаптивное управление интенсивностью видеопотока и на статистический контроль параметров КИО.

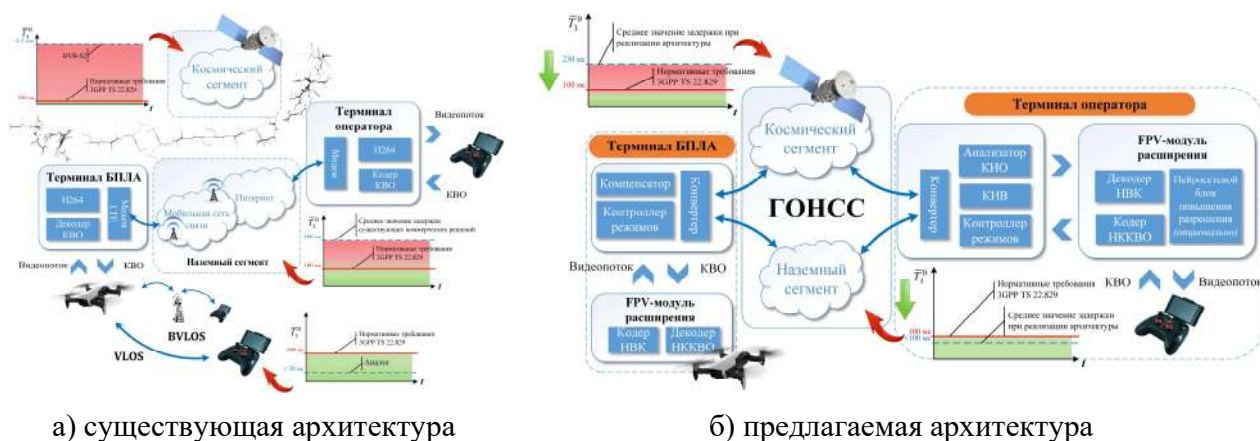


Рисунок 3 – Общая схема СИО

К данным модулям относятся терминалы БПЛА и оператора, включающие в себя блок конвертера протоколов и сегментов ГОНСС, контроллер режимов работы НВК и НККВО, контроллер интенсивности видеопотока (КИВ), обеспечивающий работу компенсационных механизмов, а также анализатор КИО, регулирующий параметры компенсации для поддержания требуемого качества КИО.

Также в состав СИО входят FPV-модули расширения, предназначенные для поддержки выполнения нейросетевых моделей. Включение описанных функциональных модулей обеспечило возможность учета космического сегмента в структуре СИО (рис. 3б) с сокращением T_3^B в космическом сегменте до требуемых значений, а в наземном сегменте до нормативных значений, определенных 3GPP TS 22.829. Структурная схема основных блоков представлена на рисунке 4.

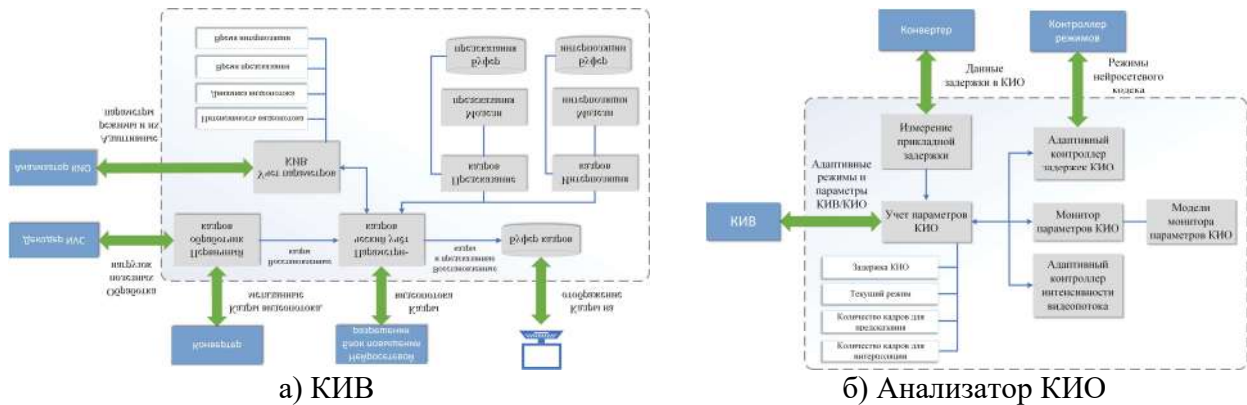


Рисунок 4 – Структурная схема блоков поддержки компенсационных механизмов

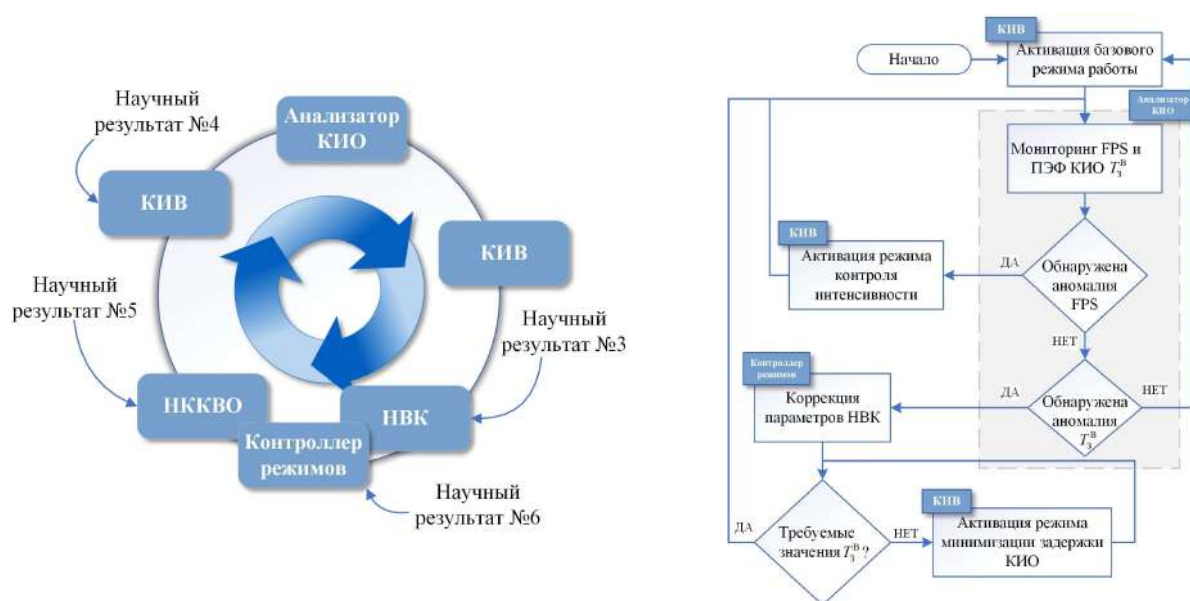
Блок анализатора ПЭ КИО (рис. 4б) обеспечивает непрерывный мониторинг T_3^B и T_3^K , детектирование аномальных колебаний частоты кадров (FPS) и задержек, управление активацией адаптивных режимов КИВ и вычисление оптимальных параметров этих режимов.

Центральный блок КИВ (рис. 4а) реализует адаптивные механизмы компенсации временной рассинхронизации. Модуль функционирует в трех дискретных режимах: базовом (без адаптации), режиме контроля интенсивности (интерполяция промежуточных кадров для компенсации джиттера FPV-видеокадров и повышения субъективного качества восприятия) и режиме минимизации задержки (предсказание последующих кадров для уменьшения задержки и рассинхронизации). Сформирована детальная архитектура КИВ с процедурами накопления точечных оценок и доверительных интервалов для FPS, динамических характеристик FPV-видеопотока и временных метрик интерполяции/предсказания.

Предложен и реализован замкнутый контур статистического мониторинга ПЭФ СИО (рис. 5а): блоки учета параметров инкрементально вычисляют средние, дисперсии и доверительные интервалы, а анализатор КИО применяет методы статистического контроля для выявления аномалий задержек и потерь на основе математического аппарата контрольных карт Шухарта, который позволяет отличить случайные колебания процесса изменения FPS и T_3^B от изменений, когда необходимо задействовать компенсационные механизмы КИВ. Тем самым архитектура переводится в режим самоадаптации, в котором параметры кодеков и интенсивность видеопотока подстраиваются под текущее состояние КИО (рис. 5б).

Контрольные карты Шухарта используют усреднение по времени для оценки параметров стохастических процессов. Установлено, что процесс изменения FPS стационарен, эргодичен, и только изменение состояния КИО приводит к изменению его математического ожидания и дисперсии, поэтому сделан вывод о том, что контрольные карты Шухарта могут использоваться для его статистического контроля.

Экспериментальные результаты применения контрольных карт к процессу поддержки интенсивности кадров видеопотока демонстрируют связь FPS от времени в зависимости от размера подгруппы агрегации n , где увеличение n приводит к снижению флуктуаций значений FPS как на индивидуальном, так и на среднегрупповом уровнях.



а) замкнутый контур

б) адаптационный механизм

Рисунок 5 – Функциональная схема работы адаптационных механизмов СИО

Рассмотрены два метода расчета контрольных пределов UCL и LCL : на основе среднегруппового размаха $\overline{R}^{(n)}$ (метод 1) и среднегруппового выборочного стандартного отклонения $\overline{\sigma}^{(n)}$ (метод 2). Определено, что оптимальному размеру подгруппы соответствует $n=19$ с вычислением контрольных пределов на основе $\overline{R}^{(n)}$ в соответствии с ГОСТ Р ИСО 7870-2-2015:

$$UCL / LCL = \overline{\overline{FPS}}^{(n)} \pm A_2 \times \overline{R}^{(n)},$$

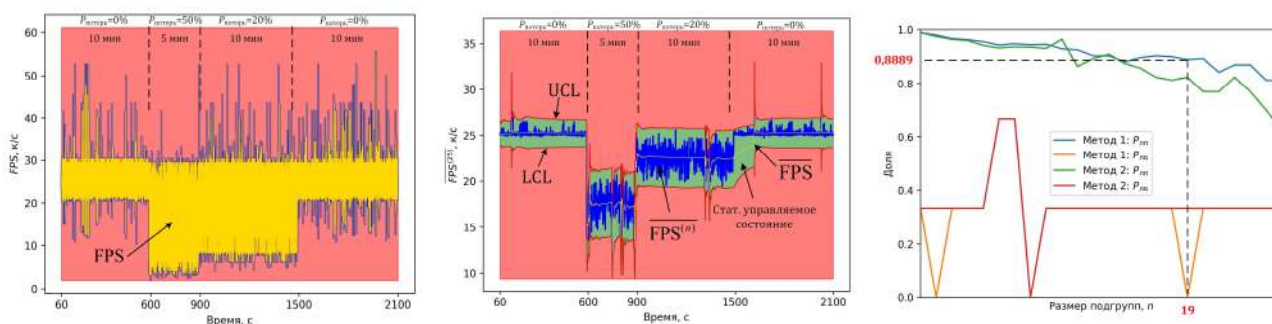
$$\overline{\overline{FPS}}^{(n)} = \frac{\sum_{k=1}^K \overline{FPS}_k^{(n)}}{K}, \quad \overline{R}^{(n)} = \frac{\sum_{k=1}^K R_k^{(n)}}{K}, \quad R^{(n)} = \max(FPS^{(n)}) - \min(FPS^{(n)}), \quad (9)$$

где $A_2=0.187$, $\overline{FPS}_k^{(n)}$ – среднегрупповое значение FPS, $\overline{\overline{FPS}}^{(n)}$ – среднегрупповое среднее значение.

Установлено, что при $n=19$ достигается отсутствие ошибок первого рода $P_{\text{ло}}=0$ (пропуск истинного выхода процесса из состояния статистической управляемости). Однако вероятность ошибки второго рода (ложное срабатывание) достигает значения $P_{\text{лп}}=0,8889$ (рис. 6в). Несмотря на высокую долю ложных срабатываний, влияние случайных флуктуаций FPS на её среднее значение остаётся несущественным. Выход процесса FPS из управляемого состояния характеризуется резким изменением верхних и нижних контрольных границ UCL и LCL (рис. 6), которые пересчитываются после поступления каждого нового индивидуального значения FPS на основе $\overline{R}^{(n)}$ (9).

На рисунке 6а отражено изменение моментарных значений модельного процесса изменения FPS, который включал в себя потери кадров видеопотока НВК в соответствии с 4-мя последовательными этапами измерений, длительностью 10-5-10-10 минут каждый: 0–50–20–0% потерь. На рисунке 6б отражены среднегрупповые значения $\overline{FPS}$

для вычисления контрольной карты, где зеленая область отражает значения, при которых система пребывает в статистически управляемом состоянии.



а) моментальные значения FPS

б) $\overline{FPS^{(n)}}$ при $n=25$

в) $P_{ло}$ и $P_{ли}$ для методов 1 и 2

Рисунок 6 – Границы управляемости процесса интенсивности видеопотока: метод расчёта с использованием среднего группового размаха

При каждом зафиксированном выходе процесса из статистически управляемого состояния (обнаружение аномалии) инициируется переоценка его характеристик и соответствующий пересчёт необходимого количества интерполируемых кадров для поддержания установленного уровня FPS на стороне оператора. В том случае, когда процесс фактически остаётся в пределах управляемого состояния, а $\overline{FPS}$ остаётся неизменным, интерполяция дополнительных кадров не выполняется. При ложном определении выхода процесса из управляемого состояния происходит пересчёт контрольных пределов. До достижения объёмом выборки $\overline{R^{(n)}}$ достаточного размера новые контрольные пределы могут демонстрировать систематическое смещение относительно эталонных контрольных пределов исходного процесса интенсивности. Вследствие этого при возникновении действительного выхода процесса из управляемого состояния в течение нескольких кадров видеопотока после ложного срабатывания вероятность его обнаружения снижается. Таким образом, показано, что высокое значение доли ложных срабатываний не оказывает критического негативного воздействия на эффективность предложенного метода.

В разделе 2.3.2.2 представлено описание адаптивного режима контроля интенсивности FPV-видеопотока, а также методов количественной оценки FPS. Показано, что с целью ослабления влияния случайных колебаний на результаты измерений, целесообразно осуществлять увеличение объёма выборки мгновенных значений FPS путём расширения размера подгрупп n . Данный подход позволяет достичь улучшения точности оценок интенсивности за счёт усреднения высокочастотной компоненты шумов, присущих исходным данным.

Раздел 2.3.2.3 посвящен описанию адаптивного режима минимизации задержки КИО^B в модуле КИВ, где реализуется встроенная адаптивная функция экстраполяции (предсказания) последующих кадров видеопотока (соответствующий метод предсказания будущих кадров описан в главе 4). Адаптивный режим сокращения T_3^B предназначен для поддержания его стабильных значений при изменениях условий КИО. Показано, что эффективность режима сокращения T_3^B количественно оценивается

сокращением времени рассинхронизации видеопотока на величину ΔT_p , что приблизительно составляет:

$$\Delta T_p \approx N_{\text{пред}} \times \text{FPS}_{\text{мин}} - T_{\text{пред}}, \quad (10)$$

где $N_{\text{пред}}$ – число предсказываемых кадров, $\text{FPS}_{\text{мин}}$ – минимальное значение FPS, $T_{\text{пред}}$ – время предсказания видеокадров.

В *разделе 2.4* описана спецификация разработанного протокола FPV-CTVP, обеспечивающего передачу FPV-видеопотока НВК через фрагмент ГОНСС с учетом адаптивных режимов, описанных выше.

В совокупности результаты главы 2 формируют архитектурно-модельную основу дальнейшего количественного обоснования (в последующих главах) параметров НВК и кодеков КВО применительно к реальным стохастическим характеристикам наземных и спутниковых КИО, а также обеспечивают реализацию адаптивного контура, уменьшающего рассинхронизацию FPV в изменяющихся сетевых условиях.

Глава 3 диссертационной работы посвящена разработке и исследованию нейросетевых видеокодеков. В *разделе 3.1* описываются структуры и результаты исследований по разработке НВК различных конфигураций. В *разделе 3.2.1* разработана конфигурация НВК_{LDM}, базовым элементом которой является диффузионная модель на основе элементов предобученной глубокой генеративной нейросетевой модели латентной стабильной диффузии (Latent Diffusion Model, LDM) (рис. 7), преобразующая (сжимающая) данные видеокадров в низкоразмерное представление вариационного автокодировщика (variational autoencoder, VAE) с добавлением шума с помощью процесса прямой диффузии. При этом VAE отображает данные не в фиксированный латентный вектор, а в некоторое распределение. Декодирование происходит путем итеративного процесса удаления шума во внутреннем латентном пространстве признаков z (ЛПП) с помощью нейросетевой модели U-Net.

Показано, что применение предложенной схемы к кадру Full HD (исходный размер $\approx 6,2$ МБ) позволяет получить сжатый видеокадр размером около 14 КБ, достигая коэффициента сжатия $K_c=456$.

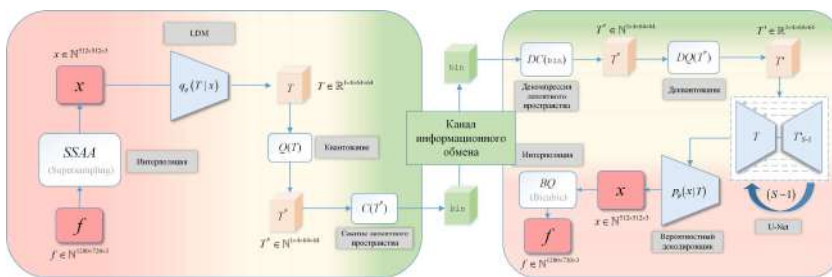


Рисунок 7 – Архитектура кодека НВК_{LDM}

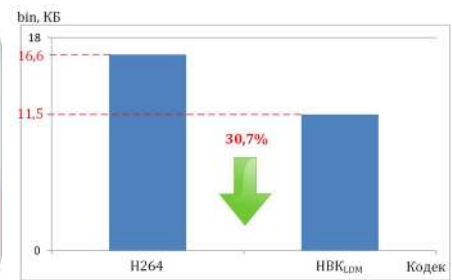


Рисунок 8 – размер кадра НВК

Следует заметить, что наибольший вклад в задержку декодирования вносит итеративный этап удаления шума в ЛПП моделью U-Net. Количество итераций напрямую влияет на время декодирования и на перцептивное качество итогового восстановленного видеокадра.

Проведенные исследования по оценке влияния наличия блока квантования ЛПП z на стороне кодера на качество передаваемого изображения показали, что наличие квантования существенно не снижает качества, но уменьшает размер передаваемого

видеопотока AVC/H264 (при битрейте 4 Мбит/с и 30 FPS средний размер кадра составляет около 16,6 КБ) в среднем на 30,7% до 11,5 КБ на кадр (рис. 8). Была вычислена мера расхождения $\chi^2=3,94$ в соответствии с критерием Пирсона. При этом найденная по таблицам вероятность приближенно равна 0,56, что не является малой величиной, поэтому гипотезу о сходимости законов распределения SSIM при использовании квантования и без него можно признать правдоподобной. Из этого следует вывод, что использование квантования не ухудшает качество сжимаемого видеопотока на стороне кодера.

Для обоснования необходимости использования квантования в U-Net и количества итераций U-Net на стороне декодера был проведен корреляционный и регрессионный анализ с целью оценки зависимости этих факторов от качества восстановленного видеопотока. Показано, что наиболее целесообразно использовать модель множественной линейной регрессии. Исходя из результатов регрессионного анализа, была получена зависимость SSIM от наличия квантования и количества итераций U-Net:

$$SSIM = 0,6536 - 0,0195 \times Q - 0,0017 \times S, \quad (11)$$

где Q – квантование, S – итерация (шаг) U-Net.

Исходя из (14), можно сделать вывод о том, что для выбора оптимальных значений предикторов (квантование U-Net, число итераций U-Net) необходимо выбирать наименьший шаг при фиксированном варианте сети U-Net (с квантованием/без квантования), при этом значение SSIM будет падать на 0,0017 единиц при увеличении шага на 1. При выборе квантованного варианта сети падение метрики будет на 0,0195. Таким образом, предложенный кодек позволяет достичь высокого коэффициента сжатия за счет переноса диффузии в латентное пространство и применения квантования.

Раздел 3.1.2 посвящен разработке и исследованию конфигураций НБК на основе VAE (рис. 9). Разработанный НБК_{VAE} реализует конвейерную обработку кадров, включающую предварительную обработку, нейросетевое преобразование, квантование и итоговое сжатие ЛПП. Для получения оптимальной архитектуры НБК_{VAE} с точки зрения коэффициента сжатия CR , минимального размера сжатого ЛПП M_{size} и требований к перцептивному качеству восстановленного видеопотока ($DISTS^{TP}$, $SSIM^{TP}$) проведено комплексное исследование различных сочетаний реализаций алгоритмов в блоках квантования. Рассмотрены алгоритмы предварительного квантования BitRound, BitGroom, GranularBR и Scale для уменьшения мощности множества уникальных значений N_{uniq} , а также алгоритмы основного квантования ЛИН, СТ, ЛОГ, мЛОГ, НС3, НС5, ГТ, мГТ, 2ЛОГ, м2ЛОГ и ГС для преобразования в целочисленный формат. Выполнено исследование методов сжатия без потерь (Deflate, LZMA, GZip, bzip2, Zstandard, Brotli, LZ4, LZ4F, LZ4H5, LZW, LZF, LZFSE, AEC, WebP, JPEG-LS) и графических форматов сжатия с разными значениями параметра качества *quality* (AVIF, HEIC, WebP, JPEG, JPEG-LS, JPEG XR, JPEG XL) применительно к задаче сжатия квантованных тензоров ЛПП, а также используемые модели VAE типов VQ (Vector Quantized) и KL (с регуляризацией Кульбака-Лейблера) с различными коэффициентами пространственного сжатия $f \in \{4, 8, 16, 32\}$ в составе НБК_{VAE}.

Анализ экспериментальных данных подтвердил наличие сильной корреляционной связи между N_{uniq} и коэффициентом сжатия CR . в процессе исследования экспериментально обоснована оптимальность архитектуры KL-f4 за счет более

плотного распределения латентных признаков и доказана необходимость метода *Scale* с линейным квантованием для преодоления 50-процентного барьера сжатия за счет уменьшения энтропии Шеннона $\lim_{N_{min} \rightarrow \min} H(T^*)$.

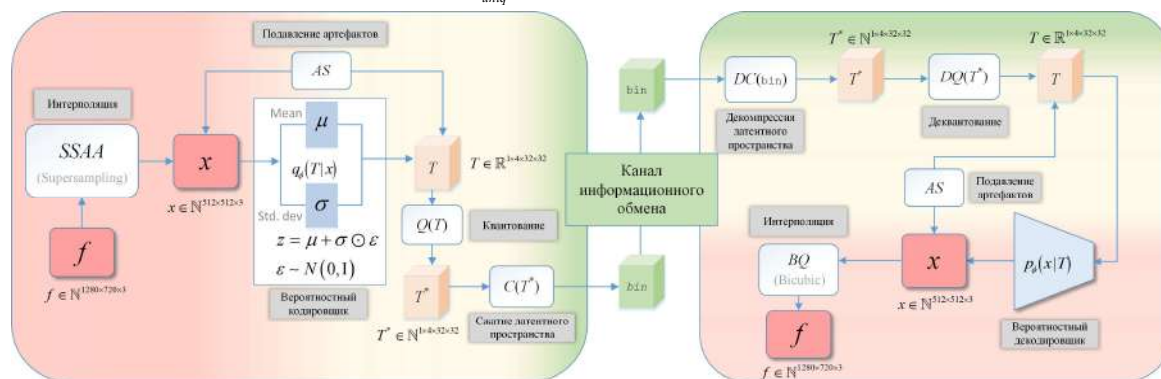


Рисунок 9 – Архитектура кодека НВК_{VAE}

Разработанные финальные конфигурации НВК_{VAE}, работающие в широком диапазоне скоростей представлены в таблице 3.

Таблица 3

Конфигурации НВК_{VAE}

№ п/п	Модель VAE	Алгоритм сжатия ЛПП	quality	Алгоритм квантования	SSIM _{ср}	DISTS _{ср} , дБ	Скорость, Кбит/с
1	KL-f4	JPEG XR	55	ЛИН scale 1	0,84	0,177	223
2	KL-f4	JPEG XR	60	ЛИН scale 1	0,85	0,167	293
3	KL-f4	JPEG XR	65	ЛИН scale 1	0,86	0,158	386
4	KL-f4	JPEG XR	70	ЛИН scale 1	0,86	0,156	490
5	KL-f4	JPEG XR	75	ЛИН scale 1	0,87	0,147	612
6	KL-f4	JPEG XR	80	ЛИН scale 1	0,88	0,137	780
7	KL-f4	JPEG XR	85	ЛИН scale 1	0,90	0,117	1219
8	KL-f16	AVIF	75	ЛИН scale 1	0,87	0,151	1505
9	KL-f16	AVIF	80	ЛИН	0,87	0,147	1639
10	KL-f16	JPEG XR	70	ЛИН	0,87	0,143	1665
11	KL-f16	JPEG XR	70	CT scale 1	0,87	0,142	1790
12	KL-f16	JPEG XR	75	CT scale 1	0,87	0,140	1896

Ключевым недостатком методов, основанных на VAE, является длительное время выполнения. Для компенсации этого недостатка в *разделе 3.1.3* предложена модификация НВК_{VAE}, заключающаяся в маскировании (удалении) данных в ЛПП на стороне кодера с последующим их восстановлением на стороне терминала оператора.

В результате применения данного алгоритма, исходная последовательность bin длиной len разделяется на две составляющие: немаскированная последовательность bin^* (предназначенная для передачи по КИО) длиной $dest_l = \lfloor len \times (1 - p) \rfloor$, маскированная (удаленная) последовательность $mask^*$ (которую необходимо восстановить) длиной $dest_m = \lfloor len \times p \rfloor$, где p – степень маски (процент предсказываемых значений). На стороне декодера, после получения bin^* и предсказания $\widehat{mask}^*$, запускается обратный алгоритм сборки, который восстанавливает полную последовательность $\widehat{bin}$.

Для реализации функции восстановления были разработаны и исследованы логистическая (ЛГРПМ) и линейная (ЛНРПМ) регрессионные модели, а также три нейросетевых архитектуры, генерируемых автоматически на основе параметров len и p :

– ПНСВБП-М и ПНСВБП-П: простые полносвязные нейронные сети, состоящие из трех слоев. ПНСВБП-М восстанавливает только маскированные значения ($dest_m$), а ПНСВБП-П – всю последовательность длины len , игнорируя требование о неизменности немаскируемых значений.

– НСВБП (нейронная сеть восстановления бинарной последовательности): наиболее сложная из предложенных моделей, использующая 1D-свёрточные слои для анализа bin^* и 1D-транспонированные свёрточные слои для генерации $\widehat{mask}^*$. Размерности слоев рассчитываются автоматически. Структура модели описана в главе 5 (рис. 20).

Важным положительным итогом является то, что процент «чёрных кадров» или фатальных сбоев декодера для всех моделей равнялся нулю, что говорит о робастности VAE-декодера к искаженным данным ЛПП.

Совокупный анализ качества (рис. 10) и производительности выявил, что НСВБП является единственной жизнеспособной моделью для реализации маскирующего кодера. Несмотря на техническую реализуемость, практическое применение маскирования сопряжено со значительным снижением перцептивного качества восстановленного видеопотока (рис. 11).

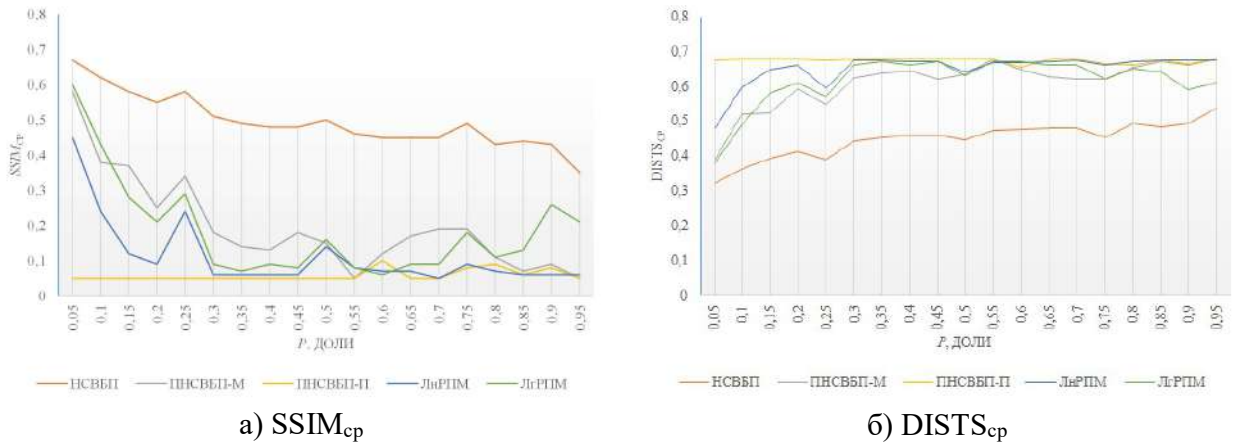


Рисунок 10 – Зависимость метрик качества от p

Раздел 3.2.4 посвящен описанию НВК_{DMCI} (рис. 12) на основе нейросетевой модели сжатия контекста DMCI (Deep Multi-Context Intra). Суть данного подхода заключается в применении внутри модели DMCI (рис. 13) гиперраспределения, которое представляет собой распределение параметров распределения.

Если внутреннее ЛПП выражается как T , параметры гиперраспределения как z , параметры модели гипердекодера как θ_{hd} , параметры контекстной priorной модели как θ_{cm} , а параметры энтропийного кодирования как θ_{ec} , то в рамках данной модели они распределены как:

$$p_T(T | z, \theta_{hd}, \theta_{cm}, \theta_{ec}) = \prod_i \left(N(\mu_i, \sigma_i^2) * U\left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) \right)(T) \quad (12)$$

где N – Гауссово распределение, U – равномерное распределение, μ и σ – среднее значение и среднеквадратическое отклонение соответственно.

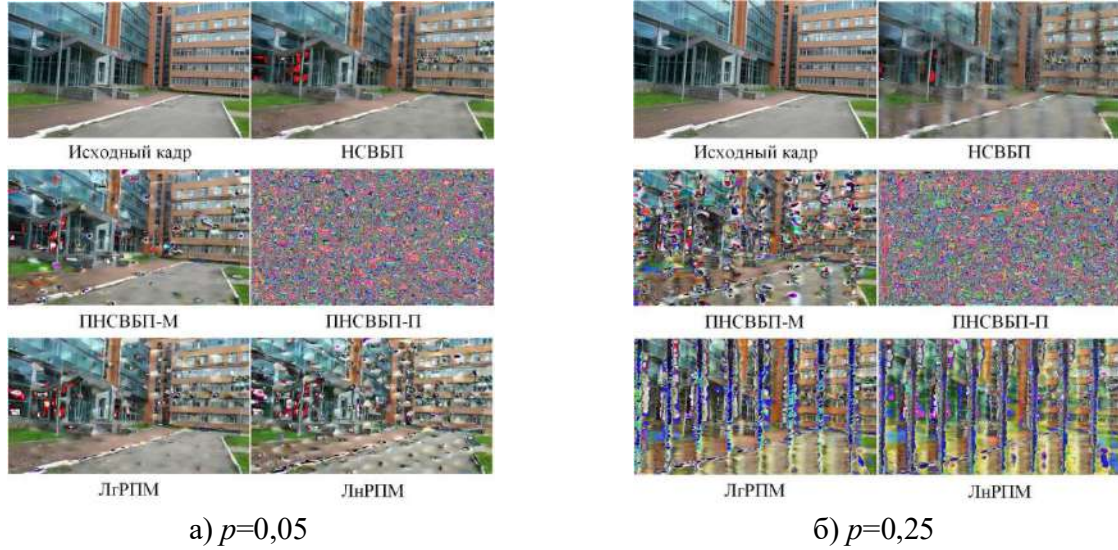


Рисунок 11 – Пример восстановленных кадров видеопотока при маскировании ЛПП

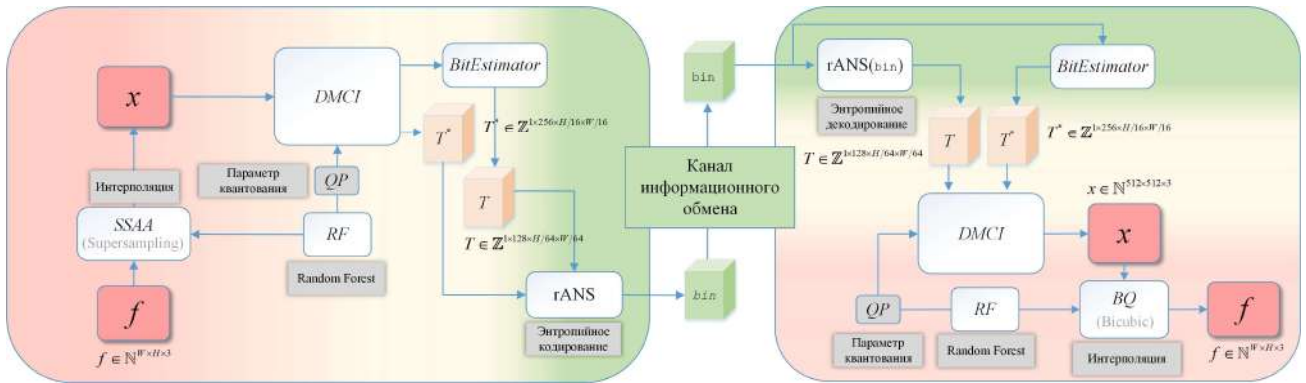


Рисунок 12 – Архитектура кодера NBK_{DMCI}

Таким образом, энтропийная модель соответствует:

$$R + \lambda \times D = E_{x \sim p_x} [-\log_2(p_T T)] + E_{x \sim p_x} [-\log_2(p_z z)] + \lambda \times E_{x \sim p_x} \|x - \hat{x}\|_2^2 \quad (13)$$

где R – полоса пропускания, D – искажение, а λ – параметр, отражающий соответствие между R и D и равный:

$$\lambda = \exp \left(\ln \lambda_{\min} + \frac{q_t}{q_{\text{num}} - 1} \times (\ln \lambda_{\max} - \ln \lambda_{\min}) \right), \quad (14)$$

где $q_t \in [0; q_{\text{num}} - 1]$ – входной параметр квантования, q_{num} – количество допустимых значений параметра q_t (по умолчанию равно 64), $\lambda_{\min}$ и $\lambda_{\max}$ – это минимальное и максимальное значения параметра λ соответственно. По умолчанию данные значения равны 1 и 768. Блок профилирования видеопотока (рис. 12) используется для адаптивной подстройки параметра QP и разрешения кадра видеопотока в зависимости от скорости в КИО $bandwidth_{\text{req}}$. Для реализации функции данного блока была разработана специализированная ML модель «случайного леса». Если для реальной скорости

$bandwidth_{real}$ не выполняется условие:

$$0,7 \times bandwidth_{req} < bandwidth_{real} < 1,3 \times bandwidth_{req}, \quad (15)$$

то новое значение QP и параметры разрешения для интерполяции выбираются с использованием данной модели, чтобы при соблюдении условия (15) перцептивное качество восстановленного видеопотока (по метрикам DISTS и SSIM) было максимально возможным.

Блок *BitEstimator* реализует параметризованную энтропийную модель, предназначенную для аппроксимации дискретного распределения значений тензора ЛПП T . На основе данной модели вычисляются кумулятивные функции распределения CDF, используемые энтропийным кодером для преобразования гиперлатента в бинарную последовательность (см. далее). Таким образом, кодирование гиперлатента осуществляется не напрямую, а через промежуточный этап оценки его статистических характеристик.

Процесс кодирования упрощённо изображен на рисунке 13 и включает в себя следующие блоки:

1. *Сверточная нейронная сеть* последовательно преобразовывает кадр во внутреннее ЛПП, где часть пространственной детализации переносится в каналы признаков. Сверточные блоки уплотняют информационный сигнал и устраняют избыточность. На одном из этапов масштаб ЛПП корректируется параметром квантования QP , который влияет на функцию потерь DMCI, которая применяется для обучения данной модели. Извлеченные признаки используются далее как контекст для предсказания признаков будущего видеокадра.

2. *Гиперэнкодер* извлекает статистические признаки из ЛПП. Полученные данные используются для вычисления параметров распределений, необходимых на этапе энтропийного кодирования.

3. *Гипердекодер* вычисляет грубое статистическое описание – вспомогательное латентное представление, отражающее закономерности и распределения величин внутри ЛПП и необходимое для более точной работы контекстной priorной модели.

4. *Контекстная priorная модель*, используя грубые оценки статистики ЛПП, предсказывает локальные параметры распределения для каждого значения. Анализирует уже переданные кадры и контекст для предсказания значений ЛПП текущего кадра.

5. *Энтропийное кодирование ЛПП* реализуется тремя взаимосвязанными компонентами:

1. PMF (Probability Mass Function) – дискретное распределение вероятностей, описывающее, с какой частотой каждое квантованное значение ЛПП может встретиться. Параметры распределения (μ и σ), вычисленные контекстной priorной моделью, определяют форму PMF и задают вероятностную структуру данных. Из значений ЛПП вычитаются их предсказанные средние значения, образуя остаток. Далее из заранее вычисленного банка из 128 нормальных распределений подбирается более близкое распределение для каждого значения ЛПП, а также вероятность появления всех



Рисунок 13 – Упрощённая схема работы НВК_{DMCI}

элементов в ЛПП, что и образует PMF.

2. CDF (Cumulative Distribution Function) – кумулятивная форма PMF, где каждая позиция хранит сумму всех предыдущих вероятностей. В реализации она представлена в виде целочисленной таблицей фиксированной длины, что позволяет эффективно преобразовывать вероятности в диапазоны без операций с плавающей точкой.

3. rANS (Range Asymmetric Numeral System) – алгоритм энтропийного кодирования, который работает как система последовательных преобразований внутреннего состояния – большого целого числа, в котором поочерёдно «упаковываются» символы ЛПП в соответствии с их диапазонами из CDF. Чем чаще встречается значение, тем меньше бит требуется для его записи, что обеспечивает плотность кодирования, близкую к теоретическому пределу энтропии.

Определен диапазон возможных значений ПЭФ T_3^B для КИО^B космического сегмента фрагмента ГОНСС при использовании НВК различных архитектур (рис. 15). Структура стенда со схемой измерений (рис. 14а) для ОГ «Ямал-601» представлена на рисунке 14б.

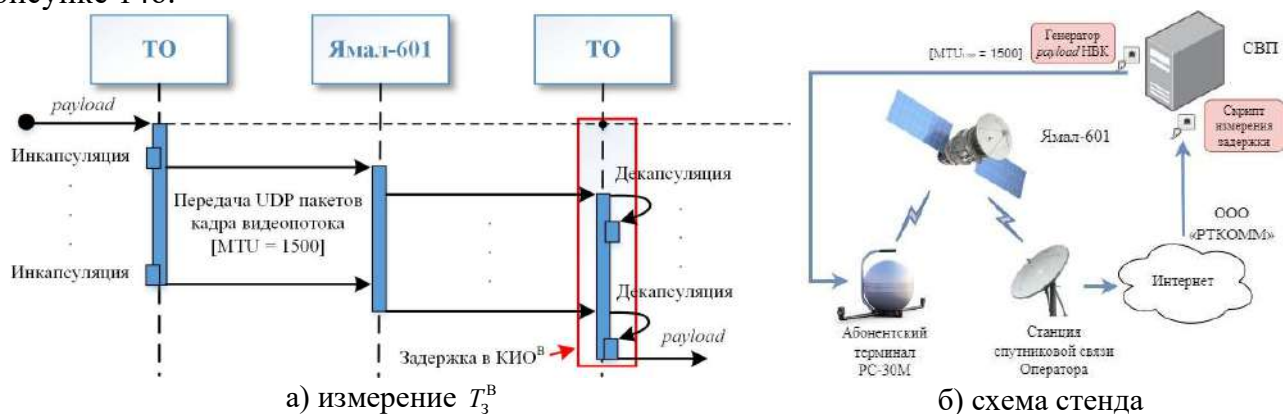


Рисунок 14 – Измерение односторонних задержек T_3^B в спутниковом канале ОГ «Ямал-601» при использовании НВК

Анализ результатов на рисунке 15 показывает, что потенциал снижения T_3^B в ГСО ОГ «Ямал-601» при использовании НВК_{DMCI} составляет порядка 55% до в среднем 350 мс при достаточной скорости передачи FPV-видео не более 132 Кбит/с (около 500 байт/кадр), что в случае UDP соответствует режиму обработки «малой датаграммы», составляющей около 576 байт IPv4 (RFC 791). Кроме того, стандартные видеокодеки находятся в зоне высокой задержки передачи FPV-видео через ГСО в то время, как конфигурация НВК_{DMCI} открывает потенциал передачи FPV-видео в зоне низкой задержки, а также для низкоскоростных каналов связи (LoRa, KB).

Следует отметить, что в отличие от стандартных видеокодеков минимальная необходимая скорость в канале связи для работы НВК может составлять 5 Кбит/с и в среднем снижается на 60% от минимальных значений стандартных видеокодеков, что закладывает значительный потенциал его использования в низкоскоростных каналах связи, но с ухудшением перцептивного качества передаваемого видеокadra. Такое изменение качества связано с тем, что ошибка в абстрактных признаках распределяется

и сглаживается нейросетью, что формирует плавную деградацию изображения (рис. 16а-в), а не рассыпание на «квадраты» как в случае с ошибками в векторах движения стандартных видеокодеков (рис. 16г-е).

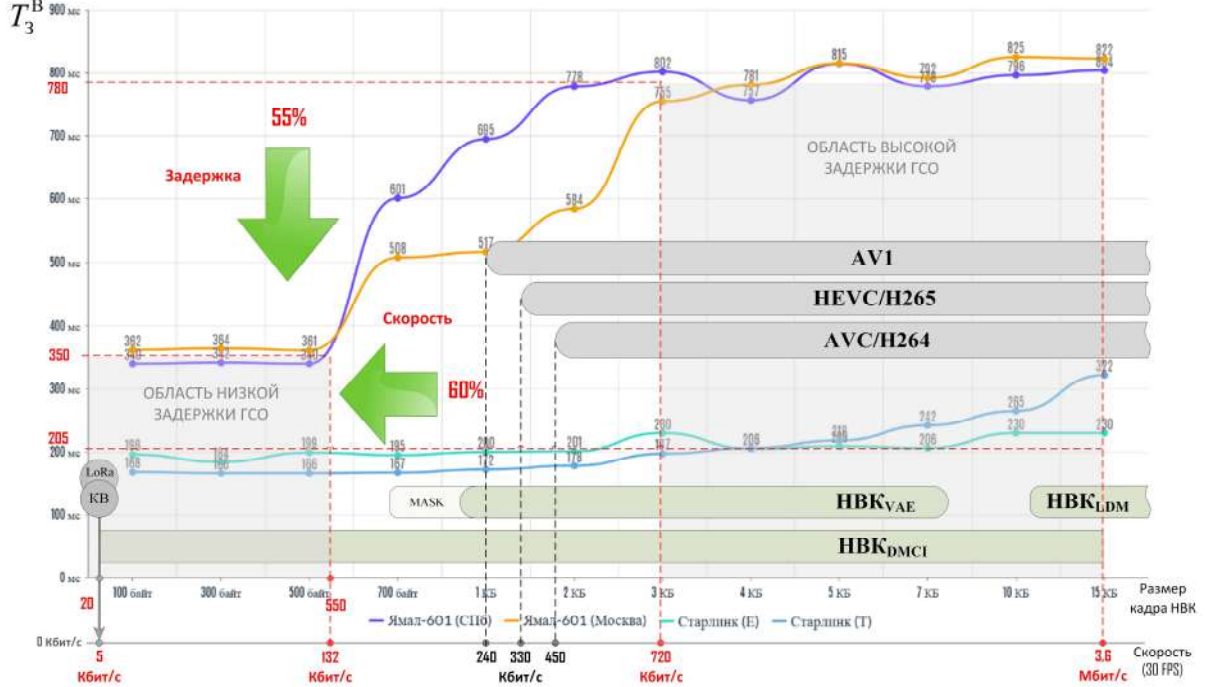


Рисунок 15 – T_3^B и скорость передачи FPV-видеопотока для ОГ «Ямал-601» и ОГ «Старлинка»



а) 5 Кбит/с, HBKDMCI



б) 132 Кбит/с, HBKDMCI



в) 3,6 Мбит/с, HBKDMCI



г) 450 Кбит/с, AVC/H264



д) 330 Кбит/с, HEVC/H265



е) 240 Кбит/с, AV1

Рисунок 16 – Примеры кадров FPV-видеопотока при использовании различных видеокодеков

Глава 4 посвящена разработке метода предсказания кадров видеопотока, реализуемого в адаптивном режиме работы уменьшения задержки КИВ. Как известно, время рассинхронизации T_r определяется задержкой передачи видеопотока T_3^B и задержкой передачи КВО T_3^K в КИО и определяется в соответствии с выражением:

$$T_p = T_{\text{код}}^B + T_{\text{декод}}^B + T_{\text{код}}^K + T_{\text{декод}}^K + 2(T_s + T_r + T_q + T_{\text{prop}}), \quad (16)$$

где T_s – задержка сериализации, T_r – задержка коммутации и маршрутизации, T_q – задержка в очередях, T_{prop} – задержка распространения.

Для спутникового канала связи справедливо неравенство:

$$T_{prop} \gg T_s + T_r + T_q, \quad (17)$$

Поэтому (16) можно представить в виде:

$$T_p = T_{код}^B + T_{декод}^B + T_{код}^K + T_{декод}^K + 2 \times T_{prop}. \quad (18)$$

Снижение времени рассинхронизации T_p (18) достигается посредством так называемого, «псевдоуменьшения» задержки распространения цифрового видеопотока. Данный подход основывается на принципе, когда каждый видеокادر, подлежащий воспроизведению на стороне терминала оператора, предварительно генерируется или прогнозируется на основе апостериорных данных с применением детерминированной прогностической модели глубокого обучения за $T_{пред}$ миллисекунд. В качестве такой модели обосновано использование нейросетевой модели многомасштабного воксельного потока DMVFN (A Dynamic Multi-Scale Voxel Flow Network).

Синхронизация процесса прогнозирования определяется таким образом, чтобы в момент инициирования предсказания указанный видеокادر должен был поступить на систему воспроизведения спустя ΔT миллисекунд по истечении времени начала операции предсказания. Таким образом, синтезированный кадр становится доступным для отображения на момент его физического поступления в систему, уменьшая субъективное восприятие задержки оператором и обеспечивая, таким образом, квазисинхронное управление БПЛА. Доказаны четыре теоремы.

Теорема 1. Условие эффективности сокращения задержки.

Уменьшение сетевой задержки за счет предсказания будущих кадров эффективно тогда, когда

$$T_{пред} < \Delta T + T_{prop} + T_{код} + T_{декод}. \quad (19)$$

Если выполняется Теорема 1, то задержка FPV-видеопотока при прогнозировании равна

$$\hat{T}_3^B = T_{пред} - \Delta T. \quad (20)$$

Применение процедур предсказания (экстраполяции) видеокладов приводит к компенсации сетевой составляющей T_3^B в КИО. Вследствие этого наблюдаемое уменьшение запаздывания носит не физический, а алгоритмический характер, что позволяет трактовать рассматриваемый подход как метод «псевдоуменьшения» сетевой задержки. Кроме того, при условиях $\hat{T}_3^B < 0$, $T_{пред} - \Delta T < 0$ и $T_{пред} < \Delta T$ возникает ситуация, при которой задержка видеопотока становится отрицательной, что невозможно.

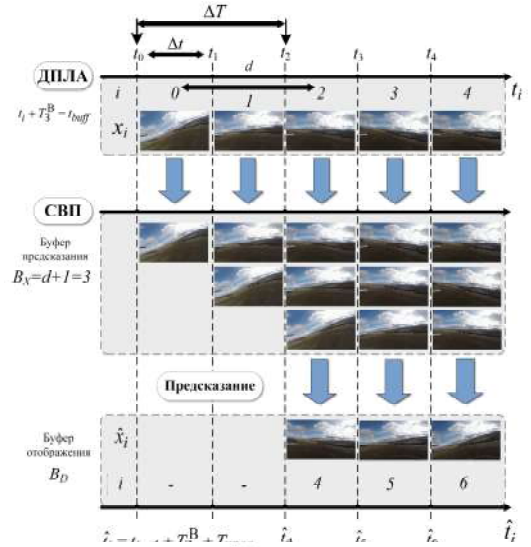


Рисунок 17 – Схема работы метода предсказания кадров видеопотока

Теорема 2. Условие упреждающего пилотирования.

Уменьшение сетевой задержки за счет предсказания будущих кадров приводит к упреждающему FPV взаимодействию тогда, когда

$$T_{\text{пред}} < \Delta T - T_3^K. \quad (21)$$

Для выполнения условий теорем 1 и 2 требуется минимизация величины $T_{\text{пред}}$. Достижение данного условия реализуется посредством предсказания одного будущего кадра видеопотока, который должен поступить через ΔT мс, на основе анализа двух последних поступивших кадров.

Каждый поступающий кадр помещается в буфер предсказания длиной B_X (рис. 17), размер которого определяется параметрами ΔT и Δt . Если требуется сформировать прогноз кадра, отображающего полётную обстановку в момент $t_i + \Delta T$, то для вычислений необходимо использовать два опорных кадра, соответствующих состояниям системы во временные моменты t_i и $t_i - \Delta T$. При допущении, что динамика видеопотока в пределах временного диапазона ΔT остается квазистационарной, изменения полётной обстановки на интервале $[t_i - \Delta T; t_i]$ могут быть аппроксимированы изменениями на интервале $[t_i; t_i + \Delta T]$. В этом случае сохраняется согласованность временного интервала предсказания и обеспечивается стабильность параметров модели прогнозирования.

Теорема 3. Формализация индексации.

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = d \in \mathbb{N}, \quad (22)$$

где $\mathbb{N}$ – множество натуральных чисел.

Теорема 4. Граничные условия.

Метод предсказания будущих кадров видеопотока является применимым при выполнении условий:

$$T_{\text{декод}}^B + T_{\text{пред}} \leq \Delta t, \quad T_{\text{код}} \leq \Delta t. \quad (23)$$

Полученные результаты по оценке перцептивного качества предсказанных видеок кадров показали (табл. 4), что увеличение временного интервала ΔT приводит к снижению точности предсказаний.

Анализ взаимосвязи между динамикой видеопотока и качеством предсказаний показал, что между средними значениями метрик качества ($\text{SSIM}_{\text{ср}}$, $\text{DISTS}_{\text{ср}}$) и величиной ΔT существует устойчивая зависимость. При увеличении числа предсказываемых кадров наблюдается тенденция к асимптотическому выравниванию метрик по всему FPV-видеопотоку, что отражает достижение моделью предельных возможностей предсказания (рис. 18).

Таблица 4
Изменение метрик качества в зависимости от ΔT

d	ΔT , мс	$\text{SSIM}_{\text{ср}}$	σ_{SSIM}	$\text{DISTS}_{\text{ср}}$	σ_{DISTS}
1	40	0,61	0,17	0,0967	0,06
2	80	0,49	0,14	0,1400	0,06
3	120	0,43	0,11	0,1639	0,06
4	160	0,41	0,09	0,1819	0,05
5	200	0,40	0,08	0,1937	0,05

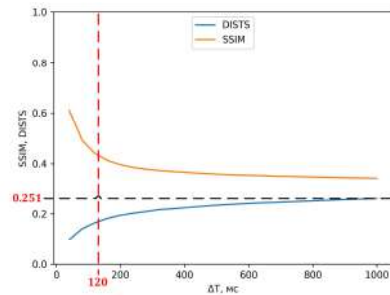


Рис. 18 – Изменение $\text{DISTS}_{\text{ср}}$ и $\text{SSIM}_{\text{ср}}$

Зафиксированные предельные значения составляют $SSIM \approx 0,34$, $DISTS \approx 0,251$. Таким образом, установлено, что при росте временного горизонта качество синтезированных кадров ухудшается, приближаясь к статистически устойчивым значениям, определяющим нижнюю границу точности используемого метода.

Корреляционный анализ изменений указанных метрик показал наличие умеренной связи между динамикой FPV и качеством предсказаний. Вычисленные коэффициенты корреляции Пирсона составили 0,60 для SSIM и 0,74 для DISTS. Полученные значения подтверждают существование статистически значимой зависимости между изменчивостью видеоряда и точностью предсказаний модели. Выявленные закономерности подтверждают, что нейросетевая модель DMVFN обеспечивает высокое качество прогнозирования на коротких временных отрезках и сохраняет приемлемую устойчивость при умеренной динамике FPV. Эксперименты по предсказанию кадров, относящихся к различным моментам времени будущего (табл. 4), показали, что в условиях высокодинамичного FPV-видеопотока с помощью нейросетевой модели DMVFN возможно уменьшение его задержки на 40 мс, а в относительно статические моменты времени – на 80-120 мс. В этой связи, разработанный метод позволяет сократить задержки передачи цифрового FPV-видеопотока, сжатого НВК, на 18-40% через спутниковые сети на НОО и на 5-30% через спутниковые сети на ГСО (рис. 15). Достигнутый уровень производительности (6,89 мс/кадр) обеспечивает практическую реализуемость в реальном времени на стандартных GPU.

Глава 5 посвящена разработке метода сжатия команд взаимодействия оператора (команд движения) протоколов Mavlink и CRSF. В главе предложена архитектура нейросетевого кодера КВО (НККВО) (рис. 19) (где *ес* – избыточные символы помехоустойчивого кода) и нейросетевой модели (рис. 20). Проведена серия экспериментов, направленных на определение зависимостей коэффициента сжатия CR и средней длины избыточных символов помехоустойчивого кода Рида-Соломона $ecclen$ для различных значений параметра K_{rate} , определяющий внутреннюю структуру нейросетевого блока через размер ядра свертки слоев максимального пуллинга ($k1$ и $k2$). Соответственно, входными параметрами модели являются параметр сжатия K_{rate} и длина КВО C_{len} . Таблица 5 устанавливает соответствие между K_{rate} и параметрами слоя максимального пуллинга $k1$ и $k2$.

В случае использования протокола CRSF с $C_{len}=64$ используются укороченные коды Рида-Соломона над полем Галуа $GF(2^8)$ в предположении наличия пачек ошибок при восстановлении ЛПП:

$$(N-i, K-i), i = 2k-1, \text{ где } k \in \mathbb{Z} \cap [1, t]. \quad (24)$$

Рассматриваемая совокупность укороченных кодов Рида-Соломона $(N-t, K-ecclen)$ может исправлять до $t=95$ ошибок. При этом $ecclen$ принимает чётные значения на интервале $[2; N-K]$. Для протокола MavLink используется полный код Рида-Соломона с параметром $K=[60; 254]$, где $ecclen$ изменяется в диапазоне $[2; 190]$. Результаты экспериментов показали, что дальнейшее увеличение $ecclen$ нецелесообразно ввиду уменьшения CR менее -200% (рис. 226).

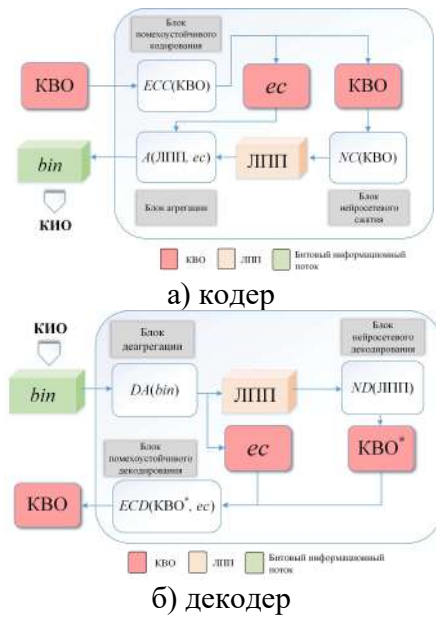


Рисунок 19 – Архитектура НККВО

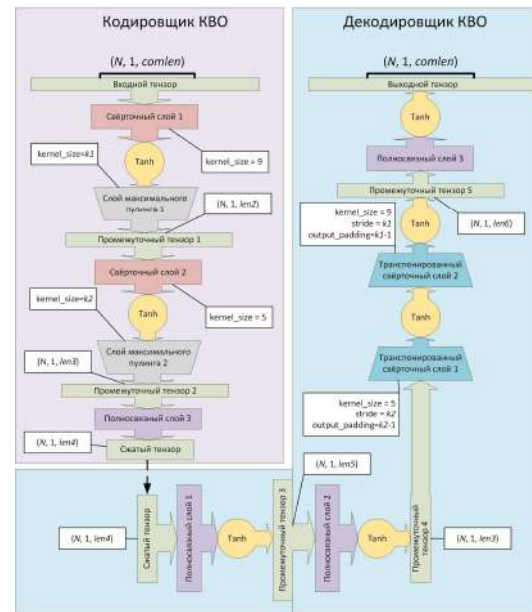


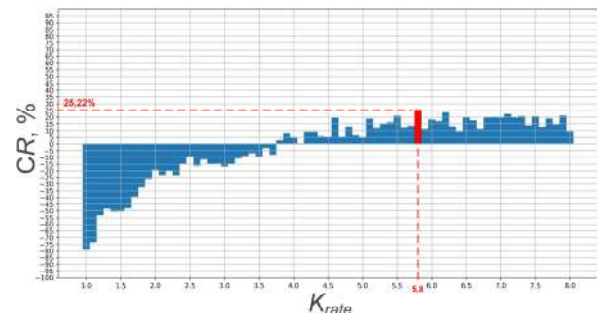
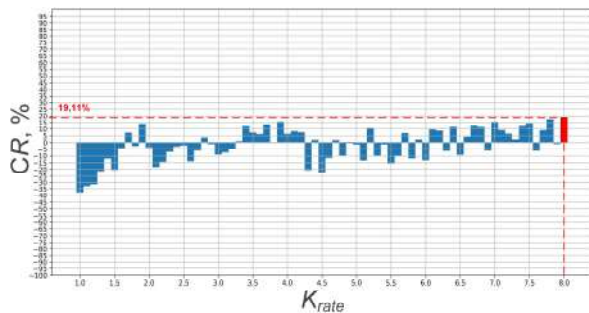
Рисунок 20 – Нейросетевые блоки NC и ND

Таблица 5

Соответствие K_{rate} и $k1, k2$

K_{rate}	[1; 2)	[2; 4)	[4; 8)	8
$k1$	1	2	2	2
$k2$	1	1	2	4

Результаты анализа (рис. 21) показывают, что для протокола CRSF наилучшее значение коэффициента сжатия достигается при $K_{rate}=8,0$, где наблюдается $CR \sim 19,11\%$ при среднем числе избыточных символов $ecclen=45,77$. Для протокола MavLink максимальная эффективность метода обеспечивается при $K_{rate}=5,8$ и $CR \sim 25,22\%$, тогда как среднее значение $ecclen=352,85$ (в расчёте по всем кодовым словам КВО).



а) протокол CRSF

б) протокол MavLink

Рисунок 21 – График зависимости CR от K_{rate} для блоков NC и ND

Данные, представленные на рисунке 22, демонстрируют зависимость уровня ошибочного восстановления (потерь) КВО LR от количества избыточных символов $ecclen$ (в расчёте на одно кодовое слово). При этом красными маркерами обозначены значения коэффициента сжатия CR (правая ось ординат), а синими – значения потерь LR (левая ось ординат). Диаграммы построены для тех значений параметра K_{rate} , при

которых были обеспечены лучшие результаты сжатия: $K_{rate}=8$ для CRSF и $K_{rate}=5,6$ для MavLink.

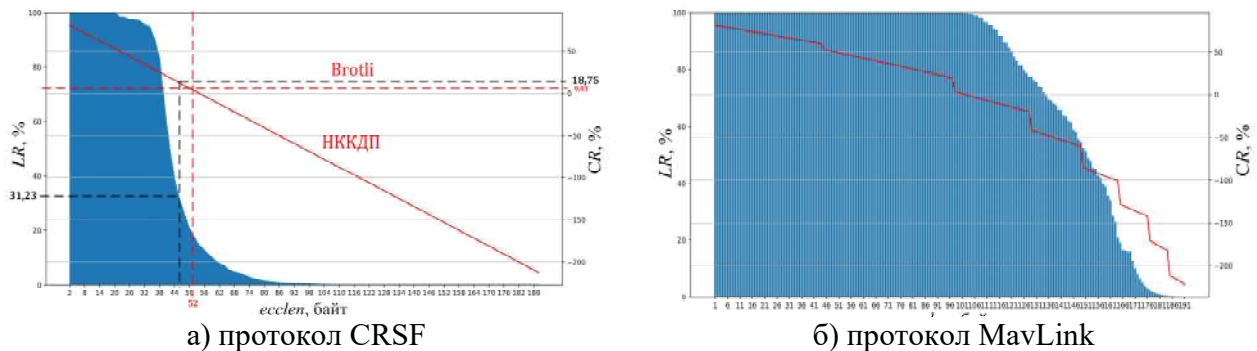


Рисунок 22 – График зависимости LR и CR от $ecclen$

Анализ диаграммы на рисунке 22а показывает, что для протокола CRSF при $K_{rate}=8$ сжатие КДП возможно при $ecclen < 58$. Так, при $ecclen=46$ наблюдались потери КДП $LR=31,23\%$ при коэффициенте сжатия $CR=18,75\%$; при увеличении длины избыточных символов до $ecclen=50$ потери уменьшаются до $LR=20,61\%$, а CR снижается до $12,50\%$; при $ecclen=56$ достигаются значения $LR=12,72\%$ и $CR=3,12\%$. Следует подчеркнуть, что минимальные потери $LR < 1\%$ возможны лишь при $ecclen=86$, однако при этом коэффициент сжатия становится отрицательным $CR=-3,75\%$, что указывает на полное отсутствие эффекта сжатия.

В свою очередь, анализ зависимости для протокола MavLink (рис. 22б) показывает, что при $K_{rate}=5,8$ сопоставимый уровень потерь $LR=33,41\%$ достигается при $ecclen=161$ байт (на одно кодовое слово) и числе кодовых слов на одну КВО равных 7. В данном случае коэффициент сжатия имеет отрицательное значение $CR=-97,46\%$, что свидетельствует об отсутствии возможности реализации эффективного сжатия данных. Таким образом, применение исследуемого метода к протоколу MavLink нецелесообразно ввиду значительного увеличения избыточности и низкой целостности восстановленных данных.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что применение НККВО для протокола CRSF может быть оправдано при небольших значениях $ecclen$, обеспечивающих компромисс между степенью сжатия и потерями данных. Для протокола MavLink данный подход проявляет низкую устойчивость и эффективность, что требует дополнительной оптимизации архитектуры кодека и внедрения адаптивных методов помехоустойчивого кодирования.

Для оценки практической применимости предложенного метода выполнен анализ временных характеристик передачи данных, связанных с использованием протокола CRSF. Как известно, в требованиях стандарта 3GPP TS 22.829 установлена максимальная допустимая задержка передачи КВО при загоризонтном управлении в 360 мс. В соответствии с результатами экспериментов по передаче полезной нагрузки схожего с длиной команды CRSF размера через сеть мобильной связи на самом протяженном участке между Санкт-Петербургом и Южно-Сахалинском, средняя задержка составила 93 мс. Как было показано ранее, распределение задержек соответствовало усечённому бета-распределению, адаптированному под заданные минимальные и максимальные значения.

Как показано в главе 2, на расстоянии 6600 км при размере полезной нагрузки 100 байт параметры распределения: $\alpha = 6,56$, $\beta = 2,12$, $B(\alpha, \beta) \approx 0,01657$. Максимальная и минимальная задержки, соответственно, равны 78,18 и 203,5 мс. Пороговое значение задержки $p(lat)$, ниже которого укладываются 99% всех наблюдений, оценивается как:

$$0,99 = \int_0^{plat} p(lat) dlat = \int_0^{plat} \frac{(lat - 78,18)^{\alpha-1} \times (203,50 - lat)^{\beta-1}}{(125,32)^{\alpha+\beta-1} \times B(\alpha, \beta)} dlat. \quad (25)$$

Задержка (25) приблизительно оценивается как 200,43 мс (рис. 23), что не превышает нормативных ограничений, установленных стандартом 3GPP даже в условиях максимальной протяжённости КИО.

Проведено сравнение разработанного метода сжатия КВО с существующими алгоритмами сжатия данных без потерь (DEFLATED, LZMA, GZip, BZip2, ZSTD, Brotli, LZ4, LZ4F, LZ4H5, LZW, LZF, LZFSE и AEC). Результаты показали, что значительная часть классических алгоритмов без потерь не способна обеспечить положительную величину сжатия КВО для протоколов FPV кроме алгоритмов Brotli ($CR=9,03\%$) и AEC ($CR=4,54\%$). Остальные методы приводят к снижению CR , что выражается в его отрицательных значениях (рис. 24).

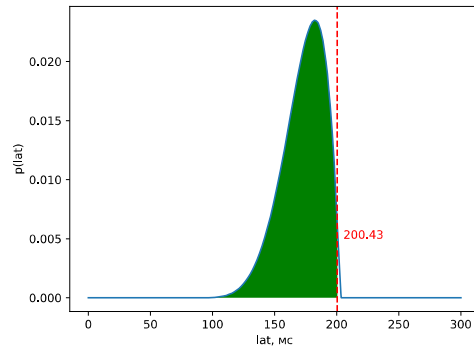


Рисунок 23 – Оценка значения $p(lat)$

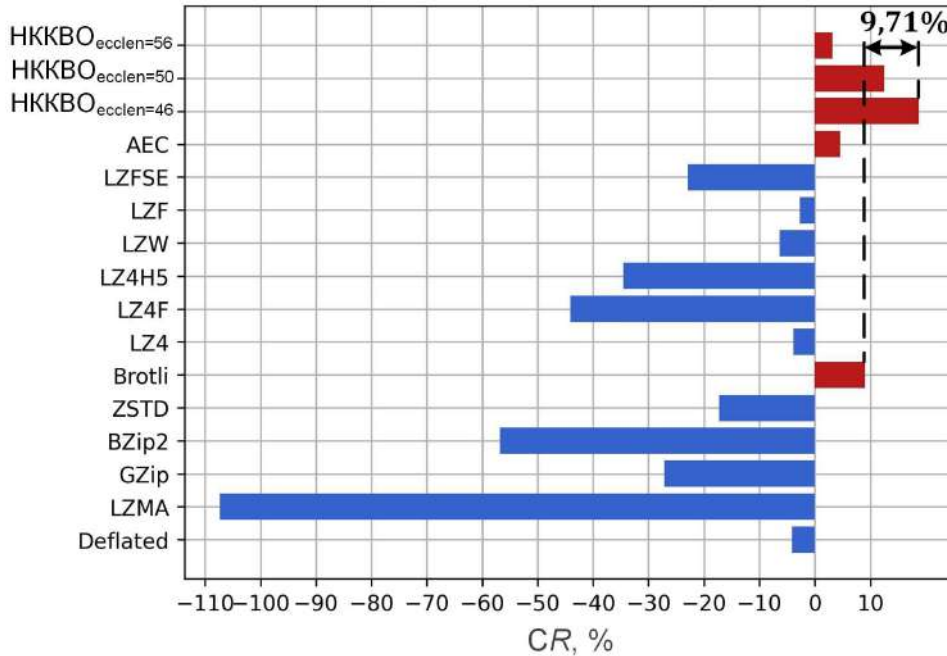


Рисунок 24 – Алгоритмы сжатия КВО

При этом следует учитывать предельный размер кадра протокола CRSF, который составляет 64 байта, что задаёт жёсткие ограничения на объём полезной нагрузки и, как следствие, на потенциальную эффективность универсальных алгоритмов сжатия на

коротких блоках. Полученные зависимости представлены на рисунке 22а. Данные демонстрируют, что рассматриваемый метод сжатия КВО с потерями способен обеспечивать значения CR , превышающие 9,03% (уровень, достижимый Brotli при сжатии без потерь), однако это достигается за счёт роста LR до 31,23%.

Разработанный кодек НККВО обеспечивает степень сжатия, превосходящую результаты АЕС и Brotli: рост достигает около 14,21% по сравнению с АЕС и около 9,71% по сравнению с Brotli. Однако основной недостаток НККВО состоит в введении дополнительных потерь LR . В связи с этим его применение целесообразно в условиях дистанционного пилотирования через сети связи с крайне низкой пропускной способностью, когда достижимый уровень сжатия Brotli в пределах 9% оказывается недостаточным. К таким сетям относятся некоторые спутниковые системы и космический сегмент фрагмента ГОНСС. При этом устойчивость FPV может снижаться в зависимости от параметров НККВО, которые определяют степень сжатия и связанные с этим потери (табл. 6).

Таблица 6

Сравнение CR и LR

Метод	CR , %	LR , %	Примечание
Brotli (без потерь)	9,03	0,00	Базовый ориентир среди методов сжатия без потерь
АЕС (без потерь)	4,54	0,00	Положительное, но меньшее сжатие
НККВО _{ecclen=46}	18,75	31,23	Максимальный CR в эксперименте; наибольшие потери
НККВО _{ecclen=50}	12,50	20,61	Компромиссный режим: CR выше Brotli, LR ниже, чем при $ecclen=46$
НККВО _{ecclen=56}	3,12	12,72	CR ниже Brotli; потери остаются ненулевыми

Анализ экспериментальных точек показывает наличие порогового эффекта: при уменьшении числа избыточных символов кода Рида-Соломона меньше 52 наблюдается резкое возрастание потерь КВО (рис. 22а), что указывает на ухудшение качества информационного потока КВО при чрезмерном уменьшении кодовой избыточности. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что кодек в ряде конфигураций обеспечивает более высокую степень сжатия по сравнению с известными алгоритмами, однако ключевым ограничением данного подхода является неизбежное внесение потерь (ошибок восстановления) КВО, величина которых определяется выбором длины избыточных символов и системы помехоустойчивого кодирования.

Глава 6 посвящена разработке методики оценки эффективности функционирования системы информационного обмена для FPV взаимодействия в ГОНСС (разделы 6.1-6.2), а также результатам экспериментальной проверки разработанных в предыдущих главах методов (раздел 6.3). Предлагается перейти к оценке систем FPV преимущественно на прикладном уровне через оценку вероятности удовлетворения требований к ПЭФ в различных условиях функционирования КИО сегментов фрагмента ГОНСС. Предлагаемый подход предусматривает совместный учёт задержки и перцептивного качества восстановленного видеопотока, а также задержки передачи и исполнения КВО, что позволяет сформировать более полную картину влияния параметров КИО на результат достижения цели в условиях функционирования беспилотной системы в среде гибридной сети связи.

В рамках комплексного анализа формируется интегральная оценка качественных характеристик системы FPV, основанной на совместной оценке задержек, а также вероятности удовлетворения заданных требований к перцептивному качеству восстановленного FPV-видеопотока в типовых и экстремальных режимах работы в соответствии с целью, определенной выражением (2). Каждый этап комплексной методики может рассматриваться как самостоятельная подчинённая методика, реализующая отдельную часть общей процедуры оценки (рис. 25). Комплексный характер подхода проявляется в том, что на первых трёх этапах измеряются различные ПЭФ. Стенды измерений представлены на рисунках 26 и 27.

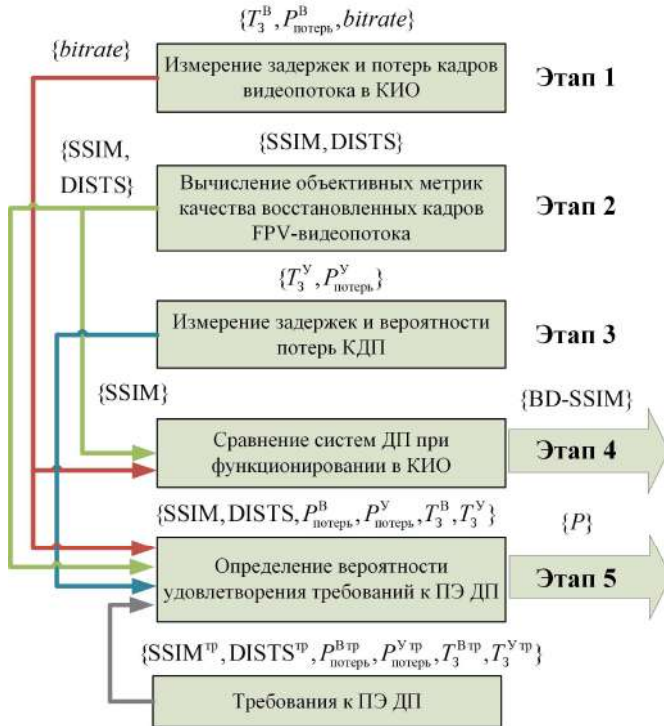


Рисунок 25 – Структурная схема методики

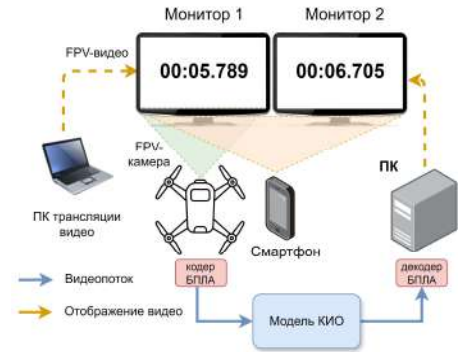


Рисунок 26 – Стенд этапы 1 и 2

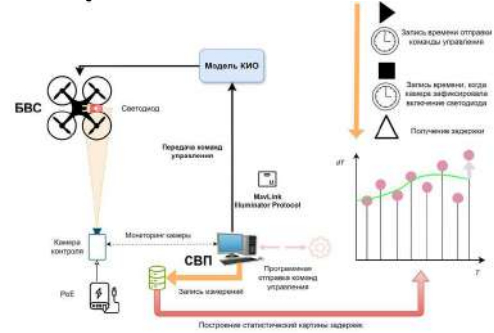


Рисунок 27 – Стенд этап 3

На заключительных четвёртом и пятом этапах указанные ПЭФ используются для сравнения систем FPV и получения интегрального показателя – вероятности удовлетворения требований к ПЭ дистанционного пилотирования P .

Процедура сравнительного анализа может быть реализована либо на четвёртом этапе по соотношению качества FPV-видеопотока к показателям пропускной способности КИО в соответствии с метрикой Бьентегора (Bjontegaard Delta) BD-SSIM:

$$BD-SSIM = \frac{A_D}{(R_{max} - R_{min})} \text{ (дБ)},$$

$$A_D = \int_{R_{min}}^{R_{max}} \Delta D(R) dR = \int_{R_{min}}^{R_{max}} D_A(R) - D_B(R) dR, \quad (26)$$

где A и B – сравниваемые системы FPV-управления, R_{min} – минимальный битрейт (Кбит/с), R_{max} – максимальный битрейт (Кбит/с), $\Delta D(R)$ – функция SSIM в зависимости от битрейта, $D_A(R)$ – функция SSIM для системы A в зависимости от битрейта, $D_B(R)$ –

функция SSIM для системы B в зависимости от битрейта, R – *bitrate* (Кбит/с), либо на пятом этапе с применением критерия вероятности удовлетворения требований к показателям эффективности, которая вычисляется на основе восстановленных плотностей вероятностей ПЭФ методом Парзена-Розенблатта (5) с последующим их интегрированием (6).

Вычисление параметра A_D (26) (рис. 28) может производиться при помощи методов численного программирования, таких как: формула трапеций, формула Симпсона с переменным шагом, правило 3/8, формула Милна (Боде) или формула Уэддла (для сравнения двух приблизительно равных по соотношению качества и необходимого *bitrate* систем).

Ключевым недостатком существующих подходов к формированию требований к перцептивному качеству видео, необходимых для пятого этапа методики, является их преимущественно экспертный характер. Для устранения этого недостатка разработан формализованный, многоэтапный подход, сущность которого заключается в анализе эмпирических данных, полученных в ходе контролируемых экспериментов, и последующем вычислении требуемых значений показателей перцептивного качества ($DISTS^{TP}$, $SSIM^{TP}$) на основе статистической обработки видеопотоков, способных обеспечить успешное выполнение достижение цели функционирования (ЦФ) БС. Структурно-логическая схема предлагаемого подхода представлена на рисунке 29.

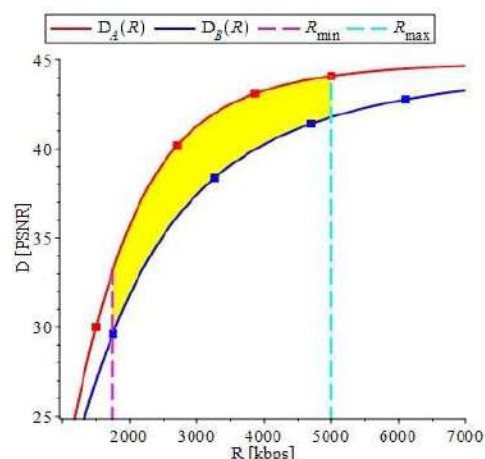


Рисунок 28 – Нахождение промежуточного параметра A_D



Рисунок 29 – Структурно-логическая схема подхода к обоснованию требований к перцептивному качеству восстановленного цифрового FPV-видеопотока

На этапе обоснования исходных данных для расчета требуемых значений показателей качества восстановленного FPV-видеопотока определяется ЦФ БС, например, как прохождение БС динамического маршрута между разными точками пространства за установленное время. Задачей *первого этапа* является определение приемлемой вероятности недостижения ЦФ БС, выбранной ранее, и сопутствующего

при этом ущерба. Для определения показателей риска недостижения ЦФ БС предлагается использовать метод, основанный на вероятностной оценке показателей риска PRA (Probabilistic Risk Assessment).

Вторым этапом является планирование эксперимента. Для натурной части эксперимента предлагается разработать динамический маршрут прохождения БС с воздействием неблагоприятных факторов (препятствия, изменение освещения и т.п.). Успешным достижением ЦФ БС в этом случае будет безаварийное прохождение маршрута в течение заданного времени. Для определения числа опытов N использован вероятностный метод, включающий ряд шагов: оценка факторов, влияющих на объем выборки; подбор метода расчета размера выборки; расчет размера выборки; оценка стандартного отклонения от среднего значения в выборочной совокупности; расчет предельной ошибки выборки; оценка среднего значения признака в генеральной совокупности. На *третьем этапе* определяется начальный уровень искажения FPV-видеопотока, позволяющий смоделировать возможное воздействие нежелательных факторов при прохождении видеопотока по КИО. Для этого предлагается использовать специализированное программное обеспечение (например, NetDisturb). Результатом проведения натурного эксперимента на *четвертом этапе* является фактическая вероятность недостижения ЦФ БС

$$P = \frac{N^{\text{нп}}}{N}, \quad (27)$$

где $N^{\text{нп}}$ – количество опытов, в которых не была достигнута цель функционирования БС, а также множество значений показателей качества всех кадров FPV-видеопотока в каждом опыте $\{\pi^l\}_L^n$, $n = \overline{1, N}$, где π^l – значение показателя качества (DISTS, SSIM) l -го кадра видеопотока; L – общее количество видеок кадров.

В случае если не выполняются условия ($P == P_{\text{пр}}$, $P < P_{\text{пр}}$), то реализуется *пятый этап*, в противном случае необходимо либо уточнение характеристик эксперимента, либо в случае удовлетворения условия $P == P_{\text{пр}}$ осуществляется определение множества видеопотоков V , которые позволили достичь ЦФ БС (*шестой этап*). На *седьмом этапе* определяется математическое ожидание показателя качества π_v^{cp} для видеопотока в целом с помощью определения плотностей вероятностей DISTS и SSIM $f_v(\pi_v)$ на основе метода ядерной оценки Парзена-Розенблатта:

$$\pi_v^{\text{cp}} = \int_{-\infty}^{\infty} \pi_v f_v(\pi_v) d\pi_v. \quad (28)$$

Полученные математические ожидания (28) позволяют на *восьмом этапе* определить требуемые значение каждого из показателей качества:

$$\pi^{\text{тр}} = \frac{\sum_{v=1}^V \pi_v^{\text{cp}}}{V}. \quad (29)$$

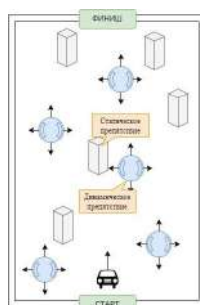
Сущность проверки требований (29) на *девятом этапе* заключается в нахождении зависимости вероятности достижения всех требований к показателям качества от вариантов облика СИО (4), и оценивании количества таких вариантов, при которых значение вероятности достижения всех требований близко к единице. Для получения зависимости (4) должна быть использована имитационная модель, упомянутая при

описании второго этапа. Если в результате анализа (4) окажется более одного решения, при котором вероятность достижения всех требований близка к единице, то это позволяет сделать вывод о слишком широком диапазоне требуемых значений показателей перцептивного качества восстановленного видеопотока и требуется их коррекция на *десятом этапе*.

В качестве апробации предложенного подхода проведена серия натурных экспериментов с использованием беспилотного транспортного средства (БНТС) (рис. 30а), целью которых являлось количественное определение значений $DISTS^{\text{TP}}$ и $SSIM^{\text{TP}}$ при заданной вероятности достижения ЦФ БС. Структурная схема экспериментального поля (рис. 30в) для проведения испытаний приведено на рисунке 30б. Проведено 6 серий экспериментов с различными параметрами процента потерь пакетов (табл. 7) по 100 заездов каждый.



а) БНТС



б) конфигурация экспериментов



в) фото зоны эксперимента

Рисунок 30 – Натурный эксперимент четвертого этапа методики

На основании полученных данных установлено, что вероятность успеха P имеет выраженную зависимость от объективных метрик перцептивного качества восстановленного видеопотока (рис. 31).

Совокупность полученных результатов подтверждает, что для обеспечения устойчивого FPV взаимодействия требуется поддержание минимальных значений $DISTS \leq 0,232$ и $SSIM \geq 0,75$. При таких параметрах обеспечивается стабильная вероятность успешного достижения ЦФ БС, превышающая $P = 0,7$.

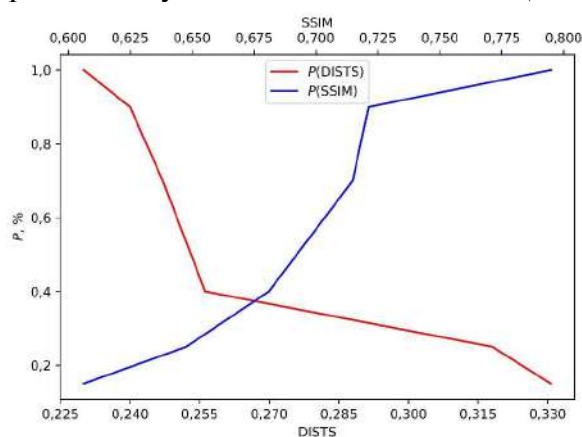
Рисунок 31 – Зависимость P от значений метрик качества видеопотока

Таблица 7

Результаты экспериментов

№ эксп.	1	2	3	4	5	6
$P_{\text{потерь}}$	0%	1%	5%	10%	15%	20%
P	1,00	0,90	0,70	0,40	0,25	0,15
DISTS	0,225	0,230	0,243	0,254	0,314	0,346
SSIM	0,80	0,73	0,72	0,69	0,64	0,61

Для определения количественных требований к $SSIM^{\text{TP}}$ и $DISTS^{\text{TP}}$ были вычислены наиболее вероятные значения этих метрик исключительно для успешных прогонов в каждой конфигурации (табл. 7).

Раздел 6.3 посвящен результатам испытаний разработанных НВК. Проведена частичная апробация разработанной методики (этап 1 и 2) на реальной геостационарной сети связи «Ямал-601» (АО «Газпром космические системы») с помощью абонентского спутникового терминала «РС-30М» (рис. 32), производства АО «РЕШЕТНЕВ», а также мобильной сети LTE/LTE adv.



Рисунок 32 – РС-30М

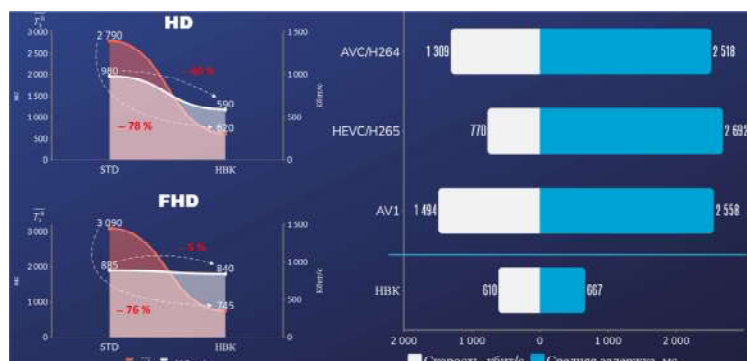


Рисунок 33– Средние значения T_3^B и $bitrate$ в спутниковой сети «Ямал-601»

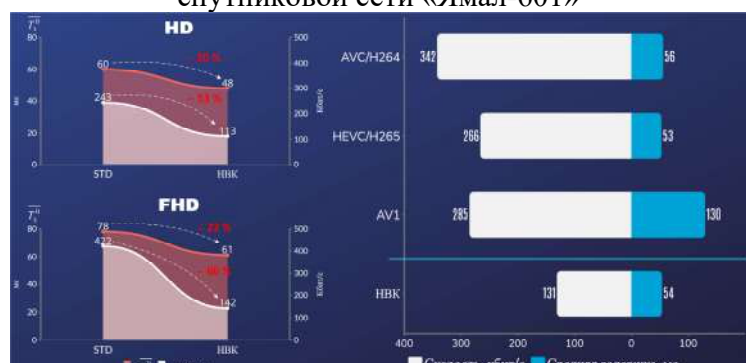


Рисунок 34– Средние значения T_3^B и $bitrate$ в сети LTE/LTE adv.

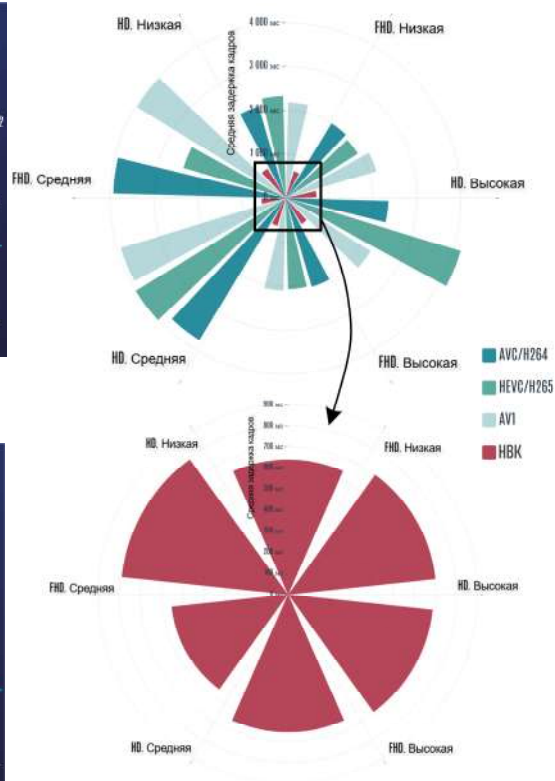


Рисунок 35 – Вариабельность T_3^B при использовании НВК

Установлено, что разработанные НВК позволяют уменьшить задержку передачи цифрового FPV-видеопотока HD качества в спутниковой геостационарной сети связи в среднем на 78% с экономией пропускной способности на 40% по сравнению со стандартными видеокодеками (рис. 33). Также наблюдается меньшая вариабельность T_3^B (рис. 35). Для наземного сегмента фрагмента гибридной сети связи (сотовая сеть связи LTE/LTE adv), такая задержка уменьшается в среднем на 20% при экономии пропускной способности на 53% (рис. 34).

В результате проведенных испытаний совместно с «16 ЦНИИ» МО РФ подтверждена возможность передачи FPV-видеопотока по низкоскоростному спутниковому каналу связи КА «Благовест» с использованием спутникового терминала «Р-444-ПТН» (рис. 36), где минимальная необходимая полоса пропускания составила 35 Кбит/с. Также специалистами «16 ЦНИИ» МО РФ установлено, что разработанный видеокодек НВК обладает высокой степенью сжатия видеоинформации: в сравнении с видеокодеком H.264 практический выигрыш составил 144% (119% в сравнении с H.265) при 10% потерь пакетов и задержке 6 мс, 103% (67% в сравнении с H.265) при 2% потерь пакетов и задержке 6 мс и 491% (309% в сравнении с H.265) при отсутствии ограничения качества канала, что подтверждено соответствующими протоколами испытаний.



Рисунок 36 – Спутниковые терминалы «Р-444-ПТН»



Рисунок 37 – Комплект радиостанции «Радиян-КВ»

Испытания НВК на участке КВ-радиолинии (650 км), организованной между Военной академией связи (г. Санкт-Петербург, п. Песочный) и ФГБУ «16 ЦНИИ» МО РФ (Московская область, г. Мытищи) с использованием радиостанции «Радиян-КВ» (рис. 37), работающей в режиме: АУС, 7500/3750 скачков в секунду, максимальная канальная скорость 8 Кбит/с, – подтвердили возможность передачи FPV-видеопотока в радиоканале КВ диапазона с пропускной способностью 2,8-6,2 Кбит/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научная проблема, направленная на разрешение противоречия, заключающегося с одной стороны в необходимости уменьшения задержки информационных потоков в каналах информационного обмена с учетом требований к перцептивному качеству восстановленного FPV-видеопотока при взаимодействии оператора с беспилотной системой в гибридных орбитально-наземных сетях связи, а с другой в несовершенстве научно-методического аппарата обоснования облика такой системы информационного обмена, решена. Цель исследования, заключающаяся в уменьшении задержки информационных потоков при взаимодействии оператора с беспилотной системой от первого лица на фрагменте гибридной орбитально-наземной сети связи, достигнута.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, состоят в следующем:

1. Предложен метод обоснования архитектуры системы информационного обмена для взаимодействия оператора с беспилотными системами на фрагменте гибридной орбитально-наземной сети связи, включая протокол прикладного уровня FPV-STVP и механизмы адаптивного управления информационным FPV-видеопотоком и режимами нейросетевых кодеков в зависимости от характеристик канала информационного обмена, ориентированный на минимизацию задержки на уровне приложения при обеспечении требуемого перцептивного качества восстановленного FPV-видеопотока. Выделены и формализованы ключевые показатели эффективности (задержки FPV-видео и КВО,

перцептивное качество восстановленного видеопотока, вероятность потерь видеокадров) и реализован замкнутый контур статистического мониторинга показателей эффективности функционирования каналов информационного обмена. Предложенный нейросетевой подход в конечном итоге позволил задействовать спутниковые сети связи на геостационарной орбите в контуре FPV-взаимодействия, снизив задержки передачи FPV-видеопотока до допустимых уровней, соизмеримых с задержками в наземном сегменте фрагмента ГОНСС.

2. Разработаны модели каналов информационного обмена беспилотных систем фрагмента ГОНСС, позволяющие установить зависимость между параметрами каналов информационного обмена и показателями эффективности их функционирования. Законы распределения параметров, характеризующих облик каналов информационного обмена, определены на основе реальных статистических данных. Экспериментально установлено, что случайная величина задержки FPV-видеокадров, сжатых нейросетевым видеокодеком, подчиняется закону усеченного двухпараметрического бета-распределения.

3. Разработан комплекс методов по уменьшению задержки передачи кадров FPV-видеопотока беспилотных систем на основе нейросетевого сжатия, позволяющий уменьшить задержку передачи цифрового FPV-видеопотока и требования к пропускной способности каналов информационного обмена фрагмента ГОНСС. Предложенные методы обеспечивают высокую степень сжатия за счет перехода от пиксельного пространства к внутреннему латентному пространству признаков нейронной сети. Получены количественно подтвержденные эффекты снижения задержки на уровне приложения и требований к пропускной способности за счет нейросетевого сжатия FPV-видеопотока и управления информационным потоком с помощью разработанного протокола FPV-CTVP. В геостационарном спутниковом сегменте (КА «Ямал-601») среднее уменьшение задержки передачи FPV-видеопотока HD качества составило 78% при экономии пропускной способности на 40% по сравнению со стандартными видеокодеками; в наземном сегменте задержка уменьшена в среднем на 20% при экономии пропускной способности в 53%. Экспериментально подтверждена возможность передачи FPV-видеопотока, сжатого разработанным нейросетевым видеокодеком, по низкоскоростным спутниковым каналам связи. Установлена минимально необходимая величина пропускной способности канала информационного обмена порядка 35 кбит/с (при сохранении силуэтно-цветовой структуры сцены), а также подтверждена работоспособность передачи по спутниковому каналу с канальной скоростью 64 кбит/с (КА «Благовест»). Кроме этого показана устойчивость разработанного метода к деградации канала при потерях пакетов 10% и выше.

4. Разработан метод уменьшения задержки передачи FPV-видеопотока беспилотных систем на основе предсказания будущих кадров нейросетевой предсказательной моделью, позволяющий уменьшить задержку передачи цифрового FPV-видеопотока с использованием нейросетевых видеокодеков в каналах информационного обмена фрагмента ГОНСС. Количественно показано уменьшение задержки распространения цифрового FPV-видеопотока в среднем на 40–120 мс, что приводит к сокращению задержек передачи FPV-видеопотока нейросетевых

видеокодеков на 18–40% в сегменте НОО и на 5–30% в сегменте ГСО при контролируемом влиянии на перцептивное качество восстановленного видеопотока.

5. Разработан метод адаптивного сжатия команд взаимодействия оператора с беспилотными системами на основе нейросетевых автокодировщиков и помехоустойчивых кодов, позволяющий уменьшить требования к пропускной способности канала информационного обмена. Экспериментально подтверждена вычислительная реализуемость разработанного метода в реальном времени и показано его превосходство по степени сжатия над алгоритмами сжатия без потерь для коротких команд протокола CRSF (Brotli – 9,71%, AEC – 14,21%). Показано, что разработанный метод обеспечивает сжатие КВО до 18,75%, но за счет ошибок восстановления в 31,23%.

6. Разработана комплексная методика оценки эффективности функционирования системы информационного обмена при взаимодействии оператора с беспилотными системами на фрагменте гибридной орбитально-наземной сети связи, позволяющая оценить вероятность попадания значений показателей эффективности каналов информационного обмена в область заданных требований, и на основе ее оценки обосновать параметры системы информационного обмена. В основе предложенной методики лежит использование в качестве обобщенного ПЭФ вероятности достижения комплекса целей функционирования беспилотной системы. Для определения вероятности достижения комплекса целей используется метод ядерной оценки Парзена-Розенблатта, адаптированный под ПЭФ взаимодействия оператора с беспилотной системой от первого лица. Методика обеспечивает сопоставимый анализ различных реализаций систем FPV в заданных параметрах КИО ГОНСС.

7. Обоснованы практические рекомендации по настройке параметров нейросетевых видеокодеков для взаимодействия оператора с беспилотной системой от первого лица в гибридных орбитально-наземных сетях связи. Показано, что для геостационарного спутникового канала существует потенциал снижения задержки передачи FPV-видеопотока до 55% при сокращении необходимой пропускной способности на 60% до 132 Кбит/с по сравнению со стандартными видеокодеками. При этом минимальная задержка составляет порядка 350 мс для передачи кадров FPV-видео, сжатого нейросетевыми видеокодеками. Рекомендовано ограничение объема данных на один видеокادر до 3 КБ как режим, устойчивый к росту флуктуаций задержки в канале информационного обмена спутникового сегмента фрагмента гибридной орбитально-наземной сети связи.

Перспективы дальнейших исследований по развитию нейросетевого сжатия видеопотока и команд взаимодействия оператора связаны, прежде всего, с переходом от решения отдельных задач кодирования к построению целостной интеллектуальной системы прикладного информационного обмена, адаптирующейся к текущему состоянию канала связи, динамике сцены и характеру взаимодействия. Такая постановка непосредственно вытекает из результатов диссертации, где показано, что данный подход закладывает основы для расширения возможностей взаимодействия, в том числе через низкоскоростные каналы связи, включая LoRa и КВ диапазоны, и через спутниковые каналы гибридной орбитально-наземной сети связи:

1. Перспективным направлением является разработка совместно обучаемых нейросетевых кодеков видео и команд взаимодействия оператора, в которых

минимизируется не только объем передаваемых данных, но и рассинхронизация между ними, а также вероятность потери функционально значимой информации для оператора.

2. Дальнейшие исследования могут быть направлены на построение многомасштабных и иерархических латентных признаков пространств видеосцены, на разработку нейросетевых механизмов адаптивного распределения битового ресурса между видеопотоком и командами взаимодействия оператора, а также на более глубокую интеграцию предсказательных моделей в контур управления. Именно такой переход от просто сжатия данных к интеллектуальному управлению полнотой, семантикой и передачей информационных потоков представляется наиболее существенным следующим этапом развития полученных в диссертации результатов.

3. Отдельным перспективным направлением является использование технологий и архитектурных принципов систем видеоконференцсвязи для работы в низкоскоростных каналах связи. В результате данное направление способно сформировать промежуточный класс решений между традиционной видеоконференцсвязью и специализированными системами, пригодный для каналов с крайне ограниченной пропускной способностью.

4. Еще одним самостоятельным и значимым направлением дальнейших исследований является организация каналов взаимодействия оператора с беспилотными системами в стратегически важном для страны арктическом регионе, где перспективным является не просто расширение зоны действия существующих каналов, а создание интеллектуальной системы взаимодействия, способной динамически перестраивать структуру передаваемой информации, менять глубину сжатия, режимы предсказания и уровень помехоустойчивости в зависимости от текущего состояния гибридной сети связи. Именно это направление представляется наиболее содержательным с научной и прикладной точек зрения, поскольку оно объединяет результаты диссертации с актуальными государственными задачами, определенными в Стратегии развития отрасли связи Российской Федерации на период до 2035 года.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в журналах из перечня ВАК

1. Березкин А.А. Требования к качеству видеопотока при управлении беспилотными системами от первого лица // Труды учебных заведений связи. – 2026. – Т. 12. – № 1. С. 7-16.

2. Березкин А.А. Перспективные технологии сжатия кадров видеопотока при управлении БАС от первого лица // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2026. – Т. 18. – № 1. С. 4-20.

3. Березкин А.А. Управление стохастическим процессом интенсивности FPV-видеопотока на основе контрольных карт Шухарта / А.А. Березкин, Р.В. Киричек // Т-Comm – Телекоммуникации и транспорт. – 2026. – № 1. (принято к публикации).

4. Березкин А.А. Методика тестирования услуги управления БПЛА от первого лица в каналах информационного обмена гибридных орбитально-наземных сетей связи. Часть II: Этапы методики / А.А. Березкин, А.А. Ченский, Р.В. Киричек // Цифровая обработка сигналов. – 2025. – № 4. – С. 26-33.

5. Березкин А.А. Сжатие и агрегация команд управления беспилотными воздушными судами в каналах связи с ограниченной пропускной способностью / А.А. Березкин, А.А. Ченский, Р.В. Киричек // Инфокоммуникационные технологии. – 2025. – Т. 23. – № 3(91). – С. 50-71.
6. Березкин А.А. Исследование методов сжатия команд управления беспилотными воздушными судами в каналах с ограниченной пропускной способностью // Технологии электромагнитной совместимости. – 2025. – № 4(95). – С. 15-24.
7. Березкин А.А. Экспериментальное исследование программно-аппаратного комплекса FPV-управления БАС в гибридных сетях связи / А.А. Березкин, А.А. Ченский, Р.В. Киричек, Е.А. Нестеров // Электросвязь. – 2025. – № 11. – С. 2-15.
8. Березкин А.А. Система информационного обмена для управления БАС от первого лица в гибридной сети связи. Часть II: модель КИО и методика тестирования // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2025. – Т. 17. – № 5. – С. 4-12.
9. Березкин А.А. Система информационного обмена для управления БАС от первого лица в гибридной сети связи. Часть I: общие положения и архитектура // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2025. – Т. 17. – № 4. – С. 4-14.
10. Березкин А.А. Метрики качества видеопотока нейросетевых видеокодеков при FPV-управлении БПЛА / А.А. Березкин, А.А. Ченский, Р.В. Киричек // Вопросы радиоэлектроники. Серия Техника телевидения. – 2025. – № 4. – С. 3-11.
11. Березкин А.А. Исследование задержки кадров видеопотока в канале информационного обмена космического сегмента гибридной сети связи при FPV-управлении БАС / А.А. Березкин, Р.В. Вивчарь, А.А. Ченский, Р.В. Киричек // Труды учебных заведений связи. – 2025. – Т. 11. – № 5. – С. 60-73.
12. Березкин А.А. Методика тестирования услуги управления БПЛА от первого лица в каналах информационного обмена гибридных орбитально-наземных сетей связи. Часть I: Обзор существующих подходов / А.А. Березкин, А.А. Ченский, Р.В. Киричек // Цифровая обработка сигналов. – 2025. – № 3. – С. 48-53.
13. Березкин А.А. Исследование границ интенсивности видеопотока при FPV-управлении БПЛА в режиме предсказания кадров. Часть II: контроль интенсивности видеопотока / А.А. Березкин, А.А. Ченский, Р.В. Киричек // Вестник СибГУТИ. – 2025. – Т. 19. – № 3. – С. 139-164.
14. Березкин А.А. Маскирование кодированного FPV видеопотока при управлении БПЛА. Часть II: Обучение моделей и эксперименты / А.А. Березкин, А.А. Ченский, Р.В. Киричек // Электросвязь. – 2025. – № 5. – С. 34-41.
15. Березкин А.А. Сокращение задержки FPV-управления БВС через спутниковые каналы связи методом предсказания / А.А. Березкин, А.А. Ченский, Р.В. Киричек // Электросвязь. – 2025. – № 4. – С. 13-24.
16. Березкин А.А. Методы интерполяции и контроля интенсивности FPV-видеопотока / А.А. Березкин, З.В. Кулунчаков, Р.В. Киричек, А.А. Ченский // Экономика и качество систем связи. – 2025. – № 2. – С. 92-107.
17. Березкин А.А. Исследование задержки кадров видеопотока в канале информационного обмена наземного сегмента гибридной сети связи при FPV-

управлении БАС / А.А. Березкин, Р.М. Вивчарь, А.А. Ченский, Р.В. Киричек // Труды учебных заведений связи. – 2025. – Т. 11. – № 1. – С. 7-17.

18. Березкин А.А. Алгоритмы квантования и деквантования кодированных кадров FPV-видеопотока при управлении беспилотными системами / А.А. Березкин, А.А. Ченский, Р.В. Киричек // Автоматизация в промышленности. – 2025. – № 1. – С. 17-21.

19. Березкин А.А. Нейросетевой метод сжатия кадров видеопотока при FPV-управлении БАС на базе вариационного автокодировщика VQ-f16. Часть II: эксперимент / А.А. Березкин, А.А. Ченский, Р.В. Киричек, А.А. Захаров // Труды Научно-исследовательского института радио. – 2024. – № 3-4. – С. 34-53.

20. Березкин А.А. Нейросетевой метод сжатия кадров видеопотока при FPV-управлении БАС на базе вариационного автокодировщика VQ-f16. Часть I: методика / А.А. Березкин, А.А. Ченский, Р.В. Киричек, А.А. Захаров // Труды Научно-исследовательского института радио. – 2024. – № 3-4. – С. 14-33.

21. Березкин А.А. Маскирование кодированного FPV видеопотока при управлении БПЛА. Часть I: Модели и методика / А.А. Березкин, А.А. Ченский, Р.В. Киричек, А.А. Захаров // Электросвязь. – 2024. – № 12-2. – С. 52-65.

22. Березкин А.А. Корреляционный анализ латентного видеопотока при управлении БАС от первого лица / А.А. Березкин, Н.А. Облаков, А.А. Ченский, Р.В. Киричек // Электросвязь. – 2024. – № 11. – С. 25-31.

23. Березкин А.А. Исследование конфигураций нейросетевых кодеков для адаптивной системы сжатия кадров FPV-видеопотока при управлении беспилотными системами. Часть II. Эксперимент / А.А. Березкин, А.А. Ченский, Р.В. Киричек, А.А. Захаров // Электросвязь. – 2024. – № 10. – С. 59-69.

24. Березкин А.А. Предсказание времени работы вариационных автокодировщиков на основе моделей временных рядов семейства ARIMA / А.А. Березкин, А.А. Ченский, Р.В. Киричек // Инфокоммуникационные технологии. – 2024. – Т. 22. – № 3(87). – С. 26-40.

25. Березкин А.А. Исследование границ интенсивности видеопотока при FPV-управлении БПЛА в режиме предсказания кадров. Часть I: модели и методы / А.А. Березкин, А.А. Ченский, Р.В. Киричек // Вестник СибГУТИ. – 2024. – Т. 18. – № 3. – С. 115-139.

26. Березкин А.А. Исследование конфигураций нейросетевых кодеков для адаптивной системы сжатия кадров FPV-видеопотока при управлении беспилотными системами. Часть I. Методика / А.А. Березкин, А.А. Ченский, Р.В. Киричек, А.А. Захаров // Электросвязь. – 2024. – № 9. – С. 28-37.

27. Березкин А.А. Подход к обоснованию требований к качеству видеопотока при FPV-управлении беспилотными системами / А.А. Березкин, Р.М. Вивчарь, Р.В. Киричек // Труды учебных заведений связи. – 2024. – Т. 10. – № 4. – С. 7-15.

28. Березкин А.А. Исследование методов квантования латентного пространства вариационного автокодировщика для кадров FPV видеопотока. Часть II / А.А. Березкин, А.А. Ченский, Р.М. Вивчарь, Р.В. Киричек // Электросвязь. – 2024. – № 7. – С. 26-35.

29. Березкин А.А. Исследование методов латентного сжатия видеопотока при FPV-управлении беспилотными системами / А.А. Березкин, А.А. Ченский, Р.В. Киричек, А.А. Захаров // Электросвязь. – 2024. – № 6. – С. 26-36.

30. Березкин А.А. Исследование методов квантования латентного пространства вариационного автокодировщика для кадров FPV видеопотока. Часть I / А.А. Березкин, А.А. Ченский, Р.В. Киричек, А.А. Захаров // *Электросвязь*. – 2024. – № 6. – С. 58-64.
 31. Березкин А.А. Нивелирование артефактов кадров видеопотока при FPV-управлении беспилотными системами / А.А. Березкин, А.А. Ченский, Р.В. Киричек // *Инфокоммуникационные технологии*. – 2024. – Т. 22. – № 1(85). – С. 7-17.
 32. Березкин А.А. Анализ нейросетевых моделей сверхвысокого разрешения в системе сжатия видеопотока БПЛА / А.А. Березкин, Фук Хао До, Р.В. Киричек, А.А. Захаров // *Электросвязь*. – 2024. – № 3. – С. 35-43.
 33. Березкин А.А. Многокритериальная оценка эффективности управления беспилотными системами в гибридных сетях связи / А.А. Березкин, Р.М. Вивчарь, Р.В. Киричек // *Труды учебных заведений связи*. – 2024. – Т. 10. – № 1. – С. 25-33.
 34. Березкин А.А. Метод декомпрессии FPV-видеопотока от беспилотных систем на основе латентной диффузионной нейросетевой модели / А.А. Березкин, Р.М. Вивчарь, Р.В. Киричек, А.А. Захаров // *Электросвязь*. – 2024. – № 1. – С. 25-36.
 35. Березкин А.А. Исследование нейросетевых моделей предсказания видеопотока при управлении беспилотными системами от первого лица / А.А. Березкин, Д.Ю. Савелов, А.В. Суходоева, И.А. Туманов, Р.В. Киричек // *Труды Научно-исследовательского института радио*. – 2023. – № 3-4. – С. 40-56.
 36. Березкин А.А. Сравнительный анализ методов сверхвысокого разрешения на основе диффузии в системе сжатия видеопотока при управлении беспилотными системами от первого лица / А.А. Березкин, Фук Хао До, Чан Дык Ле, Р.В. Киричек // *Труды Научно-исследовательского института радио*. – 2023. – № 3-4. – С. 26-39.
 37. Березкин А.А. Метод сжатия видеопотока при управлении беспилотными системами в гибридных орбитально-наземных сетях связи / А.А. Березкин, Р.М. Вивчарь, А.В. Слепнев, Р.В. Киричек, А.А. Захаров // *Электросвязь*. – 2023. – № 10. – С. 48-56.
 38. Березкин А.А. Модель системы управления мобильными роботизированными комплексами различного назначения / А.А. Березкин, Р.М. Вивчарь, Р.В. Киричек // *Электросвязь*. – 2023. – № 8. – С. 12-18.
- Научные статьи (доклады) в трудах, индексируемых Scopus и Web of Science*
39. Berezkin A. et al. Delays of Various Dynamics FPV Video Stream Transmission with Standart and Neural Video Codecs Utilization //2025 9th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). – IEEE, 2025. – С. 1-6.
 40. Chenskiy A. et al. Research of Latent Video Stream Compression Methods for FPV Control of UAVs //International Conference on Distributed Computer and Communication Networks. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. – С. 391-403.
 41. Chenskiy A. et al. VAE Latent Space Quantization Methods for UAVs Video Stream //2024 8th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). – IEEE, 2024. – С. 1-7.
 42. Berezkin A., Kukunin D., Kirichek R. Research and development of data compression methods based on neural networks //International Conference on Distributed Computer and Communication Networks. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2022. – С. 103-116.

43. Berezkin A., Kukunin D., Kirichek R. Neural network coding in data compression systems in communication channels //2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). – IEEE, 2022. – С. 1-5.

44. Berezkin A. et al. Data compression methods based on neural networks //Proceedings of the 5th International Conference on Future Networks and Distributed Systems. – 2021. – С. 511-515.

45. Berezkin A. et al. Models and methods for decoding of error-correcting codes based on a neural network //2021 13th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). – IEEE, 2021. – С. 230-235.

Монографии

46. Перспективы использования рекуррентных последовательностей в современной телекоммуникационной среде : монография / Д. С. Кукунин, О. С. Когновицкий, А. А. Березкин [и др.]. – Санкт-Петербург : СПбГУТ, – 2023. – 289 с.

Патенты на изобретения и РИД

47. Патент РФ № 2855032 С2. Система информационного обмена для управления беспилотными комплексами в орбитально-наземных гибридных сетях связи / Березкин А. А., Паршин А. А., Кукунин Д. С., Киричек Р. В. ; заявитель: СПбГУТ им.проф. М. А. Бонч-Бруевича. — № 2024110639 ; заявл. 17.04.24 ; опубл. 23.01.26, Бюл. № 3.

48. Патент РФ № 2849970 С1. Система интеллектуального кодирования кадров видеопотока при управлении беспилотными системами от первого лица / Березкин А. А., Ченский А. А., Паршин А. А., Парфенов Д. Д., Киричек Р. В. ; заявитель: СПбГУТ им.проф. М. А. Бонч-Бруевича. — № 2024133558 ; заявл. 07.11.24 ; опубл. 01.11.25, Бюл. № 31.

49. Евразийский патент №053030. Система интеллектуального кодирования кадров видеопотока при управлении беспилотными системами от первого лица / Березкин А. А., Паршин А. А., Киричек Р. В., Ченский А. А., Парфенов Д. Д., ; заявитель: СПбГУТ им.проф. М. А. Бонч-Бруевича. — № 202592190 ; заявл. 21.08.25 ; опубл. 09.04.26.

50. Евразийский патент № 052761. Система информационного обмена для управления беспилотными комплексами в орбитально-наземных гибридных сетях связи / Березкин А. А., Паршин А. А., Кукунин Д. С., Киричек Р. В. ; заявитель: СПбГУТ им.проф. М. А. Бонч-Бруевича. — № 202590946 ; заявл. 16.04.25 ; опубл. 13.03.26.

51. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682435, 25.10.2023. Модуль управления беспилотными системами от первого лица в орбитально-наземных гибридных сетях связи // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682435. – 2023 / Березкин А. А., Паршин А. А.

Подписано в печать 24.06.2026. Формат 60×84 1/16.

2,0 а.л. Тираж 100 экз.

Отпечатано в СПбГУТ, 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1