

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ
КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

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

Диссертация на соискание ученой степени

доктора технических наук

Научный консультант

доктор технических наук, профессор

заслуженный деятель науки Санкт-Петербурга

Киричек Руслан Валентинович

Санкт-Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИИ БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМ.....	29
1.1 Характеристика, регулирование беспилотных систем.....	29
1.2 Варианты управления БАС	53
1.3 Управление от первого лица и требования к нему	74
1.4 Современные технологии цифрового кодирования видеоинформации....	93
1.4.1 Задержки в каналах информационного обмена видеосистем реального времени.....	97
1.4.2 Современные кодеки сжатия видеопотока.....	101
1.4.3 Роль машинного и глубокого обучения.....	117
1.5 Гибридные сети связи как основа взаимодействия БАС с глобальным покрытием.....	123
1.5.1 Сети NTN	127
1.5.2 SAGSINs – интегрированная сеть «космос-воздух-земля-море».....	134
1.5.3 HSTNs – гибридные орбитально-наземные сети связи.....	139
1.6. Выводы по главе 1	145
ГЛАВА 2. АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА ДЛЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПЕРАТОРА С БЕСПИЛОТНЫМИ СИСТЕМАМИ В ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ	148
2.1 Задержки уровня приложения	149
2.2 Модель системы информационного обмена	154
2.2.1 Показатели эффективности СИО	154
2.2.2 Постановка задачи и описание модели СИО	160
2.2.3 Восстановление плотности вероятности показателей эффективности функционирования СИО	163

2.2.4 Постановка задачи.....	172
2.2.5 Рассинхронизация видеопотока и команд взаимодействия оператора	173
2.2.6 Модель КИО наземного сегмента ГОНСС.....	176
2.2.7 Модель КИО космического сегмента ГОНСС.....	185
2.3 Структура системы информационного обмена.....	196
2.3.1 Модуль контроля интенсивности видеопотока	199
2.3.2 Модуль анализатора каналов информационного обмена	204
2.4 Прикладной протокол управления информационными потоками FPV-STVP.....	228
2.4.1 Современные протоколы управления передачей видеопотока в сетях связи.....	228
2.4.2 Спецификация протокола FPV-STVP.....	230
2.5 Выводы по главе 2.....	232
ГЛАВА 3. МЕТОДЫ НЕЙРОСЕТЕВОГО КОДИРОВАНИЯ	
ВИДЕОИНФОРМАЦИИ	236
3.1 Архитектура нейросетевого видеокодека.....	236
3.1.1 Диффузионный нейросетевой видеокодек	237
3.1.2 Нейросетевой видеокодек на основе вариационных автокодировщиков	253
3.1.3 Маскированный видеокодек	271
3.1.4. Нейросетевой видеокодек сжатия контекста	281
3.2. Выводы по главе 3.....	290
ГЛАВА 4. СОКРАЩЕНИЕ ЗАДЕРЖКИ ПЕРЕДАЧИ FPV-ВИДЕОПОТОКА	
МЕТОДОМ ПРЕДСКАЗАНИЯ БУДУЩИХ КАДРОВ.....	293
4.1 Анализ нейросетевых моделей предсказания видео	293

4.1.1 Анализ корреляционной структуры FPV-видеопотока.....	294
4.1.2 Методы явных преобразований.....	301
4.1.3 Методы синтеза пикселей	303
4.1.4. Выбор нейросетевой модели предсказания кадров.....	308
4.2 Метод предсказания будущих кадров FPV-видеопотока	316
4.3 Выводы по главе 4.....	332
ГЛАВА 5. СЖАТИЕ И АГРЕГАЦИЯ КОМАНД ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	
ОПЕРАТОРА С БЕСПИЛОТНЫМИ СИСТЕМАМИ В КАНАЛАХ С	
ОГРАНИЧЕННОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ	
5.1 Метод сжатия и агрегации КВО	335
5.1.1 Нейросетевой кодек КВО	335
5.1.2 Архитектура нейросетевой модели для сжатия КВО.....	340
5.2 Методика экспериментов и результаты.....	344
5.3 Выводы по главе 5.....	362
ГЛАВА 6. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ	
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БАС В КАНАЛАХ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА	
И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ	
6.1 Анализ существующих подходов.....	365
6.2 Этапы методики оценки эффективности функционирования БАС.....	367
6.3 Результаты испытаний.....	398
6.3.1. Испытания в моделируемой среде в ФГБУ «16 ЦНИИИ» Минобороны России	400
6.3.2. Космический сегмент ГОНСС	403
6.3.3 Наземный сегмент ГОНСС	412
6.3.4 КВ-радиолиния.....	416

6.4 Выводы по главе 6.....	421
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	424
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	430
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	433
ПРИЛОЖЕНИЕ А СПЕЦИФИКАЦИЯ ПРОТОКОЛА FRV-STVP	475
ПРИЛОЖЕНИЕ Б ПРОТОКОЛЫ ИСПЫТАНИЙ	482
ПРИЛОЖЕНИЕ В АКТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ, ПАТЕНТЫ И СВИДЕТЕЛЬСТВА	508

ВВЕДЕНИЕ

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 (ДВ) 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.

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 то же время включение спутникового сегмента в контур информационных потоков взаимодействия оператора с беспилотной системой приводит к появлению значительных задержек передачи данных, обусловленных как физическими факторами распространения сигнала, так и сетевой обработкой и буферизацией на прикладном уровне. При этом задержка на уровне приложения формируется не только характеристиками радиодоступа, но и структурой канала информационного обмена как совокупности видеокодеков и протоколов управления передачей FPV-видеопотока. Даже для наземного сегмента ГОНСС при использовании распространенных стеков протоколов для передачи FPV-видео через пакетные сети связи (RTP/RTSP, WebRTC, SRT, RTMP) характерны задержки, которые, как правило, превышают требования при прямом взаимодействии. Так, для протокола WebRTC характерны задержки порядка 0,2–0,5 с, для SRT – порядка 0,3–0,5 с (при типовой настройке устойчивости к потерям), для RTMP (включая конфигурации с низкой задержкой) – от нескольких секунд и выше. Даже при использовании мобильных сотовых сетей связи общего пользования (LTE/LTE adv) и оптимизированных производителями стеков передачи видео заявляемые значения сквозной задержки существенно превышают целевые требования к задержке информационного потока передачи FPV-видео.

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, Elsie Halo, CUAU 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. Таким образом, существующие каналы информационного обмена на базе сетей LTE/5G не обеспечивают достижение целевых нормативных уровней задержки FPV-видеопотока, что также определяет актуальность разработки специализированных методов сокращения задержки на уровне приложения и в наземном сегменте ГОНСС.

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 видеокодеков, 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 показатели эффективности и качества FPV-видеопотока должны рассматриваться как функционально значимые параметры контура взаимодействия, а не как вторичные «мультимедийные» характеристики услуги. В отличие от задач видеомониторинга, где допустимы заметные задержки и кратковременные ухудшения качества, при FPV взаимодействии искажения и задержка формируют систематическую ошибку восприятия динамической сцены и тем самым напрямую влияют на точность маневрирования и вероятность ошибок оператора, увеличивая неопределенность принятия решения, и, как следствие, вероятность достижения целей функционирования беспилотной системы. Например, при полете на малых высотах или в ограниченных пространствах решающим становится сохранение геометрически информативных контуров и отсутствие артефактов на границах препятствий, где блочность и разрывы контуров могут маскировать тонкие элементы (провода, ветви, кромки конструкций), а «замыливание» мелких деталей снижает вероятность своевременного обнаружения препятствия. При точном маневрировании и посадке важно устойчивое восприятие перспективных линий и фактур поверхности, где деградация текстур приводит к ухудшению субъективной оценки высоты и скорости сближения. В задачах наблюдения подвижных объектов решающим становится

сохранение читаемости мелких структур (силуэт, маркеры, линии разметки) при ограниченном битрейте. При этом ухудшение визуального качества может приводить к неверной классификации ситуации и выбору неправильной траектории движения. Эти примеры показывают, что требования к качеству FPV-видео 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. В результате снижение битовой скорости передачи не всегда приводит к уменьшению задержки на уровне приложения. Кроме того, такое снижение, как правило, сопровождается существенным ухудшением качества передаваемого изображения.

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 потока КВО при сохранении требуемого уровня перцептивного качества отображения 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. Стандартные цифровые видеокодеки и их режимы передачи исторически проектировались как универсальные решения для широкого класса мультимедийных приложений, в которых требуется одновременно обеспечивать приемлемую задержку, заданную скорость передачи и максимально возможное качество изображения. Вследствие универсальности такие системы неизбежно реализуют сбалансированную оптимизацию и включают механизмы буферизации и усложненные процедуры предсказания и энтропийного

кодирования, которые в совокупности формируют внутреннюю и сетевую задержку.

Нейросетевые алгоритмы сжатия и восстановления могут использовать априорную информацию о допустимом уровне и структуре искажений, а также о характере динамики видеоряда в контуре FPV более эффективно, чем классические универсальные видеокодеки, за счет обучения на релевантных распределениях данных и оптимизации непосредственно по показателям, отражающим задачу FPV, включая минимизацию задержки при обеспечении требуемого (достаточного) перцептивного качества.

Тем самым нейросетевой подход рассматривается в работе как средство перераспределения ресурсов обработки и пропускной способности в пользу уменьшения задержки 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, оптимизации передачи трафика, моделировании каналов информационного обмена и организации 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., Пшеничников А. П., Сиверс М. А., 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. Однако, данные работы в основном направлены на исследование характеристик волоконно-оптических линий связи и радиоканалов для прямого взаимодействия (в том числе при загоризонтном управлении), архитектур для управления БПЛА через сети мобильной связи и не учитывают структуру ГОНСС, в состав которых входит спутниковый сегмент, состоящий из спутниковых группировок космических аппаратов на геостационарной и низкой околоземной орбитах, а также не обеспечивают нормативные задержки передачи видеопотока в наземном сегменте ГОНСС, представленном сетью мобильной связи. Также в данных исследованиях сформирован комплекс математических моделей, интегрирующий теорию массового обслуживания и статистическую радиотехнику для описания специфики контура взаимодействия. Ключевое внимание уделяется моделям замираний (Райса, Накагами, Рэлея) (в том числе переход от классических моделей замираний в радиоканале к интеллектуальным адаптивным системам) и потерь в нисходящем радиоканале, а также использованию Марковских процессов и систем массового обслуживания для расчета вероятностно-временных характеристик и минимизации задержек в рамках концепции URLLC. Основным достижением является интеграция БПЛА в инфраструктуру 5G/6G через механизмы URLLC и использование миллиметрового диапазона для обеспечения гигабитных скоростей передачи видеопотока. Приоритет исследований направлен в область помехоустойчивости видеопотоков высокого разрешения и оптимизации сетевых протоколов 5G/6G, что позволяет формализовать процессы передачи данных в условиях многолучевости, доплеровских смещений, экранирования сигнала и активного радиоэлектронного противодействия.

Анализ работ показывает, что существующие модели задержек (QoS) в основном учитывают задержки и время передачи по каналу связи на сетевом уровне, в то время как формирование КВО со стороны оператора происходит на уровне приложения. 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.

Научные проблемы в области совершенствования и разработки современных видеокодеков, которые могут применяться в сфере БПЛА, также широко изучены российскими и зарубежными учеными. Наибольший вклад в развитие теории видеосжатия и исследования качества видеопотока внесли российские и зарубежные ученые Парамонов А. И., Маколкина М. А., Цыцулин А. К., Обухова Н. А., Лысенко Н. В., Колмогоров А. Н., Шелухин О. И., Дворкович А. В., Ярославский Л. П., Визильтер Ю. В., Ватолин Д. С., Баранник В. В., Хаханов В.И., Иванов Ю. А., Новаковский С. В., Антипин Н. В., Ahmed N., Wiegand T., Chiariglione L., Rao K. R., Sullivan G. J., Terriberry T., Ohm J.-R. и др. Системы передачи видеопотока через спутниковые каналы связи исторически формировались как решения, в которых конечная задержка на уровне приложения и устойчивость доставки определяются не только параметрами спутникового радиоканала, но и структурой всего канала информационного обмена. Поэтому процесс разработки видеосистем для спутниковой связи фактически распределен между научными школами и авторами, работавшими на разных уровнях стека: от стандартизованных физических и канальных механизмов спутникового сегмента до прикладных методов доставки видео через IP-сети и управление качеством.

К ключевым фигурам системного уровня спутникового видеовещания и профессиональной доставки видеоконтента относятся исследователи и

инженеры, связанные с формированием стандартов семейства DVB-S2. К ним относятся Кривошеев М. И., Гоголь А. А., Шмаков П. В., Быховский М. А., Коломенский К. Ю., Morello A., Reimers U., Cominetti M., Mignone V., Wells N. и др. Эти 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 на уровне приложения как таковой. Также следует отметить, что существующие исследования в данной области не могут обойти основные физические ограничения спутниковых каналов связи и уменьшить задержку распространения цифрового FPV-видеопотока в том числе нейросетевых видеокодеков.

Кроме того, существующие работы не учитывают специфику FPV, при которой ключевым показателем эффективности является задержка передачи видеопотока на уровне приложения при сохранении устойчивости сжатия при потере фрагментов видеоданных.

Исследования, направленные на уменьшение задержки передачи и сжатия команд взаимодействия оператора, 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. Анализ научно-методического аппарата показал наличие фундаментального противоречия между жесткой детерминированностью протоколов управления БПЛА (типа ELRS) и выраженной стохастической природой задержек в ГОНСС. Существующие методы минимизации задержек КВО в таких сетях ограничены экспертным нормированием показателей и не учитывают динамическую вариативность параметров спутниковых и наземных сегментов ГОНСС, что приводит к возникновению «длинных хвостов» в распределении задержек и потере устойчивости FPV. Для разрешения данного противоречия и 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 признаков пространств нейронных сетей для обеспечения сжатия данных никак не изучены.

Развитие научно-методического аппарата 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 указанных авторов заключаются в создании многопараметрических моделей, связывающих 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 видеоинформации 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.

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 и заключающаяся в разработке комплекса моделей каналов информационного обмена и методов по уменьшению задержки информационных потоков в каналах информационного обмена беспилотных систем в условиях значительных задержек передачи данных в спутниковых каналах связи космического сегмента гибридных орбитально-наземных сетей связи, 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 видеокодеков. 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, отличающиеся 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 видеокадров, что достигается за счет преобразования пиксельного представления отдельных видеокадров 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 видеокодеков.

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 работы заключается в развитии научно-методического аппарата построения и оценки систем информационного обмена для взаимодействия оператора с беспилотными системами в гибридной орбитально-наземной сети связи. В диссертации разработаны модели каналов информационного обмена, в которых на основе натурных экспериментов определены законы распределения параметров задержки для различных сегментов фрагмента гибридной сети связи, что создает теоретическую основу для вероятностного описания процессов информационного обмена в таких системах.

Существенным теоретическим результатом является разработанный комплекс методов нейросетевого сжатия FPV-видеопотока, основанный на вариационных автокодировщиках и глубоком сжатии контекста. В рамках данного подхода предложено представление видеокадров и команд взаимодействия оператора с беспилотными системами во внутреннем квантованном латентном пространстве признаков нейронной сети, что расширяет существующие представления о способах снижения задержки в каналах информационного обмена и формирует новые принципы организации передачи информационных потоков для задач взаимодействия с беспилотными системами различного назначения.

Самостоятельную теоретическую значимость имеет разработанный метод предсказания будущих кадров FPV-видеопотока беспилотных систем. В диссертации показано, что уменьшение задержки на уровне приложения может достигаться за счет компенсации задержки распространения цифрового FPV-видеопотока в каналах космического сегмента фрагмента гибридной орбитально-наземной сети связи. При этом выявлены статистически значимые закономерности пространственно-временной организации видеопоследовательностей во внутреннем латентном пространстве признаков и подтверждена зависимость точности предсказания от динамики видеоряда, что вносит вклад в развитие теоретических основ прогнозирующей обработки видео для систем реального времени.

Важным теоретическим результатом является разработка метода сжатия команд взаимодействия оператора с беспилотными системами, в котором объединены нейросетевые автокодировщики и адаптивные помехоустойчивые коды. Такой подход расширяет научные представления о передаче команд взаимодействия в стохастических каналах связи и фактически формирует новое направление, связанное с использованием помехоустойчивого кодирования в латентных признаковых пространствах нейронных сетей для сжатия и повышения устойчивости информационного потока таких команд.

Кроме того, в диссертации разработана комплексная методика оценки эффективности функционирования системы информационного обмена, в которой вместо традиционных аддитивных свертки частных критериев предложено использовать вероятность достижения комплекса целей функционирования беспилотной системы. Данный результат имеет существенное теоретическое значение, поскольку развивает методы многокритериальной оценки телекоммуникационных систем применительно к взаимодействию с беспилотными системами и переводит анализ таких систем от детерминированного описания к вероятностному. Также важным теоретическим результатом является разработка в составе комплексной методики подхода к количественному обоснованию требований к перцептивному качеству восстановленного FPV-видеопотока, основанного не на экспертных оценках, а на анализе вероятности достижения цели функционирования беспилотной системы. Предложенный подход устанавливает прямую связь между объективными метриками перцептивного качества восстановленного видеопотока и успешностью достижения цели функционирования, а также вводит механизм проверки требований на избыточность. В работе получены конкретные пороговые значения требований к перцептивному качеству восстановленного видеопотока и тем самым развиты теоретические основы нормирования качества FPV-видеопотока при взаимодействии с беспилотными системами различного назначения.

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 видеокодексов (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, АО «РЕШЕТНЕВ» при выполнении инициативных научно-исследовательских работ, ООО «КБ «Интеллектуальные приборы» при разработке интегрированных спутниковых радиолиний и системы подвижной спутниковой связи для БАС, а также видеосистемы для устойчивого телевзаимодействия оператора и беспилотной системы 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 взаимодействия оператора и беспилотной системы 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.

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.

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.

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.

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.

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.

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 взаимодействия оператора и беспилотной системы (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 82 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; 3 результатах интеллектуальной деятельности (2 евразийских заявок на патент на изобретение); 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.

ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИИ БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМ

1.1 Характеристика, регулирование беспилотных систем

Если XX век ознаменовался рассветом пилотируемых полетов в атмосфере и космосе, то XXI век переживает аналогичную революцию в сфере беспилотных авиационных систем и автономных полетов. За последнее десятилетие беспилотные авиационные системы, часто называемые широкой публикой «дронами» или БПЛА, стали ценным и повсеместным средством для использования в промышленности, научных кругах и в любительской сфере. Благодаря достижениям в области микроконтроллеров, сенсорных технологий и систем управления, БАС быстро стали повсеместным элементом современного мира. Несмотря на то, что большинство традиционных приложений относится к военной сфере, широкий спектр применения БАС и их относительно низкая стоимость привели к их растущему распространению на коммерческом рынке.

По данным Precedence Research, объем мирового рынка БАС в 2024 году оценивался в 37,68 млрд долларов США, тогда как к 2033 году ожидается, что он достигнет отметки примерно 169,7 млрд долларов США. Эксперты прогнозируют, что рынок будет расти со среднегодовым темпом роста в 18,2% в период с 2024 по 2033 год [1]. Более детальная информация представлена на рис. 1.1 [1].

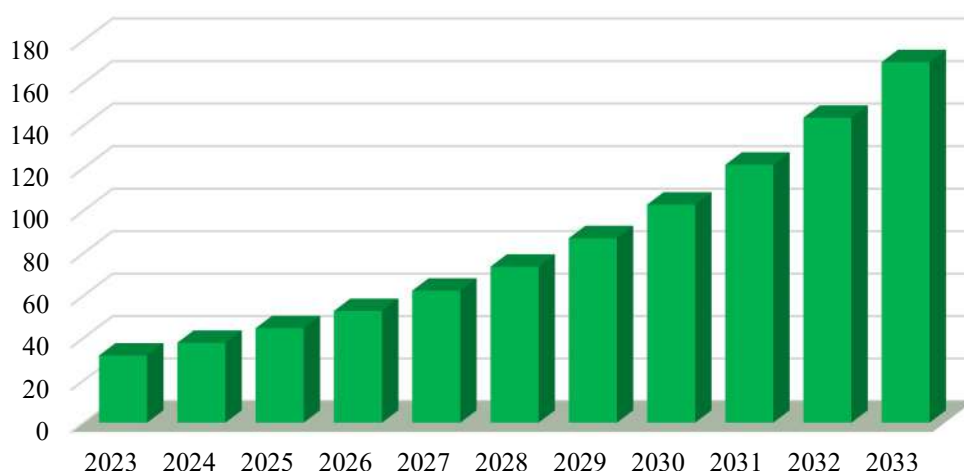


Рисунок 1.1 – Мировой рынок БАС, млрд. дол.

Большинство гражданских БАС состоит из БПЛА, оператора, полезной

нагрузки, элементов управления и архитектуры каналов связи. Военные БАС также могут включать такие элементы, как платформа системы вооружения и поддерживающие войска [2]. На рисунке 1.2 [3] показана общая система беспилотных аппаратов и то, как различные элементы объединяются для создания целостного контура.



Рисунок 1.2 – Элементы беспилотной авиационной системы

Во многих случаях структура БАС не будет статичной. Аппарат может взаимодействовать с одним из многих операторов во время любого конкретного полета или от одного дня к другому. Аналогичным образом, несколько БПЛА могут взаимодействовать с одной станцией оператора, хотя стандарты иногда предусматривают сценарий с одним аппаратом за один раз [4]. В обоих случаях конфигурация системы в процессе эксплуатации меняется по мере изменения того или иного элемента в режиме реального времени. В последние годы появилась тенденция называть любой БПЛА беспилотной системой, однако это не всегда оправданно и является уместным.

Международно-правовое регулирование и области применения БАС активно обсуждаются в контексте военной сферы, но сегодня системы постепенно распространяются и на другие области, такие как обеспечение

разведки, наблюдения, целеуказания и рекогносцировки, а также на гражданскую авиацию, в зависимости от наличия соответствующего законодательного обеспечения и отраслевых стандартов [5].

В настоящее время в процессе изучения действующих и потенциальных возможностей применения БАС можно встретить различные классификации и подходы.

Некоторые ученые разделяют области приложения БАС на две большие категории: оборонную и гражданскую/коммерческую [6]. Оборонные БПЛА включают средневысотные долговременные и высотные долговременные системы, а также небольшие тактические системы наблюдения, которые могут быть запущены одним человеком. В оборонной отрасли БАС используются: для целей наблюдения и разведки и в качестве оружейных платформ. БПЛА эволюционировали: сначала в качестве средства захвата цели с использованием лазерных маркеров для ее обозначения, которая затем атакуется высокоточными ракетами, запускаемыми с обычных самолетов или вертолетов, а затем в качестве платформы доставки оружия с все более широкими оперативными возможностями.

Подавляющее большинство гражданских/коммерческих БПЛА имеют небольшой вес (менее 25 кг) и применяются в различных отраслях промышленности и социальной сферы.

Стремительный прогресс в расширении сферы военного и государственного использования БПЛА привел к признанию весьма широкого потенциала гражданского коммерческого применения различных БПЛА, большинство из которых представляют собой небольшие БПЛА, работающие на высоте ниже той, на которой обычно находятся пилотируемые самолеты, или, по крайней мере, ниже 300 метров над уровнем моря. Многие из этих применений уже хорошо известны и включают в себя: наблюдение за безопасностью, реагирование на чрезвычайные ситуации, облегчение связи и вещания, транспортировка мелких и насыпных грузов, визуальное, спектральное и тепловое обследование сооружений, мониторинг

инфраструктуры линейных сетей, фотографирование и картографическая съемка, внесение сельскохозяйственных удобрений и химикатов, внешний технический осмотр самолетов, исследование атмосферы.

Другие исследователи выделяют три области применения БПЛА: военную, промышленную и коммерческую [7]. Также есть точка зрения, согласно которой применение БАС целесообразно рассматривать в разрезе отраслей. Напримерно, примерно 14% всех приложений приходится на энергетическую отрасль, 12% – на строительство и 7% – на сельское хозяйство.

В рамках диссертационного исследования автор предлагает области применения БПЛА классифицировать по характеру миссии (гражданская или военная), типу зоны полета (в помещении или на открытом воздухе). Кроме того, беспилотные системы, к которым относятся БПЛА, дополнительно классифицируются по функционированию в окружающей среде (под водой, на воде, на земле, в воздухе или в космосе). Визуализация данной классификации представлена на рис. 1.3.

Очевидно, что рассмотреть все сферы применения БАС в рамках данного исследования не представляется возможным, поэтому уделим внимание наиболее значимым и распространенным областям применения БАС в гражданской сфере.

Сферы применения и особенности использования БАС в гражданских приложениях представляется целесообразным рассмотреть через призму силы и интенсивности их влияния на развитие конкретной отрасли. Для этого воспользуемся древовидной картой, которая представлена на рис. 1.4 [8].

Основная сфера применения БАС в различных отраслях – автоматизация инспекций. Используя передовую аналитику или искусственный интеллект (ИИ), дроны автоматизируют составление маршрутов и воздушную навигацию, снижая зависимость от ручного труда. Рассмотрим возможности использования на примере конкретных отраслей.



Рисунок – 1.3 Классификация сфер применения БАС¹

¹ Составлено автором

Строительство 13 %	Логистика 12 %	Энергетика 12 %	Недвижимость 12 %
Сельское хозяйство 13 %			
Промышленность 12 %	Экология 9 %		Здравоохранение 5 %
	Индустрия 4.0 8 %		Коммунальное хозяйство 4 %

Рисунок 1.4 – Сила влияния дронов на отрасли и сферы деятельности

Строительство. В настоящее время дроны используются на всех этапах строительства, начиная от геодезии и картирования и заканчивая этапом обслуживания зданий и сооружений, а также регулярных проверок.

Дроны снижают трудозатраты на топографическую съемку и землеустройство. Например, использование дронов для топографической съемки сокращает время на сбор данных на 60-80% по сравнению с традиционными методами [9]. БПЛА с лидарами и фотограмметрией обеспечивают точность до 2-5 см [10, 11]. В то же время они автоматизируют отслеживание активов и хода строительства. Это экономит время и ресурсы, связанные с такими операциями, и улучшает видимость. Кроме того, строительный сектор использует дроны для наблюдения за периметром и повышения безопасности персонала за счет мониторинга стройплощадки. Стартапы сегодня сосредоточены на использовании ИИ для анализа данных с дронов, чтобы выявить нарушителей и сориентировать рабочих в опасных условиях. Строительные компании используют беспилотные летательные аппараты для осмотра крупных сооружений, таких как мосты и башни, что помогает в планировании их технического обслуживания. Например, Пермский политехнический университет разрабатывает систему на основе ИИ для диагностики аварийных зданий по визуальному анализу трещин, полученных с дронов [12].

На рис. 1.5 [13] показаны области строительства, в которых используются дроны, и частота их применения.

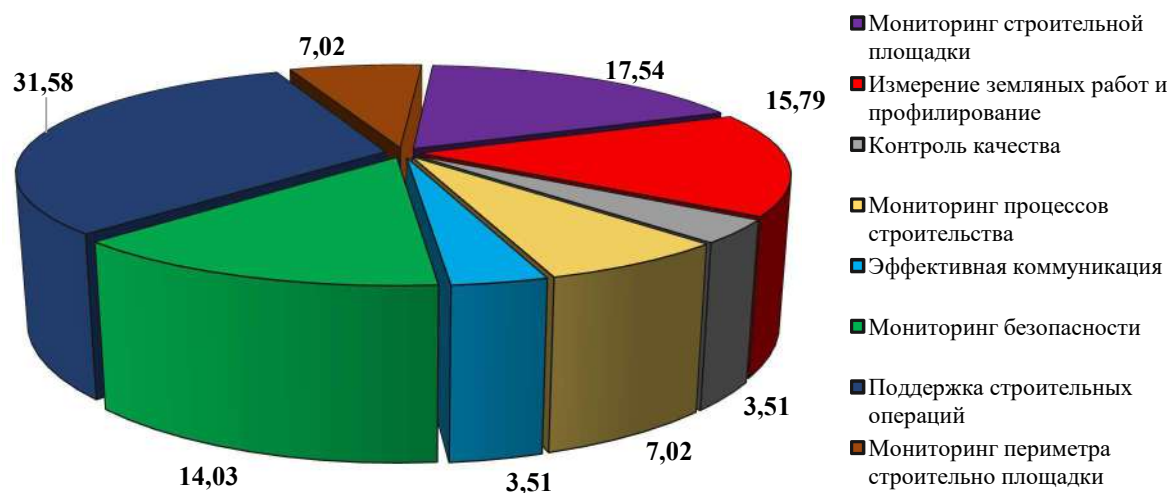


Рисунок 1.5 – Области применения БАС в строительстве, %

Беспилотники находят все более широкое применение и в России. В сфере строительства и дорожного мониторинга дроны помогают отслеживать ход работ и контролировать качество дорожного покрытия. Например, в Южно-Сахалинске беспилотные летательные аппараты задействованы для инспекции местных дорог и строительства новых объектов, позволяя дистанционно анализировать объем работ и выявлять дефекты [14]. В Саратовской области БПЛА применяются для обследования железнодорожных путей, повышая безопасность движения составов [15].

Параллельно в Московском метро успешно протестирован промышленный беспилотный летательный аппарат, который построил детализированную 3D-модель вентиляционной шахты без использования GPS-навигации, применяя технологию SLAM. "РосСтройКонтроль" с 1 июля 2024 года запустил автоматизированную систему "Пуск", которая будет собирать и хранить информацию о строительных дефектах с различных объектов [16], зафиксированных с помощью дронов.

Государственные инициативы Российской Федерации направлены на дальнейшее развитие технологий взаимодействия оператора и беспилотной системы. Минстрой России поддерживает внедрение БПЛА в строительную

отрасль в рамках национального проекта «Беспилотные авиационные системы». Эти меры позволят не только оптимизировать строительные процессы, но и обеспечить повышение точности геодезических работ, мониторинга инфраструктуры и охраны окружающей среды. В дополнение к этому, Минстрой России утвердил новый стандарт ГОСТ Р, регламентирующий использование беспилотных летательных аппаратов для геодезических работ в строительстве, что позволит унифицировать методы и повысить точность мониторинга [17].

Сельское хозяйство. Сельхозпроизводители используют БПЛА для наблюдения за посевами, посадки семян и т.д. [18]. Их использование способствует оптимизации аграрных ресурсов, снижению затрат и уменьшению воздействия на окружающую среду [19]. Применение дронов для внесения удобрений становится одним из главных решений проблемы нехватки рабочей силы [22]. Например, модели БПЛА DJI Agras T22 [23] и XAG P100 [24] позволяют уменьшить расход азота на 18–22% и повысить урожайность на 10–15% [25].

Например, некоторые стартапы разрабатывают беспилотные летательные аппараты, которые наносят на карту сельскохозяйственные угодья и проверяют посевы на наличие болезней, а их системы искусственного интеллекта оптимизируют маршруты обработки [26–29]. Такие решения позволяют фермерам максимизировать урожайность, обеспечивают точное земледелие и решают проблему дефицита персонала. Например, в Китае они успешно используются для борьбы с опустыниванием, повышая эффективность засева в 3–4 раза по сравнению с ручным трудом [30].

Кроме того, БПЛА помогают выявлять очаги заражения вредителями, как, например, в России, где разработана технология обнаружения деревьев, пораженных жуком-полиграфом [31]. В Китае беспилотные летательные аппараты применяются для контроля популяции тли, защищая посевы пшеницы и кукурузы [32].

В животноводстве беспилотные летательные аппараты находят

применение для мониторинга стад и пастбищ, а также для предотвращения падежа скота. Последние достижения в области БПЛА направлены на снижение расходов, связанных с сельскохозяйственными дронами, чтобы даже мелкие фермеры могли использовать их и улучшить производство продуктов питания.

Хочется отметить, что и в Российской Федерации наблюдается активное развитие технологий беспилотной авиации в аграрном секторе. Например, Министерство сельского хозяйства РФ объявило о создании специализированного центра по применению БПЛА [33] и разработке критериев их эффективности, а также планирует закупить 300 дронов в 2024–2026 годах. В стране насчитывается более 12 000 агродронов, что значительно уступает Китаю (160 000 единиц) [34], но к 2030 году планируется наращивание производства до 5 000 единиц ежегодно. Для полного покрытия сельхозугодий потребуется от 50 000 до 100 000 дронов.

Агродроны наиболее активно применяются в Северо-Кавказском, Южном и Центральном федеральных округах, где ими обработано сотни тысяч гектаров посевных площадей [35]. Внедрение дронов для сева риса в Краснодарском крае увеличило урожайность на 15% [36], а в Оренбургской области и Калмыкии они используются для борьбы с саранчой [37]. Современные разработки, включая модели с мультиспектральными камерами [38], позволяют снижать расход ресурсов и повышать урожайность [39].

В России также ведётся подготовка кадров для работы с БПЛА [40]: организованы образовательные программы [41], сертификация операторов и специализированные центры обучения [42]. Автоматизация сельхозтехники развивается параллельно: в Санкт-Петербурге к 2030 году планируется запуск серийного производства автономных тракторов «Кировец Агробот» [43]. Российская компания Cognitive Pilot вошла в число мировых лидеров по разработке автопилотируемых систем для сельского хозяйства [44].

Основными барьерами развития отрасли остаются высокая стоимость оборудования, ограниченные возможности локального производства и необходимость совершенствования нормативной базы [45]. Однако с

увеличением объёмов производства и государственной поддержкой ожидается ускоренный рост данного сегмента. Применение БПЛА уже доказало свою эффективность, позволяя снижать потери урожая до 22%, повышать урожайность и минимизировать экологическое воздействие, сократив расход химикатов на 20% [22].

Промышленность. Производственные предприятия используют БПЛА для отслеживания работников и активов, чтобы обеспечить соблюдение техники безопасности. Кроме того, мониторинг с помощью беспилотных летательных аппаратов позволяет выявить утечки или другие аномалии, что повышает эффективность планирования технического обслуживания и безопасность персонала. Можно выделить три ключевые сферы, в которых БПЛА на производстве позволяют получить наибольший эффект:

1. Инспекции с помощью беспилотных летательных аппаратов особенно в таких областях, как производство, распределение и передача электроэнергии.
2. Управление запасами: дроны автоматизируют процессы инвентаризации, летая по складским помещениям и складам и сканируя штрих-коды и QR-коды на товарах для точной проверки запасов.
3. Мониторинг и планирование технического обслуживания: БПЛА предлагают проактивный подход к контролю за состоянием оборудования и объектов на производстве. Они обеспечивают воздушный обзор и детальный осмотр труднодоступных мест, получая изображения и данные в режиме реального времени, помогая выявлять потенциальные проблемы до того, как они перерастут в дорогостоящий ремонт, способствуя своевременному техническому обслуживанию и сокращению простоев.

Логистика. В сфере логистики БПЛА используются для различных задач, таких как доставка посылок и осмотр инфраструктуры. По данным McKinsey, количество посылок, доставленных дронами, увеличилось более чем на 80,1% с 2023 по 2024 год. По данным компании, число доставок по всему миру достигло почти 1 млн [46]. Прогнозы показывают, что усовершенствованная

система воздушной доставки товаров сможет обслуживать около 67% населения мира, особенно жителей пригородов и сельской местности, потенциально заменив 389 миллиардов традиционных доставок по всем странам к 2034 году [47].

Один из наиболее динамично развивающихся сегментов — это доставка товаров и продуктов питания. В Швеции компании Tele2 AB и FOODORA начали использовать дроны Aerit, подключённые к сетям 5G и IoT, для доставки еды массой до 4 кг на расстояние до 21 км даже в сложных погодных условиях [48]. В США компания Zipline внедрила дроновую логистику для быстрой курьерской доставки в радиусе 16 км [49], а в России проект «Аэромакс» успешно применяет вертолетные БПЛА SH-450 для перевозки грузов в Ханты-Мансийском автономном округе (ХМАО), где за 10 часов было доставлено 150 кг грузов на расстояние 600 км [50].

Следует отметить, что на территории России действуют экспериментальные правовые режимы (ЭПР), позволяющие тестировать логистические операции с использованием БПЛА. Например, в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 23.05.2024 № 641 «Об установлении экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций и утверждении Программы экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций по эксплуатации беспилотных систем в г. Москве» в Москве тестируется доставка грузов дронами массой до 100 кг с использованием воздушного пространства до 800 метров. В других регионах, включая Заполярье, Тольятти, Татарстан [51] и Самарскую область [52], также проводятся испытания с участием частных и государственных структур.

Однако широкомасштабное внедрение сдерживается рядом факторов: отсутствием нормативной базы, закрытым воздушным пространством в городах, неадаптированной инфраструктурой и высокой стоимостью доставки [53]. Так, «Почта России» сообщила, что доставка 1 кг груза с помощью БПЛА в рамках ЭПР обходится более чем в 150 раз дороже, чем обычным пилотируемым рейсом [54].

В международной практике дроны также активно используются. Например, в Китае компания Meituan доставляет заказы на участках Великой Китайской стены [55], а в Дубае запущена официальная система доставки с использованием аппаратов Keeta Drone [56]. В США Amazon и Walmart совместно с FAA тестируют интеграцию дронов в общее воздушное пространство [57].

Согласно исследованиям компании Wing, к 2026 г. БПЛА смогут обеспечивать до 25% всех продуктовых доставок в США, при этом сокращая затраты на логистику на 30% за счёт экономии топлива и снижения зависимости от человеческого труда [58]. Глобальный рынок доставки с помощью БПЛА к 2032 году может вырасти до \$43,7 млрд при среднегодовом темпе роста 31% [59].

Ключевыми направлениями технологического прогресса являются повышение грузоподъемности и автономности дронов, а также развитие систем навигации и ройвой координации. В качестве примера можно привести российский дрон «Партизан» способный перевозить до 1 тонны груза на расстояние до 1000 км [60] и БПЛА «Легионер» петербургской компании «Тихие крылья» способный доставлять 200 кг груза на 660 км за менее чем 10 часов [61].

Параллельно на складах и в логистических центрах также происходит внедрение БПЛА – они используются для инвентаризации, автоматического патрулирования и маркировки паллет с помощью компьютерного зрения и технологий SLAM [62] (аббр. от англ. Simultaneous Localization And Mapping – одновременная локализации и сопоставление).

Применение дронов в логистике демонстрирует высокую эффективность, особенно в сфере доставки последней мили, медицинской логистики и работы в труднодоступных районах. Однако массовое внедрение требует устранения нормативных, технологических и экономических барьеров. При условии согласованной работы регуляторов, производителей и операторов БПЛА, дроновая логистика имеет потенциал стать ключевым элементом будущих

цепочек поставок.

Энергетика. Энергетическая отрасль включает в себя капиталоемкие объекты инфраструктуры, такие как солнечные электростанции и турбины. Дроны используют съемку с высоким разрешением для получения подробных данных о состоянии активов, что помогает принимать решения об их состоянии, что значительно повышает эффективность мониторинга и технического обслуживания инфраструктуры [63, 64]. Они также позволяют энергетическим компаниям использовать информацию о конкретном объекте, например о солнечной активности, для улучшения разработки энергетических проектов.

Внедрение дронов позволяет снизить затраты на инспекцию линий электропередачи (ЛЭП) до 30%, ускоряя сбор данных в 5 раз по сравнению с традиционными методами [65]. Применение алгоритмов ИИ повышает точность обнаружения дефектов ЛЭП на 25%, сокращая время анализа до нескольких минут [66]. Также БПЛА используются для автоматизированной инспекции инженерных конструкций, снижая риски для персонала и минимизируя время простоя оборудования [67]. Глубокое обучение применяется для обнаружения дефектов на компонентах ЛЭП, включая изоляторы [66]. Также разработаны математические модели оценки влияния электромагнитных полей на безопасность дронов при инспекциях линий сверхвысокого напряжения [68]. Внедрение автономных систем коррекционной инспекции на базе БПЛА способствует снижению затрат на обслуживание и повышению точности диагностики [69].

В области возобновляемой энергетики дроны задействованы в осмотрах ветрогенераторов [70, 71], включая выявление трещин и эрозии лопастей [72]. Использование акустических систем и LiDAR-сканирования [73] позволяет выявлять неисправности на морских платформах и наземных турбинах [74, 75]. В солнечной энергетике БПЛА с термографическими сенсорами применяются для выявления повреждений панелей [76, 77], что повышает эффективность электростанций [78, 79]. Машинное обучение улучшает распознавание

дефектов за счет обработки сложных фонов [80] и низкоконтрастных изображений [81]. Также дроны используются для создания 3D-моделей солнечных ферм [82], что оптимизирует размещение панелей и их производительность [83].

Недвижимость. Компании, занимающиеся недвижимостью, используют беспилотные летательные аппараты для наблюдения за объектами, чтобы облегчить их обслуживание. Снимки высокого разрешения, сделанные с помощью БПЛА, позволяют получить точные карты местности, что дает возможность потенциальным покупателям лучше видеть ситуацию и улучшает оценку активов.

Лесное хозяйство и экологический мониторинг. БПЛА представляют собой простое и экономичное средство сбора точных данных об окружающей среде, которые можно использовать в различных целях: начиная от моделирования ледников до отслеживания береговой эрозии и идентификации видов. Они активно используются для наблюдения за популяциями диких животных в труднодоступных районах [84], инвентаризации биоразнообразия и оценки изменений экосистем, вызванных антропогенными факторами [85–87]. Кроме этого, дроны позволяют анализировать структуру лесов, включая высоту деревьев и густоту крон, а также оценивать биоразнообразие травянистых экосистем [88] и их экономическую значимость [89]. Внедрение технологий машинного обучения [90] позволяет автоматизировать обработку данных, повышая точность мониторинга [91, 92].

В области лесного хозяйства БПЛА применяются для выявления заболеваний деревьев, незаконных вырубок [93] и лесных пожаров [94]. Использование мультиспектральных камер и лидарных технологий позволяет оценивать объем биомассы, углеродный запас лесов и выявлять стресс у растений [94–97]. Интеграция данных с системами спутникового зондирования и ГИС повышает точность мониторинга и анализа динамики лесных экосистем [94, 98].

Для исследования водных ресурсов БПЛА оснащаются мульти- и

гиперспектральными сенсорами [99, 100], позволяющими оценивать качество воды, концентрацию хлорофилла и загрязняющих веществ [101]. Они также используются для изучения макрофитов в труднодоступных водоемах [102] и анализа гидроморфологических процессов, включая изменения русел рек [103]. Следует отметить, что в развивающихся странах ("глобальный юг") наблюдается растущий интерес к применению БПЛА для мониторинга водных ресурсов, несмотря на существующие экономические и регулятивные ограничения [104]. У побережья Кипра реализуется проект EONIOS, направленный на восстановление морской экосистемы с помощью искусственных рифов и автономных подводных аппаратов для увеличения рыбных запасов и восстановления морской жизни [105].

В сфере геоморфологии дроны фиксируют эрозионные процессы, динамику ледников и последствия природных катастроф, таких как наводнения и вулканические извержения [106]. Например, исследования в Восточной Африке продемонстрировали влияние природных и антропогенных факторов на ландшафтные изменения во время вулканической активности [107]. Также БПЛА применяются для оценки изменений в растительности, что имеет значение в контексте климатических изменений и антропогенного воздействия [108].

В агроэкологических исследованиях дроны используются для мониторинга оросительных систем [91], оценки влажности почв и анализа их плодородия [109]. Интеграция данных БПЛА и искусственного интеллекта позволяет эффективно отслеживать биоразнообразие на сельхозугодьях, способствуя устойчивому управлению экосистемами [85].

Несмотря на очевидные преимущества, использование БПЛА в экологии ограничено высокой стоимостью оборудования и сложностью эксплуатации в ряде регионов. Однако развитие доступных моделей и DIY-решений способствует расширению их применения [110].

Беспилотные летательные аппараты также находят всё более широкое применение в научных исследованиях и мониторинге окружающей среды и на

территории Российской Федерации. В качестве примера хочется отметить работу российских исследователей, которые с помощью беспилотных аппаратов "Орлан-10" провели перепись белых медведей в заповеднике "Медвежьи острова" (Республика Саха, Якутия), выявив около 180 особей. Дроны, оснащенные высокоточным оборудованием, позволили собрать более 25 тысяч снимков, обработанных с применением нейросетевых алгоритмов. Этот проект является частью инициативы "Беломедвежья перепись", направленной на изучение популяции белых медведей в российской Арктике, включая заповедники на Ямале и в Красноярском крае. Оценка численности животных важна для разработки мер по их охране [111]. Кроме того, Росзаповедцентр Минприроды России и корпорация «Новый космос» планируют задействовать спутниковый мониторинг и радиолокационную съемку для изучения экосистем Арктики [112].

Российский экологический оператор (РЭО) инициировал проект по контролю свалок с помощью дронов, который включает аэрофотосъемку, тепловизионное сканирование и анализ состояния объектов размещения отходов. Компания «Геоскан» разработала систему, фиксирующую нарушения на полигонах ТКО с использованием алгоритмов глубокого обучения [113].

Кроме того, компания «Норильский никель» использует дроны для мониторинга воздуха и воды в промышленных районах [114]. Аналогичные технологии применяются и на побережье Белого моря для мониторинга состояния популяции морских млекопитающих, в частности, — гренландского тюленя и кольчатой нерпы [115]. Собранная информация будет использована для разработки стратегий рационального использования водных биоресурсов, учитывая возрастающий спрос на продукцию из морских млекопитающих. Кроме того, исследование оценивает влияние крупных популяций тюленей на рыбные ресурсы региона, поскольку значительное потребление рыбы этими животными создаёт конкуренцию с промышленным рыболовством.

В ряде регионов Российской Федерации беспилотные летательные аппараты внедряются и для различных природоохранных задач. На Камчатке

они будут следить за нерестилищами тихоокеанских лососей [116]. В Новосибирске обеспечивать учет диких животных на особо охраняемых природных территориях [117], а в Бурятии — защищать нерестилища байкальского омуля [118] и особо охраняемые природные территории [119]. Дроны также задействованы в борьбе с незаконной вырубкой лесов на Сахалине [120] и в Северо-Казахстанской области [121], а также мониторинга работы по утилизации судов [122]. Также БПЛА применяются для мониторинга чистоты общественных территорий, выявления незаконных свалок и оценки экологического состояния. В Крыму они задействованы в мониторинге акватории после разлива нефтепродуктов в Керченском проливе в 2024 году [123]. Аналогичные проекты реализуются в Магаданской области [124] и Ленинградской областях [125].

В целом, технологии FPV открывают новые возможности для охраны природы, устойчивого управления природными ресурсами и адаптации к изменениям климата.

Индустрия 4.0. БПЛА играют важную роль в автоматизации различных аспектов промышленной деятельности [67]. Например, на нефтегазовых предприятиях беспилотные летательные аппараты используются в основном для проверки трубопроводов на предмет утечек [126, 127] и снижению рисков аварий [128, 129], а на производственных площадках - для автоматизации погрузочно-разгрузочных работ и контроля за рабочими.

При строительстве и модернизации объектов аэросъемка с дронов обеспечивает точное картографирование месторождений и геодезические исследования [130]. БПЛА используются для оценки воздействия нефтегазовой деятельности на окружающую среду, включая контроль растительного покрова, состояния водоемов и уровня загрязнения почвы [131]. Кроме того, исследуются риски, связанные с использованием дронов в энергетике, включая угрозы инфраструктуре и методы их нейтрализации [132].

В качестве примера можно отметить работу разработанных в России роботизированных систем, таких как БПЛА «Паук», способных выполнять

ремонт ЛЭП без отключения напряжения, заменяя работу нескольких бригад электриков [133]. Также технологии взаимодействия оператора и беспилотной системы внедряются в газотранспортную инфраструктуру, включая мониторинг газопроводов в Удмуртии [134].

Здравоохранение. Сектор здравоохранения использует медицинские беспилотные летательные аппараты для доставки оборудования и расходных материалов. Также БПЛА позволяют фармацевтическим компаниям и больницам избегать прямого контакта с пациентами и ускоряют доставку лекарств и наборов для лечения.

В России, по информации Минздрава, БПЛА уже признаны перспективным инструментом для доставки препаратов и биоматериалов, особенно в условиях климатических и инфраструктурных ограничений [135]. Успешные кейсы отмечены на Сахалине [136] и в ХМАО [137], где конвертопланы и мультикоптеры используются для перевозки образцов плазмы крови и лекарств.

Коммунальное хозяйство. Вручную проверять массивные объекты коммунальной инфраструктуры очень капиталоемко и длительно. Кроме того, при традиционных осмотрах работники оказываются в опасных условиях, например, на высоковольтных линиях электропередач. Дроны устраняют эту проблему, оптимизируя инспекционную деятельность.

Безопасность и чрезвычайные ситуации. БПЛА широко применяются в сфере спасательных операций, обнаружения чрезвычайных ситуаций, мониторинга лесных пожаров и контроля незаконной вырубki леса [138]. Их эффективность при проведении поисково-спасательных работ подтверждается множеством успешных примеров [139]. Например, в Якутии беспилотный летательный аппарат помог оперативно обнаружить и эвакуировать замерзающих туристов [140]. В Подмосковье дрон с нейросетью за 45 минут нашел пропавшую 87-летнюю женщину [141], а в Кировской области — заблудившегося грибника [142]. В Москве квадрокоптеры задействованы для поиска пропавших людей в труднодоступных районах [143]. Кроме этого, в

Анталье дроны Sankuş используются для оперативного спасения утопающих туристов, доставляя спасательный круг в течение 8-10 секунд [144]. Однако, в Калининградской области дрон, приобретенный для этой цели, не используется [145].

В Красноярском крае беспилотные летательные аппараты выявили 12 случаев незаконной вырубki леса, что позволило предотвратить ущерб на сумму более 400 тыс. руб. [146]. В рамках национального проекта планируется закупить более 5,1 тыс. БПЛА до 2030 года.

Дроны успешно функционируют и в условиях низких температур. Например, беспилотные летательные аппараты «Геоскан 201» и «Геоскан 401» используются для мониторинга льдов и поиска пропавших людей в полярных районах [147].

Лесные пожары становятся всё более частыми и разрушительными по всему миру и ветер является одним из основных факторов. Это приводит к неожиданному и непредсказуемому распространению огня, угрозам для населения и жертвам среди людей, что делает микрометеорологию очень эффективным инструментом борьбы с пожарами. NASA на территории США тестирует дроны для проведения микрометеорологических исследований и помощи в тушении пожаров [148]. В Казахстане дрон ХС-25 помог предотвратить распространение 16 возгораний [149].

В России беспилотные летательные аппараты используются в Ханты-Мансийском автономном округе [150], Иркутской области [151], Саратовской области [152, 153], Волгоградской области [154] и ряде других регионов [155, 156]. В Томском госуниверситете разработан дрон «Шмель» для повышения эффективности тушения пожаров [157].

Кроме чрезвычайных ситуаций БПЛА широко используются в современных системах обеспечения общественной и инфраструктурной безопасности. Благодаря высокой мобильности, оперативности и интеграции с информационными системами, дроны применяются для мониторинга, патрулирования и фиксации правонарушений. Одним из передовых примеров в

этой области является система, разработанная компанией BRINC Drones, которая интегрирована с американской экстренной службой 911. БПЛА автоматически вылетает на место вызова и передаёт видео в центр взаимодействия оператора и беспилотной системы в течение 70 секунд. Помимо наблюдения, дроны могут параллельно использоваться для доставки медикаментов и обслуживания неэкстренных вызовов [158].

Аналогичные решения реализуются в других странах. Полиция Дубая применяет дроны для оперативного реагирования и мониторинга районов, где возможны инциденты [159]. В Техасе внедряется программа «Глаз в небе», где дроны первыми прибывают на место происшествия, передавая изображение диспетчерам и патрульным в реальном времени. Беспилотники работают в смену, передавая дежурство при разрядке батареи [160].

Использование БПЛА выходит за рамки полицейских операций. Например, в России и Японии дроны применяются в задачах охраны гражданских объектов, включая аэродромы, с возможностью нейтрализации вражеских БПЛА и отпугивания птиц [161]. Японские компании разрабатывают технологии создания 3D-карт местности в реальном времени для обнаружения подозреваемых и координации действий экстренных служб [162].

В дорожной безопасности БПЛА заменяют или дополняют традиционные методы. В Костромской [163] и Кировской [164] областях дроны фиксируют нарушения ПДД, такие как выезд на встречную полосу.

Кроме того, дроны применяются в миграционном контроле и поисковых операциях. В Подмосковье [165], Челябинской области [166] и других регионах с их помощью выявлялись незарегистрированные мигранты и уклонисты от воинского учета [167]. В Белогорске (Амурская область) дроны задействованы в рейдах по выявлению нарушений в содержании земельных участков [168].

Научные исследования. Одним из приоритетных направлений научных исследований с помощью дронов является изучение климатических и атмосферных процессов в арктических регионах. Для этого в России разрабатываются специальные полярные БПЛА, способные выполнять ледовую

разведку, отслеживать параметры воздушных масс, а также измерять температуру, влажность и химический состав воздуха [169]. В Новосибирске создан сферический дрон для исследования погоды, оптимизированный для атмосферных исследований благодаря аэродинамической форме корпуса [170].

В международной практике применение БПЛА выходит за пределы земной поверхности. NASA представило проект Mars Chopper — научного беспилотного вертолета нового поколения для миссий на Марсе. Аппарат массой до 40 кг сможет ежедневно преодолевать до 3 км, транспортируя до 5 кг научного оборудования [171].

Также можно отметить достижения в биоинженерии: японские учёные разработали биогибридный дрон с обонятельной системой шелкопряда, позволяющий эффективно искать источники запахов, включая опасные вещества и следы жизнедеятельности человека, что делает его особенно ценным для поисково-спасательных операций [172].

Отдельный исследовательский интерес представляет собой активно развивающийся во многих странах мира рынок БАС. Рассмотрим текущее положение и будущую динамику более подробно.

Индия

За последние несколько лет сектор БПЛА в стране превратился в один из наиболее значимых, и правительство проявляет большой интерес к разработкам в этой сфере. В настоящее время в стране работает более 200 компаний в области технологий взаимодействия оператора и беспилотной системы. Среди самых быстрорастущих – Garuda Aerospace, Marut Drones, BonV Aero, Skylark Drones, Skye Air Mobility и Preimage.

По прогнозам, индийский рынок БПЛА достигнет размера \$1,437 млрд к 2030 г. Для сравнения, в 2022 г. этот показатель был на уровне \$2,7 млрд в 2022 г. При этом мировой рынок дронов к 2030 г. должен вырасти до \$54,6 млрд, то есть $\frac{1}{4}$ всех реализованных дронов будут индийскими. На рис. 1.6 [173] представлена динамика рынка индийских дронов с разбивкой по сегментам.

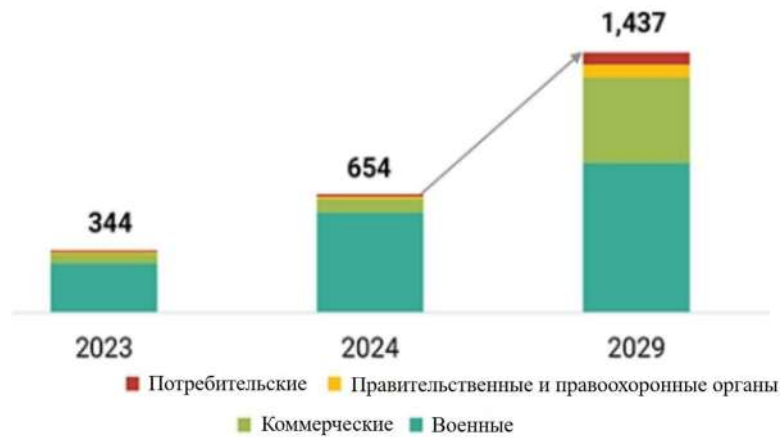


Рисунок 1.6 – Динамика рынка индийских дронов, млрд. дол.

Важным фактором для роста всей отрасли является развитие сектора исследований и разработок. С 2015 г. компании, производящие БПЛА, подали около 37 патентов, связанных с различными технологиями взаимодействия оператора и беспилотной системы, включая повышение надежности пропеллеров, автономные полеты и пр. Больше всего компаний на рынке оказывают услуги с помощью дронов (21%) и занимаются подготовкой операторов (21%). За ними следуют разработчики ПО (18%). На четвертом месте находятся производители самих дронов и оборудования (12%).

Как следует из статистики, индийский рынок БПЛА можно считать развитым, на долю стартапов, где работает от 1 до 10 человек, приходится только 27% компаний. При этом 46% компаний на рынке — крупные, численность сотрудников некоторых из них может превышать 10 тыс. человек.

Наиболее перспективным сектором для использования дронов в Индии аналитики называют сельское хозяйство, на долю которого приходится 15,4% ВВП и в котором занято 47% всей рабочей силы. Следом идет проведение поисково-спасательных работ в случае наводнений и землетрясений. Высокая концентрация населения, в свою очередь, означает потребность в доставке дронами, а также новых инфраструктурных проектах, что открывает возможности применения дронов для картографирования и геодезии.

Отсутствие развитой внутренней экосистемы для производства компонентов дронов вынуждает производителей импортировать материалы и

создает ряд ограничений на индийском рынке дронов. Зависимость от иностранных поставщиков делает отрасль уязвимой к колебаниям международного рынка, нестабильности валютных курсов и потенциальным геополитическим конфликтам, которые могут нарушить цепочки поставок. Такая зависимость сдерживает рост собственного потенциала, ограничивая развитие технологий взаимодействия оператора и беспилотной системы, адаптированных к уникальным условиям Индии.

Китай

По итогам 2023 г. Китай снова оказался мировым лидером в производстве и использовании дронов. Количество коммерческих беспилотных летательных аппаратов, которые выпустили в Китае за последние пять лет (с 2019 по 2023 г.), выросло в 2,5 раза, с 392 тыс. до практически 1 млн штук, следует из данных консалтинговой компания Sinolytics. Ожидается, что к 2028 г. объем рынка беспилотных аппаратов достигнет 3,5 млн штук. Для сравнения, в Германии, которая является лидером по этому показателю среди стран ЕС, на данный момент зарегистрировано ~415 тыс. БПЛА. Объем производства гражданских БПЛА в Китае в 2023 г. превысил 120 млрд юаней (\$16,5 млрд). Ожидается, что в 2025 г. этот показатель достигнет 200 млрд юаней (\$27,7 млрд).

При этом около 60% всех производимых БПЛА в Китае поставляется в гражданский сектор. Они используются преимущественно в сельском хозяйстве (31%), для картографии (23%), инспектирования: линий электропередач (19%) и в качестве наблюдательных комплексов (7%). Количество аттестованных операторов БПЛА в Китае в последние годы тоже растет. Так, их число в 2019 г. было на уровне 67,2 тыс., а в данный момент превышает 150 тыс. На рис. 1.7 [174] представлена структура доходов рынка гражданских дронов в разрезе различных сегментов.

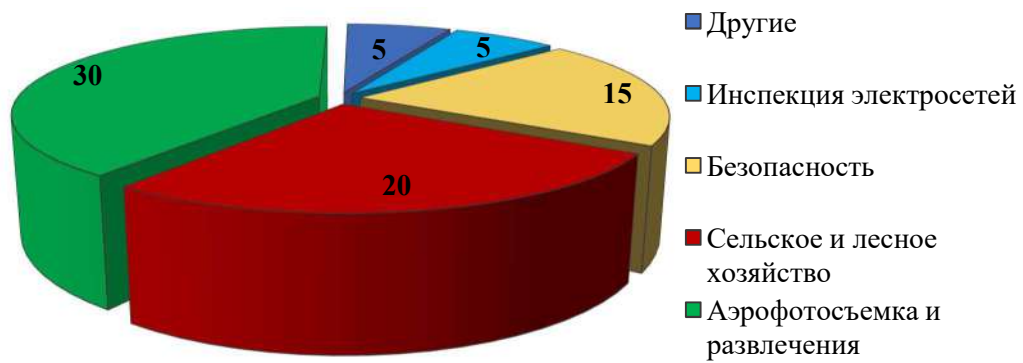


Рисунок 1.7 – Структура доходов рынка гражданских дронов в Китае, млрд. юаней

Китайский производитель DJI в настоящее время занимает примерно 70% мирового рынка дронов гражданского назначения. На рынке также есть и другие крупные поставщики, например, разработчик агродронов XAG, но они ограничены определенными областями применения и пока не могут приблизиться по размеру к DJI. В числе крупнейших производителей БПЛА в военной сфере – компании Aerospace CH UAV, дочка китайской государственная ракетно-космической корпорации (CASC), Guizhou Guihang и Шэньянская авиастроительная корпорация.

Китай лидирует на мировом рынке БПЛА во многом благодаря развитой внутри страны научно-технической и производственной базе, мощной государственной поддержке и отсутствию регуляторных барьеров. Например, недавно китайская eHang первой в мире получила сертификат на производство электрического БПЛА с вертикальным взлетом и посадкой. Китай агрессивно защищает своих производителей. Например, с сентября 2024 года в стране ограничили экспорт дронов и комплектующих для них, включая ряд двигателей для дронов, лазеры, оборудование связи и системы защиты от БПЛА.

Еще одна причина мирового лидерства Китая – активное развитие инфраструктуры в городах. Так, в одном только Шэньчжэне в 2023 г. было открыто 77 новых маршрутов для БПЛА, а их общее число выросло до 156. В прошлом году в городе было совершено около 610 тыс. грузовых рейсов с использованием дронов (рекорд для Китая).

Россия

На сегодняшний день есть три сценария развития рынка:

1. Инерционный сценарий: рынок будет расти за счёт роста цен и госзакупок, в этом случае к 2030 году объём рынка составит 65,7 миллиардов рублей.
2. Умеренный: появится законодательное и технологическое решение для интеграции беспилотных летательных аппаратов в транспортную сферу, возникновение федеральных и региональных операторов, в этом случае к 2030 году объём рынка составит 136,9 миллиардов рублей.
3. Оптимистичный: реализация национального проекта БАС, стимулирование спроса и налаживание серийного производства комплектующих, в этом случае к 2030 году объём рынка составит 408 миллиардов рублей.

Прогнозируется такое распределение применения беспилотных летательных аппаратов по отраслям к 2030 году: 22% – логистика и транспорт; 21% – строительство; 20% – сельское хозяйство; 15% – геологоразведка и добыча полезных ископаемых; 9% – инфраструктура; 15% – прочее.

Российские БПЛА Supercam закупает ряд стран: Пакистан, Нигерия, Ангола, Республика Беларусь, Казахстан и Узбекистан. Однако основными заказчиками остаются Армия России и другие силовые структуры.

1.2 Варианты управления БАС

Концепция управления воздушным движением БАС (UTM) была впервые предложена в 2016 году членами государственных научно-исследовательских организаций и представителями промышленности для поддержки организации, координации и управления полетами БАС в режиме реального времени или в режиме, близком к реальному времени, включая возможность проведения нескольких полетов за пределами прямой видимости (BVLOS) [175].

Разработка структуры UTM включает технологические и процедурные аспекты, которые можно сгруппировать в три области:

1. Технологические аспекты, связанные с транспортными средствами и наземными технологиями, обеспечивающими работу БАС.
2. Правила проведения полетов дронов в гражданском воздушном пространстве, особенно в случаях, когда возможен конфликт с обычным воздушным движением.
3. Четкая цепочка ролей и обязанностей для обеспечения безопасного проведения полетов БАС [176].

Целью UTM является надежное, экономичное и эффективное управление полетами БАС посредством предоставления средств и комплексного набора услуг в сотрудничестве со всеми сторонами и с участием воздушных и наземных служб. Как уже отмечалось в предыдущем параграфе, развивающийся сектор БАС открывает много возможностей, но для полной интеграции БАС должны сосуществовать с беспилотными воздушными судами и существующими авиационными системами в рамках ограниченных ресурсов воздушного пространства. При этом безопасность должна быть на первом месте, и оба сектора должны иметь возможность сотрудничать для взаимной выгоды, избегая при этом нежелательного воздействия на существующих пользователей воздушного пространства или его возможности. Чтобы обеспечить достижение этой цели технологии, используемые для поддержки UTM, не должны непреднамеренно ухудшать работу систем управления воздушным движением (например, перегрузка частотного спектра или создание помех) [177].

Предполагается, что с помощью UTM органы гражданской авиации и поставщики аэронавигационных услуг, в той мере, в которой они участвуют в этом процессе, смогут предоставлять операторам БАС и их операторам в режиме реального времени информацию [178] об ограничениях воздушного пространства и намерениях других воздушных судов, доступную непосредственно или через поставщика услуг UTM. Основным средством связи и координации между поставщиками аэронавигационных услуг, поставщиками дополнительных данных, операторами БПЛА и другими заинтересованными

сторонами может быть распределенная сеть высокоавтоматизированных систем через интерфейсы прикладного программирования (API), а не голосовая связь между пилотами и диспетчерами воздушного движения [179]. Рассмотрим подробнее основные из существующих на сегодняшний день вариантов взаимодействия операторов и БАС.

Прежде всего, опираясь на классификацию воздушного пространства, разработанную для пилотируемой авиации, выделяют:

- взаимодействие оператора и БАС по прямому радиоканалу (VLOS);
- загоризонтное взаимодействие (управление) (BVLOS);
- взаимодействие (управление) на расширенной линии визуального обзора (EVLOS).

Рисунок 1.8 [180] отражает особенности и отличия выделенных подходов.

Пилотирование по прямому радиоканалу (VLOS)

Согласно Международной организации гражданской авиации (ИКАО), VLOS – это прямая линия, вдоль которой удаленный оператор имеет четкий обзор БАС². Таким образом, можно отметить, что взаимодействие оператора и БПЛА на базе VLOS предполагает взаимодействие, при котором оператор или наблюдатель постоянно поддерживает прямой визуальный контакт с летательным аппаратом, обеспечивая безопасный и эффективный контроль. Максимальное расстояние от оператора до БАС, на котором могут безоговорочно выполняться требования безопасности, зависит от ряда факторов и может меняться от полета к полету. При эксплуатации в открытой категории или в соответствии с условиями разрешения на эксплуатацию для конкретной категории, БАС должен использоваться в пределах прямой видимости оператора.

² Unmanned Aircraft Systems Traffic Management (UTM) – A Common Framework with Core Principles for Global Harmonization. Edition 3. 2023. 45 p.

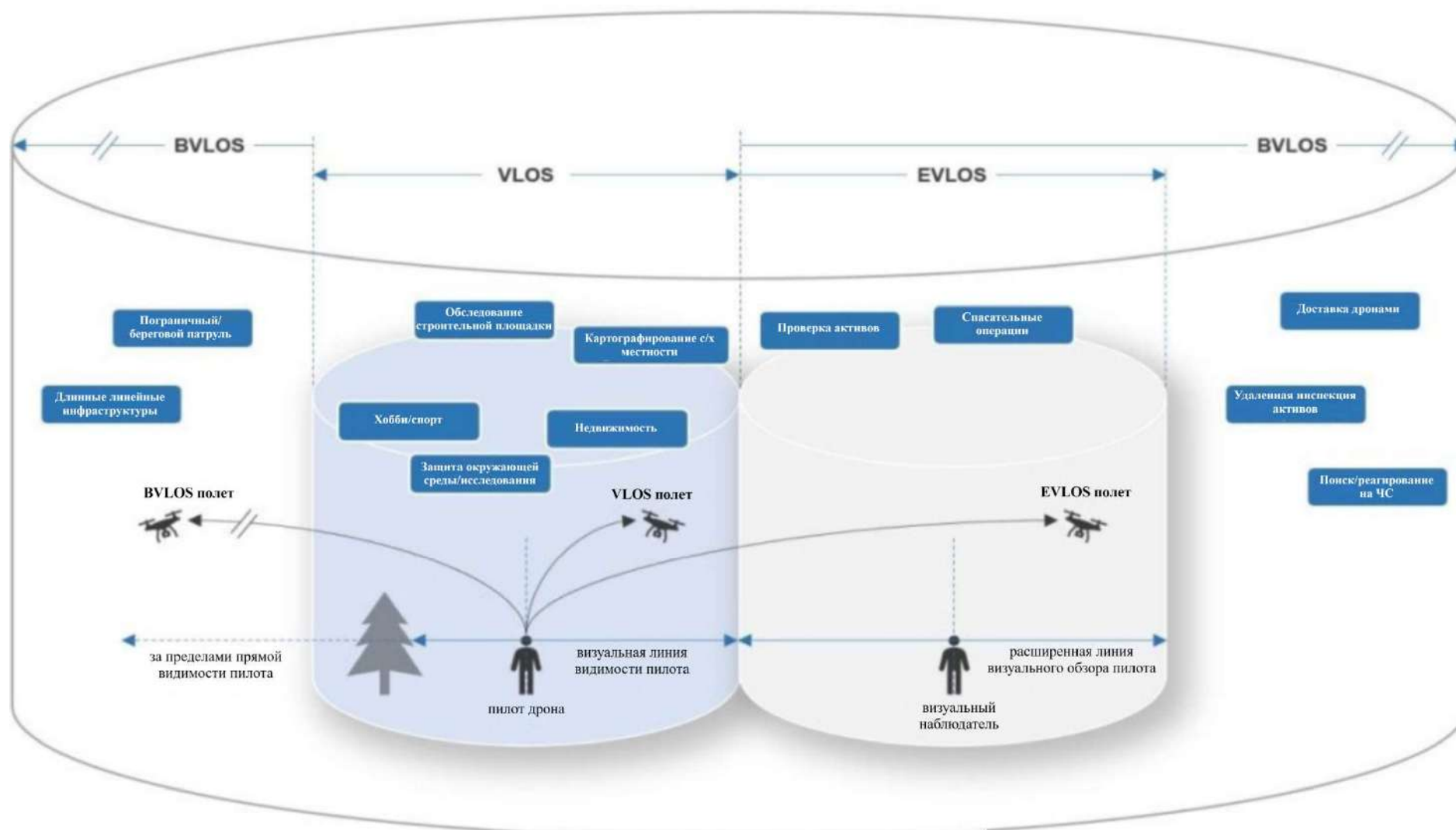


Рисунок 1.8 – Схемы взаимодействия оператора и беспилотных систем на основе классификации воздушного пространства

Применение VLOS имеет решающее значение в процессе управления по нескольким причинам.

Во-первых, это обеспечивает оператору полный контроль над дроном и позволяет быстро реагировать на любые потенциальные опасности.

Во-вторых, VLOS помогает предотвратить столкновения с другими летательными аппаратами, зданиями или людьми на земле.

В-третьих, следя за дроном, оператор может лучше оценивать его высоту, скорость и ориентацию. Это позволяет делать более качественные кадры или выполнять задания более эффективно.

Как уже отмечалось ранее, максимальное расстояние VLOS варьируется для каждой операции и зависит от следующих факторов:

1. Размер воздушного судна (и его «видимость»).
2. Любое освещение на борту БАС, помогающее в ориентации и навигации.
3. Погодные условия (туман, солнечный блик и т.д.).
4. Зрение оператора.
5. Рельеф местности и препятствия, которые могут заслонить обзор между оператором и БАС.

После тщательного рассмотрения вышеуказанных рекомендаций оператор должен самостоятельно определить максимальное горизонтальное расстояние, на котором можно безопасно поддерживать визуальный контакт с БАС без вспомогательных средств.

Операции в открытой категории на сегодняшний день, согласно Директивам ЕС, ограничены максимальным расстоянием 400 футов = 120 метров от ближайшей точки поверхности земли. При этом следует отметить, что это не «вертикальная высота», а расстояние между БАС и ближайшей точкой на поверхности земли (см. рис. 1.9).

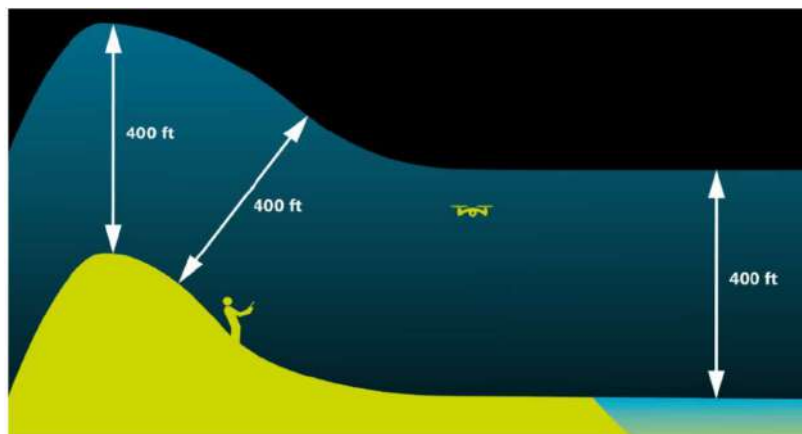


Рисунок 1.9 – Расстояние от поверхности земли: 400 футов (120 м) для взаимодействия оператора и беспилотной системы на основе VLOS³

Регламент (ЕС) 2019/947 UAS.OPEN.010 также содержит два дополнительных положения о высоте:

1. Для БАС, летающих на высоте до 15 м выше «искусственного препятствия», если высота этого препятствия превышает 105 м, а БАС находится на расстоянии не более 50 м от него.

2. Беспилотные планеры должны летать на высоте более 120 м над поверхностью земли, при условии, что они не летают выше 120 м над оператором.

Это ограничение высоты предназначено для снижения риска столкновения с пилотируемым воздушным судном. Хотя другие воздушные суда могут летать ниже этой высоты, подавляющее большинство летает на более высоких уровнях.

Сравнение российских норм с европейскими относительно использования VLOS для взаимодействия оператора и беспилотной системы представлено в таблице 1.1.

³ Great Britain. Civil Aviation Authority. Safety and Airspace Regulation Group, issuing body. Unmanned Aircraft System Operations in UK Airspace - Guidance (6th Edition). 6th edition. Norwich: TSO The Stationery Office, 2015. 186 p.

Таблица 1.1 – Сравнение российских и европейских требований управления с использованием прямого радиоканала⁴

Параметр	ЕС (EASA)	Россия
Максимальная высота	120 м без разрешения	150 м (по ФАП-155, п. 12)
Дальность взаимодействия оператора и беспилотной системы	Ограничена визуальной видимостью	Ограничена VLOS, но может достигать 2–5 км технически
За пределами видимости	Требуется специальное разрешение	Требуется разрешение от Росавиации

Можно выделить ряд технологических средств, которые позволяют оператору эффективно взаимодействовать с БПЛА с использованием прямого радиоканала.

FPV: технология First-Person View (FPV) позволяет видеть то, что видит дрон, в режиме реального времени с помощью камеры, установленной на дроне, монитора или очков. Это является инструментом для поддержания ситуационной осведомленности и удержания дрона в пределах VLOS.

Бинокль: хотя это и не технологическое средство в традиционном смысле, хороший бинокль дает возможность поддерживать визуальный контакт с дроном на больших расстояниях. Это может быть особенно полезно в районах с препятствиями или плохой видимостью.

Камеры: помимо камеры, используемой для FPV, многие дроны оснащены дополнительными видеорегистраторами, которые можно использовать для съемки высококачественных фотографий и видео. Они могут быть полезны для осмотра инфраструктуры, наблюдения за дикой природой.

Датчики: многие дроны оснащены датчиками, такими как GPS, высотомеры и системы обхода препятствий. Они могут помочь обеспечить безопасный и стабильный полет даже в сложных условиях.

ADS-B: технология автоматического зависимого наблюдения предназначена для передачи дроном своего местоположения и прочей

⁴ Составлено автором

информации другим воздушным судам и службе управления воздушным движением. Это дает возможность предотвратить столкновения и обеспечивает безопасную интеграцию в воздушное пространство.

Наземная станция: это специальный центр управления дроном, позволяющий отслеживать параметры его полета и контролировать движения с большей точностью.

Очевидно, что при использовании VLOS для взаимодействия оператора с беспилотной системой, равно как и для других способов управления, важным элементом является поддержка надежной связи между оператором/диспетчером и БПЛА. Сотовые сети являются естественными кандидатами для обеспечения не только этой связи, известной как CNPC (связь управления и не связанная с полезной нагрузкой) или C2 (связь и управление), но и для передачи данных для таких приложений, как прямая трансляция или показания датчиков.

В таблице 1.2 на основе изучения научных публикаций и экспертных отчетов систематизированы технические характеристики VLOS радиоканала.

Таблица 1.2 – Технические характеристики VLOS радиоканала⁵

Параметр	Типичные значения / особенности
Частотный диапазон	433 МГц, 868 МГц, 900 МГц, 2.4 ГГц, 5.8 ГГц (в зависимости от региона)
Модуляция	GFSK (частотная), DSSS, OFDM, QPSK
Передаваемая мощность (EIRP)	до 100 мВт (20 dBm) на 2.4 ГГц (в ЕС/РФ), до 1 Вт (30 dBm) при наличии специального разрешения
Тип антенн	Вертикальная всенаправленная антенна или направленная
Радиус действия (реальный)	500 м – 5 км (в зависимости от частоты, антенн, условий местности)
Полоса пропускания	100 кГц – 20 МГц
Скорость передачи данных	9.6 кбит/с – 54 Мбит/с (зависит от стандарта и полосы)
Тип протокола	RC (proprietary), MAVLink, SBUS, LRS (long range system), Wi-Fi, Ethernet
Задержка (латентность)	5–100 мс (в зависимости от протокола и нагрузки)
Тип канала	Односторонний или двусторонний (отправка и загрузка)

⁵ Составлено автором

Пилотирование на расширенной линии визуального обзора (EVLOS)

EVLOS (расширенная визуальная линия видимости). Это относится к операциям с использованием дронов, где оператор поддерживает визуальный контакт с дроном косвенно, посредством использования наблюдателей, находящихся в различных точках вдоль траектории полета, расширяя рабочий диапазон за пределы прямой линии видимости [181]. Данный инструмент взаимодействия оператора и беспилотной системы заполняет пробел между операциями VLOS и BVLOS, позволяя проводить расширенные миссии, но сохраняя при этом компонент визуального контроля. Этот режим работы увеличивает зону покрытия и эксплуатационную эффективность, что делает его ценным для отраслей, которым необходимо обследовать большие участки земли или протяженные инфраструктуры, такие как трубопроводы и линии электропередач.

Нормативные требования к операциям EVLOS могут различаться, но обычно они подразумевают наличие достаточного количества подготовленных визуальных наблюдателей для охвата всей траектории полета. Наблюдатели должны иметь возможность общаться с оператором в режиме реального времени и предупреждать его о любых потенциальных опасностях.

Стандартные требования EVLOS предполагают, что оператор или визуальные наблюдатели имеют прямую видимость БПЛА без использования каких-либо средств, таких как бинокли, для улучшения зрения. Однако иногда регулирующие органы разрешают операции, в которых это требование изменяется, и визуальные наблюдатели используют такие технологии, как бинокли, телескопы, очки ночного видения или зум-объективы, чтобы наблюдать за БПЛА и воздушным пространством на гораздо большем расстоянии, чем это возможно с помощью одного только зрения человека [182]. Этот режим называется EVLOS+. Для обоснования эксплуатации EVLOS+ необходимо, чтобы в БПЛА были встроены некоторые системы обнаружения и предотвращения столкновений, поскольку использование биноклей ограничивает поле зрения, а увеличение означает, что в любой момент времени

наблюдаются меньшие участки воздушного пространства. Однако уровень сложности технологий систем обнаружения и предотвращения столкновений может быть значительно ниже, чем для полетов BVLOS, поскольку обычные правила VFR (визуальное обнаружение, обнаружение и предотвращение столкновений) в значительной степени могут быть выполнены обычным способом (т. е. визуальным сканированием) в режиме EVLOS+.

В таблице 1.3 представлены систематизированные технические характеристики EVLOS систем для взаимодействия оператора с беспилотной системой.

Таблица 1.3 – Характеристики EVLOS систем

Параметр	Типичные значения / примечания
Дальность полёта	5–15 км (в зависимости от высоты, антенн и условий местности)
Частотный диапазон	433 МГц, 868 МГц, 902–928 МГц, 2.4 ГГц, 5.8 ГГц (в странах, разрешающих EVLOS)
Мощность передатчика (EIRP)	до 30 dBm (1 Вт) при использовании лицензированных диапазонов
Тип антенн	Всенаправленные или направленные, в т.ч. на ретрансляторе
Протоколы связи	MAVLink, LTE telemetry bridge, LRS (Long Range Systems), Wi-Fi, Ethernet over RF
Тип связи C2	Отправка и загрузка с контролем отказов и перекрытием канала (failover)
Время задержки	от 10 до 100 мс (зависит от протокола и качества сигнала)
Надёжность канала	> 99.5% при LOS и ретрансляции с резервом
Доступность канала	От 95% в равнинной местности до 99% при использовании воздушного ретранслятора
Уровень сигнала RSSI	от -50 до -90 dBm на приёмнике (в зависимости от расстояния и полосы)
Качество канала (SNR)	Не ниже 10–20 dB для надёжной телеметрии

Загоризонтное управление (BVLOS)

Эксплуатация БАС за пределами расстояния, на котором оператор может реагировать на других пользователей воздушного пространства или избегать их с помощью прямых визуальных средств (т.е. наблюдение оператором за БПЛА), считается эксплуатацией при загоризонтном управлении – BVLOS.

Загоризонтное управление предполагает необходимость выполнения следующих требований и наличия соответствующих технологий.

1. Техническая способность, признанная как минимум эквивалентной

способности оператора летательного аппарата «видеть и избегать» потенциальные конфликты. Это называется способностью обнаружения и уклонения (DAA). Во время полетов дронов BVLOS система DAA позволяет операторам дронов автоматически или автономно обнаруживать и обходить препятствия, такие как другие летательные аппараты. DAA использует датчики, например, радиолокационные, акустические и оптические, чтобы обеспечить безопасное расстояние между БПЛА и любыми препятствиями, встречающимися в воздушном пространстве [183]. Она может опираться на наземную инфраструктуру, такую как радиолокационные системы, для улучшения ситуационной осведомленности, навигации и безопасности полетов. Наземные внешние радары могут дополнять ограничения бортовых датчиков дронов при полетах BVLOS.

Дроны также могут быть оснащены интегрированными технологиями, такими как ADS-B, которая передает информацию, включая скорость, направление полета, положение дрона (ориентацию по горизонту) и высоту (вертикальную высоту). Пилоты также могут изменять параметры полета и управлять датчиками для сбора данных. Кроме того, дроны могут быть оснащены другими технологиями, такими как транспондер MODE-S, FLARM, радары и прочие устройства, которые полезны для выполнения миссии и передачи данных в общую систему DAA.

Современные системы DAA включают:

- радиолокационное обнаружение;
- оптические датчики и компьютерное зрение;
- акустические системы обнаружения;
- ADS-B транспондеры и приемники;
- возможность удаленной идентификации.

2. Оперативные меры по уменьшению вероятности столкновения, которые снижают риск сближения с другим воздушным судном до приемлемого уровня и могут быть реализованы либо путем разделения

воздушного пространства, либо с помощью другого подходящего метода обеспечения такого разделения.

3. Наличие надежных коммуникационных технологий. Для полетов BVLOS операторы должны располагать надежной радиосвязью с БПЛА, чтобы иметь возможность записывать важные данные, касающиеся безопасности и иметь средства связи с центром управления воздушным движением для доступа в воздушное пространство.

Традиционно для управления и передачи сигналов при использовании дронов использовалась одноканальная связь – прямая видимость между точками или коммерческая сеть. Однако, такая конфигурация не подходит для районов с препятствиями, потерей сигнала, потенциальными помехами или перегрузками, а также для обширных удаленных территорий [184]. Миссии BVLOS требуют «надежности связи» – т.е. уровня, который может быть достигнут только за счет высокой доступности, гарантированной избыточности и безопасности. Кроме того, для коммерческих дронов эти требования должны быть реализованы в компактном форм-факторе (размер, вес и мощность), который соответствует их размерам и ограничениям по мощности.

В данном контексте эксперты рекомендуют использовать многоканальный подход, который преодолевает ограничение, связанное с наличием единственной точки отказа, путем объединения различных каналов связи, таких как сотовые сети, спутниковая связь и радиосвязь «точка-точка», в единое и отказоустойчивое соединение. Мультилинковая платформа связи может использовать различные сети и спектры, такие как:

1. Публичная сотовая инфраструктура (LTE/LTE adv и 5G/IMT-2020) нескольких операторов и частотных диапазонов.
2. Частные тактические сети, такие как 5G.MIL.
3. Сети Mesh Software-Defined Radio (SDR).
4. Радиостанции P2P с большим радиусом действия для связи с низкой скоростью передачи данных.
5. Спутники LEO SAT (низкая околоземная орбита) / GEO SAT

(геостационарная орбита), которые обеспечивают связь за пределами зоны покрытия сотовой связи, например Viasat, Ямал, Экспресс (GEO), Iridium и Starlink, Рассвет (LEO).

6. Новые технологии, такие как LTE/5G через спутники LEO. Они открывают новые возможности для каналов связи, технологий и резервирования частот.

Например, при управлении на территории США платформа связи Halo BVLOS от Elsieht может использовать обширное покрытие сотовой сети 5G T-Mobile, сети LTE Verizon, сети AT&T и спутниковой связи. Эта универсальность может быть еще более расширена за счет добавления связи SDR (программно-определяемое радио) «точка-точка» [185]. Общие характеристики многоканальной связи для BVLOS приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Характеристики многоканальной связи для BVLOS⁶

Параметр	Значение / Диапазон
Количество каналов (uplink + downlink)	2–4 (основной канал + резервные или параллельные для телеметрии/видео)
Частотные диапазоны	433/868 МГц, 900 МГц, 1.3 ГГц, 2.4 ГГц, 5.8 ГГц, LTE (800/1800/2600 МГц), 5G
Типы каналов	RF-телеметрия, видео (аналог/цифра), LTE/5G, спутниковый (SATCOM), mesh-сети, IP-over-RF
Режим связи	Полудуплексный / Полнодуплексный / Мультиплексирование с временным разделением
Устойчивость связи (link availability)	>99.9% при многоканальном резервировании и динамическом переключении
Failover (автоматическое переключение)	< 500 мс между каналами при потере основного
Пропускная способность	От 9.6 кбит/с (телеметрия RF) до 10 Мбит/с (LTE/5G видео и команды взаимодействия оператора)
Задержка	10–50 мс (RF), 50–150 мс (LTE), 500–2000 мс (SATCOM)
Методы повышения надёжности	Частотное и пространственное разнесение, повторение пакетов, автоматическая коррекция ошибок
Шифрование/аутентификация	AES-128/256, VPN, IPsec, HTTPS, аутентификация по токenu или сертификату
Протоколы передачи данных	MAVLink, MicroRTPS, TCP/IP, UDP, RTP, QUIC
Типы антенн	Направленные, всенаправленные (омни), фазированные решётки
Контроль качества канала (QoS)	Приоритизация C2, телеметрии, видео (например, TOS или DSCP метки в IP)

⁶ Составлено автором

7. Геозонирование – это программная технология, которая создает виртуальные границы вокруг определенных географических областей. Эти границы могут быть интегрированы в систему дрона, чтобы автоматически предотвратить его вход в зоны, запрещенные для полетов. Это имеет решающее значение для операций BVLOS.

8. Инструменты для контроля воздушного пространства. Данный инструмент предоставляет информацию в режиме реального времени об окружающем воздушном пространстве, включая сведения об активном воздушном движении, ограниченном воздушном пространстве, временных запретных зонах, погодных условиях и другую соответствующую информацию о полете.

9. Удаленный идентификатор. Это система вещания, которая передает идентификационные данные и местоположение дрона в полете в режиме реального времени. Передаваемая информация может приниматься органами управления воздушным пространством, правоохранительными органами и другими заинтересованными сторонами отрасли. Это актуально для полетов BVLOS, поскольку поможет предотвратить столкновения в воздухе и несанкционированный вход в воздушное пространство. Однако следует отметить, что по состоянию на ноябрь 2024 года приложения и интерфейсы, поддерживающие эту систему вещания, находятся на не очень продвинутой стадии разработки. Дальность действия устройств в настоящее время ограничена 1 км из-за ограничений Bluetooth и WiFi, это означает, что дроны, летающие в режиме BVLOS, не могут передавать или обнаруживать сигналы на больших расстояниях [186].

Альтернативным вариантом в данном случае является сетевая удаленная идентификация – процесс идентификации, который подключает дроны к Интернету с помощью приложения или напрямую через станцию взаимодействия оператора и беспилотной системы оператора. Он позволяет идентифицировать данные дрона через онлайн-систему. Сетевая идентификация требуется в воздушном пространстве и может использоваться в

центрах управления, удаленных от места проведения операции, что открывает больше возможностей для миссий BVLOS.

Обобщая вышеизложенный материал, в таблице 1.5 приведена сравнительная характеристика технологий взаимодействия (управления) оператора с БПЛА с использованием различных полётных режимов по условиям визуального контакта.

Таблица 1.5 – Преимущества и недостатки VLOS, EVLOS и BVLOS

Тип	Преимущества	Недостатки
VLOS	Простота во взаимодействии, так как оператор видит дрон во время полета, и взаимодействие может осуществляться напрямую	Ограниченный радиус действия, так как дрон должен постоянно находиться в поле зрения, даже в пасмурную, туманную или снежную погоду.
EVLOS	Большая гибкость в выборе траектории полета. Оператор на большом расстоянии от БПЛА может с ним взаимодействовать, так как есть наблюдатель, который корректирует траекторию полета дрона.	Требует большего количества персонала. Необходим обученный наблюдатель, который будет постоянно следить за дроном, что может увеличить эксплуатационные расходы.
BVLOS	Возможность взаимодействовать с дроном на большей высоте, чем VLOS и EVLOS, так как оператор полагается на технологию, которая обеспечивает соблюдение требований безопасности в процессе полета	Требуется специальная подготовка оператора, чтобы он мог безопасно использовать доступные технологии. Перед началом эксплуатации БПЛА необходимо получить специальное разрешение от соответствующего авиационного органа.

Отдельного внимания в контексте рассматриваемой проблематики заслуживают *системы управления и контроля (C2)*, которые являются краеугольным камнем эффективных операций по управлению БПЛА, включая дроны, дистанционно-пилотируемые авиационные системы RPAS (*аббр. от англ. Remotely Piloted Aircraft Systems*), беспилотные наземные транспортные средства UGV (*аббр. от англ. Unmanned Ground Vehicle*) и беспилотные надводные транспортные средства USV (*аббр. от англ. Unmanned Surface Vehicle*). Эти системы обеспечивают точное управление, обмен данными в режиме реального времени и ситуационную осведомленность, позволяя операторам выполнять сложные задачи в оборонной, промышленной и научной областях.

В общем понимании C2 – это канал связи, который связывает

беспилотную систему с её беспилотным контроллером. Этот канал позволяет передавать данные в обоих направлениях, что облегчает работу в режиме реального времени и обратную связь. Например, по линии C2 оператор может передавать команды БПЛА, в то время как сам аппарат обеспечивает обратную связь, отправляя телеметрию, видеопоток и данные с бортовых сенсоров [187].

Сферы применения C2 во взаимодействии оператора с беспилотной системой включают в себя:

1. Передача данных полезной нагрузки – для передачи данных и видео с БПЛА удаленному оператору/оператору.
2. Электронная заметность – технология, позволяющая другим пользователям воздушного пространства узнавать о местоположении и траектории полета БПЛА.
3. Обнаружение и уклонение – способность БПЛА уклоняться от объектов или других воздушных судов на уровне, по крайней мере, эквивалентном принципу «видеть и уклоняться» в пилотируемой авиации.
4. Связь, навигация и наблюдение – в зависимости от воздушного пространства, в котором летает БПЛА, а также от возможностей других систем БАС, диспетчеры воздушного движения могут нуждаться в поддержании наблюдения и контроля за полетом.

Любая система, предназначенная для предоставления таких услуг связи, должна учитывать два аспекта, чтобы быть приемлемой для авиационного сообщества и регулирующих органов.

Во-первых, она должна использовать общий вероятностный подход к требованиям, основанным на эксплуатационных характеристиках, одобренный ИКАО. Для системы управления и контроля БАС этот подход отражен в стандартах RTCA (DO-377A и последующие версии).

Во-вторых, должна существовать организация, ответственная не только за проектирование и развертывание системы, но и за обеспечение постоянного оперативного мониторинга и соблюдения соглашений об уровне обслуживания.

C2 для управления дронами может использовать различные технологии

связи. Обычно дроны с прямой видимостью (LOS) используют для связи C2 радиочастотный (RF) канал, такой как UHF или VHF, а дроны с очень коротким радиусом действия могут использовать беспроводные технологии Wi-Fi или Bluetooth. Также свое применение находят услуги сотовой связи, такие как 3G, 4G и 5G, но их полезность может быть ограничена из-за «мёртвых зон» на территории покрытия сотовой связи. Дроны, выходящие за пределы прямой видимости в большинстве своем применяют для связи C2 какую-либо форму спутниковой связи (SATCOM), такую как Inmarsat или Iridium (см. рис. 1.10 [188]).



Рисунок 1.10 – Виды C2 связи для разных сфер приложения

Как известно технологии искусственного интеллекта революционизируют многие сферы, свой вклад они внесли и в системы управления и контроля (C2) при взаимодействии оператора и БПЛА.

Процессы C2 на базе ИИ позволяют анализировать данные и принимать решения в режиме реального времени, что обеспечивает более оперативное и адаптивное планирование, а также выполнение миссий БАС.

Последние разработки включают.

1. Автономная навигация и наведение: ИИ улучшает автономную навигацию военных БАС, анализируя данные с различных датчиков для понимания сложных сред. Это позволяет БАС функционировать в условиях, когда GPS и связь ненадежны. Например, программное обеспечение Hivemind от Shield AI дает возможность дронам автономно перемещаться в сложных

условиях, помогая в разведывательных миссиях [189].

Дроны на базе ИИ могут обрабатывать огромные объёмы данных с датчиков для обнаружения закономерностей и аномалий, что облегчает быструю оценку угроз и реагирование на них. Интеграция ИИ в БАС улучшает процессы принятия решений, ситуационную осведомлённость и оперативную эффективность.

2. Адаптивное планирование миссий: ИИ позволяет дронам динамически корректировать параметры миссии в ответ на изменения в режиме реального времени. Это включает в себя корректировку маршрута для уклонения от угроз, перераспределение ресурсов и уточнение целей в соответствии с меняющимися задачами миссии.

Технологии ИИ также предлагают эффективное решение для случая, если дрон потеряет связь с С2. Потеря связи С2 может привести к тому, что оператор больше не сможет управлять полетом БПЛА. Это известная уязвимость современных радиосвязи, и благодаря ИИ в настоящее время можно использовать следующие методы для смягчения последствий и управления дроном в случае, если это произойдет.

1. Избыточность каналов связи

2. Режимы отказоустойчивости, автоматически запускаемые при потере сигнала С2, без необходимости вмешательства человека. Как правило, БПЛА выполняют одно из трех действий: возвращаются в исходную точку (RTH), зависают на месте, приземляются или выполняют комбинацию этих действий.

3. Антипомеховое оборудование на борту.

Таким образом, технологические достижения в области каналов связи, обработки данных в режиме реального времени и проектирования пользовательского интерфейса продолжают расширять возможности систем С2 для взаимодействия оператора с беспилотной системой, делая их более надежными, интуитивно понятными и безопасными. Но в тоже время, обеспечение безопасной и надежной связи, управление сложными миссиями и интеграция с другими системами являются проблемами для систем С2, которые

пока еще не решены.

Отдельного внимания заслуживают вопросы регулирования С2 в России. Изучение действующих нормативно-правовых документов позволяет отметить, что задачи регулирования систем управления и контроля в России заключаются в установлении нормативных требований к каналам управления, безопасности, сертификации, использованию частот и интеграции с государственными системами (включая ЭРА-ГЛОНАСС и единое воздушное пространство РФ).

Основные документы, которые затрагивают вопросы регулирования С2 в настоящее время в России включают:

1. Распоряжение Правительства РФ от 21 июня 2023 г. № 1630-р «Об утверждении Стратегии развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года и плана мероприятий по ее реализации». В этом документе непосредственно отмечается о необходимости внедрения системных требований к разработчикам, изготовителям и тем, кто эксплуатирует БАС, а также о решении вопросов интеграции БАС в общее воздушное пространство.

2. Проекты Федеральных авиационных правил (ФАП), разрабатываемые Минтрансом России и Минпромторгом России. Ожидается, что в этих документах будут регламентированы следующие требования:

- порядок организации и обеспечения функционирования линий С2: способы организации связи («прямой» канал, через инфраструктуру поставщика услуг), схемы резервирования;
- требования к характеристикам связи: допустимые задержки, помехоустойчивость;
- порядок действий при потере линии С2 (контроль): информирование органов обслуживания воздушного движения, действия оператора, алгоритмы поведения БАС;
- требования к наземному и бортовому оборудованию: состав, характеристики, контроль состояния;

- порядок оценки состояния и документирования качества обслуживания линии С2.
- требования к криптографической защите линий управления и контроля БАС (планируется утверждение требований к 2025 году);
- требования к оснащению БАС оборудованием связи, навигации, наблюдения и удаленной идентификации.

3. Постановление Правительства РФ от 17.02.2024 №185 «Об установлении экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций и утверждении Программы экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций по эксплуатации беспилотных авиационных систем в г.Иннополис (Республика Татарстан)». В рамках таких экспериментальных правовых режимов на отдельных территориях тестируются и апробируются новые правила и технологии, в том числе касающиеся линий С2 и С3.

Управление через сети с коммутацией пакетов (WiFi, LTE)

Проблемы, с которыми сталкиваются разработчики систем при взаимодействии оператора с БАС в режиме FPV в настоящее время, связаны с: высокой мобильностью БАС, что приводит к прерывистому соединению; динамическим изменениям топологии сети в зависимости от целевого приложения; включением разнородных датчиков Интернета вещей для определения приоритетов сети и стратегий маршрутизации; высокими капитальными затратами и эксплуатационными расходами, связанными с устройствами с интегрированным программным обеспечением [190].

LTE/4G/5G подключение позволяет решить отмеченные проблемы, увеличить дальность действия и обеспечить более надежную связь в районах с покрытием сотовой сети. Управление через сети с коммутацией пакетов обеспечивает программную реализацию сетевых функций контроля за движением БАС, связанных с аппаратными устройствами. Технологии 3GPP 5G, такие как SDN и виртуализация сетевых функций, являются средствами программной реализации для поддержки эффективной связи в сетях БАС. NS

направлено на отделение плоскости взаимодействия оператора и беспилотной системы сетью от функции пересылки с помощью открытых интерфейсов, таких как OpenFlow и OpenDaylight (ODL).

Разделение системы управления полетом между БПЛА и многодоступной периферийной вычислительной системой сети 4G/5G позволяет в режиме реального времени во время выполнения миссии применять методы оптимизации, анализируя все необходимые офлайн-данные (например, зону покрытия, вес оборудования 5G, максимальную дальность полета и т.д.) и онлайн-данные о полете, поступающие с датчиков, встроенных в БФС (например, скорость ветра, высота полета, состояние батареи, расстояние до зарядной базы и т.д.). Такое использование сложных методов оптимизации дает возможность диспетчеру полетов оперативно принимать оптимальные решения при определении плана полета, сводя к минимуму ненужные действия и движения БПЛА, обеспечивая плавный полет в режиме зависания и, следовательно, минимальное потребление энергии. Таким образом, разгрузка обработки в сочетании с применением передовых методов оптимизации снижает интенсивное потребление батареи БАС и позволяет ему выполнять сложные и комплексные планы полета. Фактически, в рамках усилий по стандартизации БАС постепенно интегрируются в сети 5G.

Таким образом, программная сеть с поддержкой 4G/5G хорошо подходит для взаимодействия оператора с беспилотной системой, где связь является спорадической, а узлы БПЛА являются временными, а также когда разнообразные условия не позволяют применять ни одну из существующих моделей оптимизации в автономном режиме.

По результатам исследования в таблице 1.6 представлена сравнительная характеристика рассмотренных вариантов взаимодействия оператора и беспилотной системы.

Таблица 1.6 – Характеристика различных методов взаимодействия оператора с беспилотной системой⁷

Метод ДП	Тип связи / технология	Преимущества	Ограничения	Области применения / Примеры
Прямой радиоканал (VLOS)	RF (433/868/2400 МГц)	Простота, низкая задержка, высокая надёжность на коротких дистанциях	Ограничен прямой видимостью, до 1–2 км, подвержен помехам	Логистика, агро, фото/видео, инспекция
Расширенный радиоканал (EVLOS)	RF + оптическое / ретрансляторы	Расширенный радиус (до 10 км), сохраняется контроль при потере визуального контакта	Требует наземных ретрансляторов или воздушных репитеров, увеличенная сложность системы	Горные районы, сложный рельеф, миссии с далекими точками
Загоризонтное взаимодействие оператора и БАС (BVLOS)	Спутниковая связь (SATCOM)	Глобальный охват, независимость от рельефа	Высокая стоимость, задержка сигнала, требует лицензий и терминалов	Дальние рейсы, разведка, оборона
Линия C2 (Command & Control)	Восходящий канал командного взаимодействия оператора и беспилотной системы и нисходящий канал телеметрической информации	Централизованное взаимодействие оператора и беспилотной системы, надёжность, стандартизация	Требует зарезервированных частот, может быть уязвим к кибератакам	Инфраструктура, ISR, BVLOS
Управление через сети с коммутацией пакетов	Wi-Fi / LTE / 5G	Использует существующую сеть, поддерживает передачу HD-видео, телеметрии	Проблемы с покрытием, задержки, зависимость от операторов связи	Городская доставка, инспекция, Smart City

1.3 Управление от первого лица и требования к нему

По результатам проведенного ранее исследования, можно утверждать, что на сегодняшний день существует три основных фактора, которые затрудняют взаимодействие оператора с беспилотными системами.

Во-первых, пилотам сложно сохранять ситуационную осведомленность

⁷ Составлено автором

из-за ограниченности сенсорной информации. Поскольку оператор физически отделен от БПЛА, ему приходится управлять дроном, опираясь только на визуальную информацию, без возможности получать сведения через вестибулярный, тактильный и слуховой аппараты. Исследование [191] показало, что поддержка сенсорной информации с помощью тактильного интерфейса увеличивает рабочую нагрузку и активность управления по сравнению с ситуацией, когда используется только визуальная информация. Но в тоже время, это эффективно снижает частоту столкновений и обеспечивает стабильность полета. Кроме того, предоставление интегрированной вестибулярной обратной связи с визуальной обратной связью для определения степени вращения дрона полезно для ситуационной осведомленности оператора [192].

Во-вторых, трудности дистанционного взаимодействия возникают из-за несоответствия между точками зрения дрона и оператора. Оператор дрона обычно имеет доступ к точке зрения, которая называется «вид от третьего лица» – TPV, это означает, что оператор управляет дроном, видя его с земли. TPV – это концепции аллоцентрического зрения или внешнего взаимодействия оператора и беспилотной системы [193]. Сложность использования TPV заключается в том, что направление движения дрона не совпадает с ожидаемым направлением со стороны оператора, в результате чего возникает расхождение между предполагаемой траекторией взаимодействия оператора и беспилотной системы и фактическим перемещением аппарата [194]. Например, если дрон находится под углом 90° влево по отношению к направлению движения оператора, как показано на рисунке 13 [190], то БАС будет двигаться влево от оператора, когда оператор перемещает дрон вперед. В этом случае оператор должен управлять дроном, сознательно учитывая его перспективу [195]. Таким образом, если оператор хочет, чтобы дрон двигался прямо вперед, он должен двигать его вправо. Такое ментальное манипулирование вращением является когнитивно сложным и может вызвать ряд сбоев (рис. 1.11). В частности, чем больше угол требуемого ментального поворота, тем хуже рабочие

характеристики дрона [190].

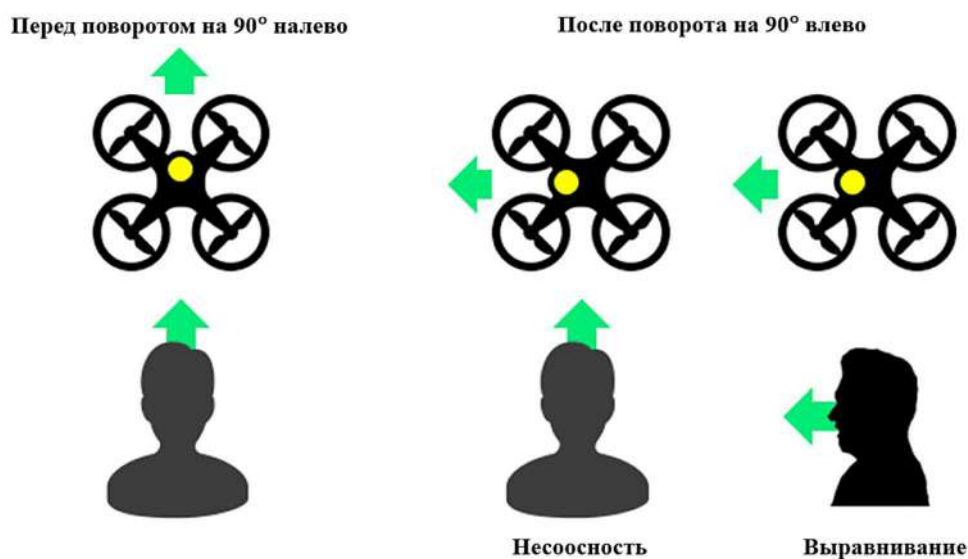


Рисунок 1.11 – Проблема несоосности системы отсчета при управлении дроном

В-третьих, ограниченная маневренность и низкая динамика при стандартном управлении. Бортовые контроллеры обычных БАС активно сглаживают движения, чтобы предотвратить резкие рывки и обеспечить стабильную съёмку. Однако это приводит к задержке между командой оператора и фактической реакцией дрона, делая невозможными быстрые и точные изменения направления или высоты. В результате попытка совершить резкий манёвр может вызвать «конфликт» дрона с собственными системами стабилизации, что влечет за собой неточности управления и потерю контроля. Кроме того, акробатические элементы, такие как перевороты, резкие пики или пролёты через узкие проёмы, практически невыполнимы на стандартных дронах. Их программное обеспечение и механика не рассчитаны на такие нагрузки и требуют полного контроля оператора над каждым углом наклона аппарата.

Обозначенные проблемы могут быть эффективно решены при использовании технологии взаимодействия оператора с дроном с «видом от первого лица» FPV (также известное как видеопилотирование), при котором БАС контролируется дистанционно оператором, полагающимся на видеопоток, передаваемый в режиме реального времени с борта аппарата [196]. FPV-дроны были изобретены в 1999 году, но сам термин FPV был официально введен в

2002-2003 гг.

Краткая сравнительная характеристика FPV технологии с аналогичными подходами к управлению в этом же классе, представлена в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Сравнительный анализ технологий взаимодействия оператора с беспилотной системой на основе режимов операторского восприятия и навигации⁸

Параметр	TPV	FPV	AR-ассистированное взаимодействие оператора и беспилотной системы
Позиция восприятия	Внешний наблюдатель (камера со стороны)	Из кабины дрона (видео от первого лица)	Интерактивная карта/интерфейс в реальном времени
Пространственная ориентация	Сложная, особенно при поворотах и вращении	Естественная, интуитивная	Улучшенная: дополнительные метки, траектории, контурные подсказки
Погрешность взаимодействия оператора и беспилотной системы	Высокая (особенно у неопытных операторов)	Ниже, особенно в манёврах	Минимальная при корректной калибровке
Требования к обучению	Низкие – подходит новичкам, специальные знания не требуются	Средние – требует привыкания к скорости и ориентации	Высокие – требует адаптации к интерфейсу и датчикам
Уровень когнитивной нагрузки	Высокий (нужно «переворачивать» направление мысленно)	Невысокий: соответствие взгляда и взаимодействия оператора и беспилотной системы	Снижается за счёт визуальных подсказок и интеллектуального интерфейса
Точность и безопасность манипуляций	Ограниченная	Высокая при уверенном владении	Наивысшая, особенно при выполнении точных задач (например, осмотр объектов)
Применение в реальных условиях	Редко используется для выполнения реальных заданий, чаще – в обучении	Находит широкое применение в гонках, съёмке, спасательных, военных операциях,	Применяется в инспекциях, медицине, военных и промышленных задачах

В рамках проводимого исследования рассмотрим более детально технологию FPV.

⁸ Составлено автором

В силу новизны технологии, в современной научно-исследовательской среде профессиональные и всесторонние исследования, в которых описывается данная технология, ее особенности, сферы применения, начинают только появляться. В имеющихся публикациях рассматривается широкий спектр вопросов, включая схемотехнику видеопередачи, помехоустойчивость каналов связи, сравнение аналоговых и цифровых протоколов, а также вопросы миниатюризации, энергопотребления и безопасности. Также некоторые авторы уделяют особое внимание ключевым техническим и архитектурным решениям с целью выявления актуальных тенденций и нерешённых проблем в проектировании и эксплуатации систем FPV. Рассмотрим некоторые имеющиеся на сегодняшний день наработки более подробно.

В [197] всесторонне изучаются особенности технологии FPV дронов. В работе детально описывается ее применение на примере решения рекреационных задач, достижения военных целей и наблюдения за порядком. Отдельный акцент сделан на преимуществах, существующих проблемах и будущих тенденциях развития данной технологии. Особого внимания заслуживают результаты описания эволюции FPV дронов и их компонентов.

Режимы полета FPV дронов, которые отличаются от обычных БАС, нашли свое отражение в работах [196, 198]. Эксперты отмечают, что поскольку полеты FPV направлены на предоставление оператору максимального контроля над дроном, поэтому обычно используются только два основных режима полета:

1. Угол/Стабилизация – это режим автоматической стабилизации, в котором команда оператора напрямую передается на положение дрона, и он стабилизируется самостоятельно, если оператор не посылает никаких команд. Другими словами, движение джойстиков пульта дистанционного взаимодействия оператора и беспилотной системы передается на угол, под которым летит дрон, и дрон выравнивается, когда джойстики находятся в центральном положении на пульте.

2. Акробатика/скорость – в этом режиме дрон не стабилизируется, а движение джойстика преобразуется в угловую скорость по соответствующей оси. Движение джойстика пульта дистанционного управления определяет скорость вращения дрона по каждой оси, и при отсутствии команд дрон сохраняет текущий угол, а не стабилизируется.

Отдельный блок исследований посвящен вопросам, связанным с передачей видеопотока, кодированием и снижением задержек [199, 200]. В представленных работах сравнили эффективность видеокодеков AVC/H.264 и HEVC/H.265 при трансляции 4K видео взаимодействия оператора и беспилотной системы и показали, что HEVC/H.265 обеспечивает более высокую производительность и лучшую компрессию, что критично для передачи больших объёмов высококачественного видео. Кроме того, в публикациях описан метод отложенной демозаики, в соответствии с которым видеопоток кодируется форматом Bayer на видеокамере, а окончательное преобразование осуществляется уже на приёмной стороне.

Также отдельным направлением является разработка и исследование антенн, используемых при взаимодействии оператора и беспилотной системы и способы коррекции потерь в канале [201, 202]. В частности, авторы провели обзор антенн (линейной и круговой поляризации) в диапазоне 5,8 ГГц, рекомендованных для FPV, и детально описали адаптивно настраиваемую спиральную антенну для FPV-дронов на основе протокола ExpressLRS.

Итак, основываясь на результатах проведенного анализа, можно отметить, что система FPV состоит из нескольких ключевых компонентов, каждый из которых играет важную роль в ее функционировании:

1) Камера: захватывает видеоизображение высокого разрешения (при использовании цифровых видеосистем) или аналоговый сигнал в режиме реального времени.

2) Передатчик: передает видеосигнал от камеры к приемнику.

3) Приемник: принимает видеосигнал и передает его на дисплей или очки.

4) Дисплей/очки: обеспечивают оператору полное погружение в изображение с камеры в режиме реального времени (рис. 1.12 [203]).



Рисунок 1.12 – Оборудование системы FPV

Конструкция дронов FPV играет решающую роль в их общей производительности и стабильности во время полета. Одним из ключевых факторов является выбор материалов, поскольку легкие и высокопрочные материалы, такие как углеродное волокно, могут значительно улучшить структурную целостность дрона при одновременном снижении веса. Углеродное волокно обладает отличным соотношением прочности и веса, что делает его идеальным материалом для изготовления каркаса, опор и других важных компонентов БАС [204]. Аэродинамика дрона – еще один важный фактор, который необходимо учитывать при его проектировании. Форма и конфигурация дрона могут повлиять на его стабильность и маневренность во время полета. Некоторые исследователи изучили возможность использования закрылков, аналогичных тем, которые применяются в самолетах, для улучшения аэродинамических характеристик дронов FPV [205].

Общая система взаимодействия оператора и дрона представлена на рисунке 1.13 [206]. БАС оснащен камерой в передней части, она снимает и передает видео в режиме реального времени по беспроводной связи на радиостанцию, которая пересылает видео на управляющую станцию. Радиостанция и управляющая станция могут быть размещены в отдельных аппаратных блоках, в которых видеосигнал передается от радиостанции на

станцию оператора через сеть обратной связи и/или Интернет. В качестве альтернативы, радиостанция и станция оператора могут быть расположены в одном физическом устройстве.

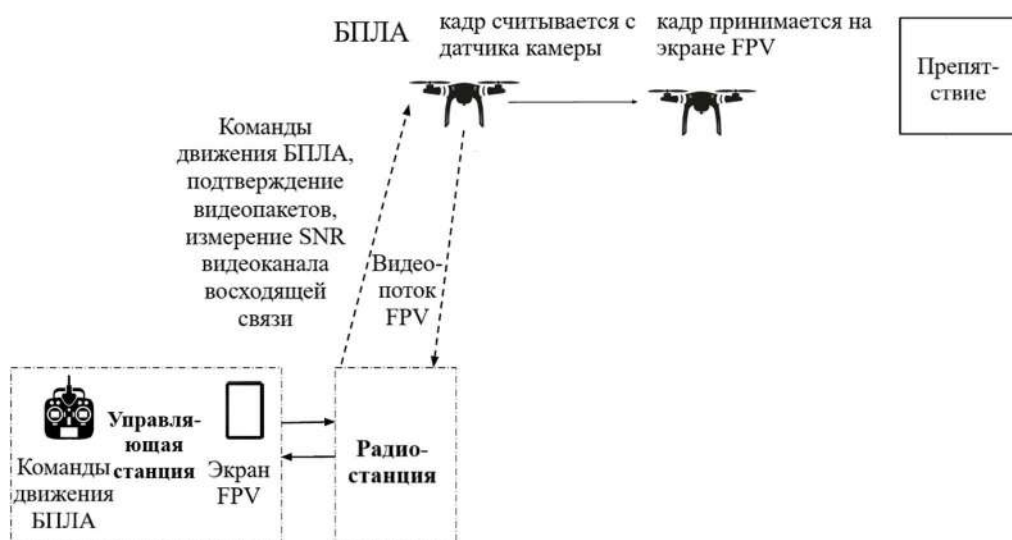


Рисунок 1.13 – Общая система использования и взаимодействия оператора и беспилотной системы FPV-дроном

Станция оператора декодирует, подтверждает и отображает видеоизображение в реальном времени на экране дисплея, который называется экраном FPV. Этот экран FPV может быть экраном на пульте взаимодействия оператора с БАС, отдельным монитором, интеллектуальным устройством или очками FPV (дополненной реальности). Просматривая этот экран FPV, оператор маневрирует БАС по заданному маршруту, посылая команды взаимодействия со стороны управляющей станции для изменения курса, тангажа, крена и тяги. Если оператор вовремя обнаруживает препятствие, он предпринимает меры для предотвращения столкновения (торможение или уклонение).

Соответствующие функциональные компоненты БАС показаны на рисунке 1.14 [207], где поток изображений, снятых камерой БПЛА, обрабатывается модулем оценки глубины, который генерирует карту глубинных пикселей. На основе этой карты глубин рассчитывается расстояние до ближайшего препятствия. Подтверждения получения пакетов и отношение сигнал/шум (SNR) передатчика БПЛА (SNR восходящего канала), измеренные

на радиостанции, отправляются с контрольной станции на дрон. На основе измерений SNR контроллер FPV выбирает подходящую схему модуляции и тем самым определяет скорость передачи, а также коэффициент ошибок пакетов.

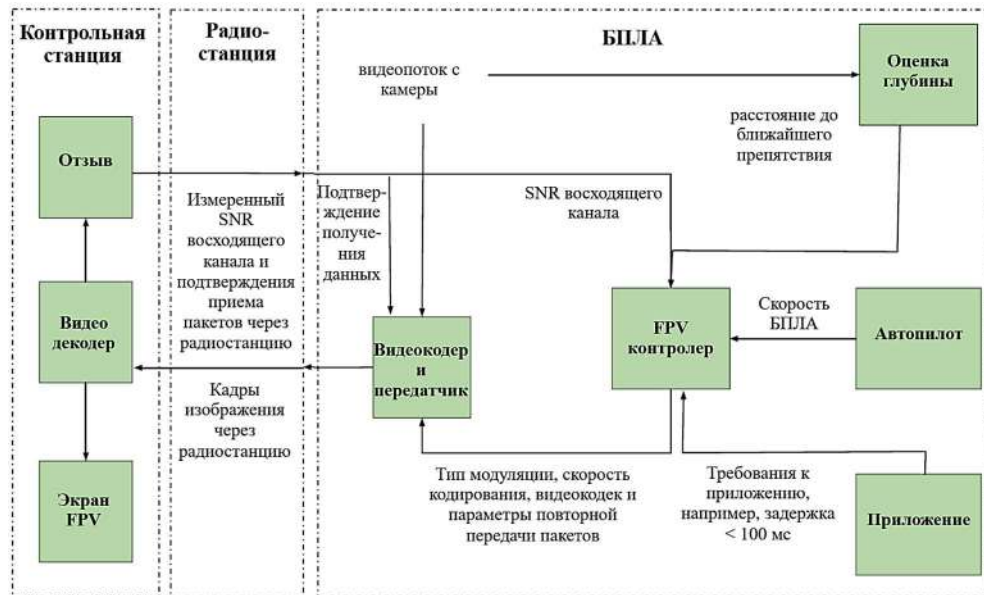


Рисунок 1.14 – Функциональные блоки системы взаимодействия оператора и беспилотной системы FPV-дрон

Передатчик БАС повторно передает неполученные пакеты после истечения интервала ожидания. Контроллер FPV также получает от автопилота оценки скорости и ускорения дрона. Он обрабатывает входные данные вместе с требованиями приложения FPV и определяет разрешение видео и количество попыток повторной передачи для каждого захваченного кадра изображения. Соответственно, блок видеокодера и передатчика обрабатывает и передает эти захваченные кадры на наземную станцию оператора.

Системы FPV используют различные технологии для передачи видео, включая аналоговые и цифровые методы.

1. Аналоговая передача: ранние системы FPV использовали аналоговую передачу видео, которая была менее дорогой, но предлагала более низкое разрешение и была более подвержена помехам.

2. Цифровая передача: современные системы FPV опираются на цифровую передачу видео, которая обеспечивает более высокое разрешение, лучший диапазон и большую надежность. Цифровые системы также

предлагают такие функции, как низкая задержка и высокая частота кадров, что улучшает общее впечатление пользователя.

В таблице 1.8 приведён сравнительный анализ характеристик аналоговых, и цифровых технологий передачи данных, применяемых в системах взаимодействия оператора с БАС с использованием FPV.

Таблица 1.8 – Сравнительный анализ различных технологий передачи видеосигнала в FPV системах БАС⁹

Параметр / Характеристика	Аналоговая передача (NTSC/PAL)	Цифровая радиопередача (DJI OcuSync, HDZero)	Цифровые пакетные сети (Wi-Fi, LTE, IP)
Разрешение видеосигнала	Низкое (до 480p)	Высокое (720p–1080p и выше)	Высокое и адаптивное (до 4K в зависимости от канала)
Задержка сигнала	Минимальная (5–25 мс)	Средняя (28–50 мс)	Более высокая (100–500+ мс), зависит от буферизации
Полоса пропускания	Узкая (до 6 МГц)	Широкая (20–40 МГц и выше)	Зависит от протокола и канала (до 100 МГц и выше)
Стабильность сигнала	Подвержен помехам	Устойчив к помехам, с коррекцией ошибок	Подвержена задержкам, потере пакетов, переменной нагрузке
Диапазон частот	Обычно 5.8 ГГц	5.8 ГГц, 2.4 ГГц, 1.2 ГГц	2.4 ГГц, 5 ГГц, LTE/5G диапазоны
Метод модуляции	Частотная модуляция (FM)	COFDM, QPSK, H.264/H.265	TCP/UDP/IP + RTSP, RTP, RTMP, WebRTC, HLS
Совместимость оборудования	Высокая (кросс-брендовая)	Ограниченная (зависит от производителя)	Высокая (универсальные сетевые протоколы и API)
Качество изображения	Зернистое, нестабильное	Чёткое, цветное, с низким уровнем шума	Зависит от пропускной способности и кодека, может быть адаптивным
Частота кадров	До 30 fps (нестабильно)	30–120 fps	15–60 fps, зависит от условий сети
Масса и энергопотребление	Низкие	Выше, требует DSP/SoC	Высокие (особенно при серверной обработке и передаче в сеть)
Стоимость системы	Относительно низкая	Выше (в 2–4 раза)	Высокая совокупная стоимость (оборудование + инфраструктура)
Функции записи и телеметрии	Требуется внешнего оборудования	Часто встроены	Расширенные функции: облачная запись, потоковая аналитика

В целом, на основании вышеизложенного можно отметить, что передача видеопотока осуществляется с использованием передатчика и приемника,

⁹ Составлено автором

которые могут работать на разных радиочастотах, таких как 900 МГц, 1.2 ГГц, 1.3 ГГц, 2.4 ГГц и 5.8 ГГц. В любительском сегменте наиболее часто используемыми диапазонами являются 2,4 ГГц и 5,8 ГГц.

Аналоговое FPV на 2.4 ГГц.

Данный вид передачи является наименее распространённым. Это связано с низким качеством передачи видео на этой частоте. Картинка на аналоговом 2.4 ГГц часто подвержена размытию и воздействию шумов, в основном из-за большого количества устройств, работающих на этой частоте, таких как мобильные устройства, подключенные Wi-Fi, и даже микроволновые печи. Все это оборудование является источником интерференции, что делает FPV-полеты на 2.4 ГГц чрезмерно проблематичными в городских условиях. Аналоговое FPV имеет свои преимущества, такие как низкая задержка передачи сигнала (лаг), что позволяет обеспечить более реактивное управление дроном, кроме того, оно характеризуется простотой и относительно низкой стоимостью оборудования.

Аналоговое FPV на 5.8 ГГц

FPV на частоте 5.8 ГГц является выбором как профессионалов, так и любителей. Его преимущества заключаются в хорошем балансе между пропускной способностью и дальностью. Задержка видеопотока на 5.8 ГГц настолько мала, что незаметна человеческому глазу. В настоящее время это один из лучших диапазонов для FPV-полетов, и по умолчанию он устанавливается на гоночных дронах, поскольку задержка передачи видео идеально подходит для высокоскоростных полетов.

FPV Wi-Fi на 2,4 ГГц.

Это самая популярная технология для FPV-полетов. Причина такой популярности заключается в доступности и недорогом Wi-Fi передатчике, который подключается к камере дрона. Еще одним преимуществом является то, что в комплектации дрона обычно отсутствует монитор, и его роль выполняет смартфон или планшет. В случае аналогового оборудования, для FPV-полетов оператору необходимо дополнительно приобрести пульт с монитором или

специальные очки. К недостаткам данной цифровой технологии относятся ограничения дальности передачи сигнала, вызванные особенностями Wi-Fi, а также большое количество источников интерференции на частоте 2.4 ГГц. Еще одним проблемным местом является задержка видеопотока, которая нарастает с увеличением расстояния между дроном и оператором, что в конечном итоге снижает качество последующих FPV-полетов.

FPV Wi-Fi на 5 ГГц

Трансляция видеопотока по Wi-Fi на частоте 5 ГГц появилась недавно, что позволило существенно улучшить качество видеопотока и расстояние передачи.

Таким образом, можно обобщить следующее:

1. Аналоговое FPV на 2.4 ГГц – зрелая технология, используется редко.
2. Wi-Fi FPV на 2.4 ГГц – новая технология, однако качество передачи видео на этой частоте страдает от задержек.
3. Wi-Fi FPV на 5 ГГц (5G Wi-Fi) – новая технология, качество передачи видео на этой частоте лучше, чем на 2.4 ГГц, что позволяет достичь большей дальности полета. Лучший выбор для квадрокоптеров начального уровня.
4. Аналоговое FPV на 5,8 ГГц – лучший из всех рассмотренных вариантов.

Характеристики существующих систем FPV значительно различаются по качеству передаваемого видео, а также по задержке между устройством захвата и дисплеем. Лучшие системы адаптируют параметры потоковой передачи к текущим условиям. Эта адаптация видеопотока должна выполняться динамически, поскольку качество беспроводной связи «воздух-земля» (AG) между БАС и оператором может меняться во времени и в зависимости от положения из-за таких факторов, как наличие рассеивающих элементов, препятствий на пути прямой видимости и эффект Доплера, вызванный подвижностью дрона.

Влияние отражений от земли, затенения из-за препятствий, потерь в тракте из-за высоты и ориентации антенного луча на покрытие беспроводной

связи для БАС изучалось различными учеными и экспертами при использовании наземных базовых станций с антеннами, наклоненными вверх для БАС, в сочетании с антеннами, наклоненными вниз для наземных пользователей. Исследование отечественных авторов [208] показало, что БАС испытывают более высокую частоту сбоев при передаче и более длительное время прерывания передачи, чем наземные пользователи. Чтобы избежать столкновений, эта адаптация видео должна выполняться с конкретной целью максимального увеличения вероятности распознавания препятствия. Эта задача, в свою очередь, требует понимания реакции системы визуального распознавания человека на объекты различных размеров, а также знания компромиссов между разрешением видео и задержкой видео. В зависимости от видеокodeка, более высокое разрешение видео может привести к росту объема передаваемых по каналу данных, увеличению времени передачи и росту продолжительности задержки [209].

На этот компромисс также влияет сценарий полета. Например, когда препятствие находится дальше от БАС (и, следовательно, выглядит меньше на видеоизображении), желательно увеличить разрешение видео, чтобы оператор мог увидеть более мелкие детали и обнаружить преграду. С другой стороны, когда препятствие находится ближе, может быть целесообразно минимизировать задержку за счет разрешения видео, чтобы оператор имел возможность быстро распознать препятствие до столкновения. Оптимальный баланс между разрешением видео и задержкой также определяется скоростью БАС. Например, при фиксированном расстоянии до препятствия использование более высокого разрешения видео целесообразно в тех случаях, когда дрон движется с меньшей скоростью, поскольку это обеспечивает больше времени для обработки визуальной информации и принятия решения до возможного столкновения. В этом случае более высокое разрешение позволит оператору распознать препятствие, когда оно еще находится на большом расстоянии, а более низкая скорость даст достаточно времени, чтобы остановить БАС до столкновения.

Таблица 1.9 – Сравнительная характеристика различных алгоритмов адаптации видеосигнала FPV дрона¹⁰

Категория адаптации	Адаптируемые параметры видеосигнала	Основные цели адаптации	Используемые алгоритмы/методы	Принцип работы и научное обоснование	Применимость и особенности FPV
Управление качеством видео и битрейтом	1. Разрешение 2. Частота кадров 3. Битрейт 4. Параметры кодирования/сжатия	1. максимизация качества изображения: при хороших условиях связи; 2. редотвращение потери сигнала: снижение качества для сохранения связи; 3. оптимизация под пропускную способность канала: динамическое изменение потока;	1. Адаптивная скорость передачи: протоколы, основанные на TCP/UDP 2. Буферные алгоритмы: анализ заполнения буфера приёмника. 3. Алгоритмы на основе потерь/задержки пакетов: оценка состояния канала. 4. Предиктивные модели (на основе ИИ/ML): прогнозирование состояния канала	1. Изменение битрейта: динамическое уменьшение или увеличение количества данных, передаваемых в секунду, путём изменения степени сжатия (квантование, GOP-структура) или разрешения. При ухудшении канала связи снижается битрейт для уменьшения нагрузки на канал и предотвращения потерь. 2. Алгоритмы ABR: постоянно мониторят доступную пропускную способность канала, задержку и процент потерь пакетов. При изменении условий они выбирают оптимальный «профиль» видеопотока (разрешение, FPS, битрейт), чтобы обеспечить максимально возможное качество без прерываний. 3. Предиктивные ABR: используют данные с датчиков дрона (скорость, высота, GPS-координаты), а также машинное обучение для прогнозирования изменений в качестве связи до их фактического наступления, обеспечивая проактивную адаптацию.	1. Критически важна для цифровых систем взаимодействия оператора и беспилотной системы: позволяет адаптироваться к изменяющимся условиям полёта (городская застройка, лес, открытая местность). 2. Помогает сохранять стабильность видеопотока на дальних дистанциях за счёт снижения качества, а не полной потери. 3. Баланс между качеством и задержкой. Некоторые системы (например, HDZero) сознательно жертвуют качеством ради минимальной задержки, другие (DJI) могут увеличивать задержку для сохранения картинки

¹⁰ Составлено автором

Управление задержкой	1. Количество кадров в буфере 2. Количество повторных передач 3. Размер GOP (Group of Pictures) / межкадровое кодирование	1. минимизация сквозной задержки: от сенсора камеры до экрана оператора; 2. обеспечение отзывчивости взаимодействия оператора и беспилотной системы: критично для динамичного полёта;	1. Алгоритмы контроля потока 2. Динамическое изменение размера буфера: на приёмнике и передатчике. Приоритезация данных: выделение пропускной способности для критически важных данных. 3. Управление повторными передачами: ограничение или отключение повторных запросов пакетов при высокой задержке. 4. Параллельная обработка: многопоточность в кодировании/декодировании. 5. Предварительная обработка: снижение разрешения/кодирование до передачи.	1. Минимизация задержки: достигается за счет сокращения этапов обработки, использования эффективных кодеков с низкой задержкой (например, JPEG2000, или специализированные протоколы с минимальным межкадровым сжатием), а также сокращения буферизации данных. В отличие от стандартного видеостриминга, FPV системы часто отказываются от некоторых функций для снижения задержки. 2. Управление буфером: большой буфер снижает потери, но увеличивает задержку. Адаптивные алгоритмы динамически изменяют размер буфера в зависимости от текущего состояния канала. 3. Отказ от повторов: при плохой связи может быть приоритезирована доставка новых кадров над повторной передачей потерянных, что приводит к ошибкам на экране, но сохраняет актуальность информации и низкую задержку.	1. Основополагающая проблема FPV: высокая задержка делает полёт невозможным. 2. Влияет на реакцию оператора и точность манёвров. 3. Современные цифровые системы активно работают над снижением задержки. 4. Важно для гонок дронов, фристайла и точных инспекций.

Управление помехоустойчивостью и надёжностью	1. Схема модуляции 2. Кодирование с исправлением ошибок 3. Мощность передатчика 4. Выбор частотного канала	1. поддержание связи: в условиях шумов, помех и удалённости; 2. минимизация потерь пакетов: предотвращение артефактов и «замираний» видео.	1. Адаптивная модуляция и кодирование: SNR-адаптация: изменение схемы модуляции (например, от QAM к QPSK/BPSK) в зависимости от отношения сигнал/шум. 2. Управление FEC: динамическое изменение избыточности корректирующих кодов. 3. Автоматический выбор канала: сканирование и переключение на наименее загруженный канал. 4. Адаптивное управление мощностью	1. AMC: на основе оценки качества канала связи (например, по уровню RSSI или SNR) система динамически выбирает наиболее подходящую схему модуляции (более эффективную при хорошем сигнале, но менее устойчивую к шумам, или наоборот). 2. FEC: добавляет избыточные данные к потоку, позволяя приёмнику восстанавливать потерянные или поврежденные пакеты без повторного запроса, что снижает потери и задержку. Адаптивный FEC изменяет степень избыточности в зависимости от условий.	1. Крайне важна для полётов на дальние расстояния и в городской среде: позволяет сохранять связь в условиях интерференции и препятствий. 2. Снижает «мусор» на экране (аналог) или «замирания/кубики» (цифра). 3. В аналоговых системах проявляется как изменение качества «снега» на экране, в цифровых – как изменение битрейта или замирания
Компенсация движения и интерполяция	1. Промежуточные кадры 2. Оптический поток	1. повышение плавности: при снижении частоты кадров; 2. улучшение восприятия движения: в условиях низкой пропускной способности;	Интерполяция кадров: – линейная интерполяция; – интерполяция на основе оптического потока; – морфинг.	1. Интерполяция: когда пропускная способность канала недостаточна для передачи высокой частоты кадров, система может передавать меньше кадров, а затем на приёмной стороне «достраивать» промежуточные кадры. 2. Оптический поток: алгоритмы анализируют движение пикселей между существующими кадрами для предсказания и генерации реалистичных промежуточных кадров, что повышает плавность видеопотока без увеличения нагрузки на канал. Это может помочь компенсировать снижение FPS.	1. Может применяться для компенсации потери кадров или снижения FPS: необходим баланс между вычислительной сложностью и эффективностью. 2. В условиях FPV-рейсинга или фристайла подобные методы могут увеличивать задержку, поэтому используются крайне редко или вообще не используются в

					критичных к задержке системах. Более применимо для мониторинга или задач, где плавность важнее абсолютной минимальной задержки.
Комбинированные и интегрированные системы	Все вышеперечисленные параметры	1. комплексная оптимизация: задержки, качество, надёжность; 2. максимизация «качества опыта».	1. Системы глубокого обучения: – нейронные сети для прогнозирования состояния канала и выбора оптимальных параметров; 2. Гибридные протоколы: – сочетание аналоговых и цифровых методов; 3. Проактивные алгоритмы: – на основе данных датчиков дрона и моделирования среды.	1. Интегрированный подход: современные систем взаимодействия оператора и беспилотной системы (особенно цифровые) используют комплексные алгоритмы, которые одновременно учитывают множество параметров: состояние канала, расстояние до дрона, уровень помех, скорость дрона, его маневры, а также текущие требования оператора (например, приоритет низкой задержки для гонок). 2. ИИ/ML: могут обучаться на больших объемах данных, чтобы принимать оптимальные решения по адаптации в реальном времени, даже в непредсказуемых условиях.	1. Являются будущим FPV: цель – создание максимально стабильного, качественного и низкозадержанного видеопотока в любых условиях. 2. Необходимость учитывать динамические изменения среды и поведения дрона. 3. Например, система Ruby FPV использует такой адаптивный подход.

Таким образом, для повышения безопасности постоянно развивающейся области применения БАС с FPV важно изучить конструкцию алгоритмов адаптации видеосигнала для предотвращения столкновений, которые учитывают сложное взаимодействие между описанными выше факторами.

В таблице 1.9 представлена сравнительная характеристика различных алгоритмов адаптации видеосигнала FPV дрона. Описываемые в таблице 1.9 параметры относятся к стандартным цифровым видеокодекам семейства AVC/HEVC/VVC, их более детальному рассмотрению посвящен далее раздел 1.4.

Не подлежит сомнению тот факт, что одним из важнейших элементов FPV-дронов является система управления полетом (FC), которая является систематической концепцией, объединяющей навигацию, динамику полета и управление полетом [192]. Система дистанционного управления полетом обычно состоит из двух частей: датчиков и бортовых компьютеров. Она позволяет обеспечить стабилизацию и контроль положения БАС, управление полетом и пилотирование в чрезвычайных ситуациях. FC может вычислять и анализировать полетные данные, собираемые с гироскопов, акселерометров, магнитометров, барометров, ультразвуковых датчиков, датчиков оптического потока и GPS, для дистанционного контроля положением дрона в полете.

Различные датчики, установленные на БАС, составляют основу системы взаимодействия оператора и беспилотной системы. Такие датчики, как гироскопы и магнитометры, могут использоваться для расчета ориентации и скорости, предоставляя различную информацию для FPV. В частности, гироскоп и акселерометр позволяют измерять угловую скорость вращения и линейное ускорение БАС во время полета, а также определять положение дрона в полете. Магнитометр оценивает положение в полете, измеряя вектор геомагнитного поля. Барометр может измерять высоту БАС, определяя высоту барометрического давления, что дает возможность сделать приблизительную оценку высоты полета. Ультразвуковые датчики предназначены для контроля за низкой высотой БАС или обходом препятствий. Оптические датчики потока

точно устанавливают положение дрона в режиме зависания. Модуль GPS может измерять скорость и положение БАС, что играет важную роль в его позиционировании и навигации. Бортовой компьютер является основным вычислительным блоком, установленным на БАС. Он может обеспечить интеллектуальное управление и автономное принятие решений, а также восполнить недостатки системы FPV, которые не могут быть усовершенствованы в процессе разработки [210].

В таблице 1.10 систематизированы ключевые требования к системе FPV. Таблица 1.10 – Технические и функциональные требования к взаимодействию от первого лица¹¹

Категория	Показатель / Параметр	Минимальные требования / Рекомендуемые значения
Качество видеопотока	Разрешение камеры	Не ниже 720p (желательно Full HD 1080p)
	Частота кадров (FPS)	Не менее 30 fps, оптимально — 60 fps
	Угол обзора (FOV)	100–150° (широкоугольный объектив)
Задержка сигнала	Видеозадержка от камеры до отображения	≤ 40 мс (в идеале – 25 мс для реактивного FPV)
Канал передачи сигнала	Тип передачи	Аналоговый (low latency) или цифровой
	Диапазон частот	5.8 GHz (стандарт), реже — 2.4 GHz
	Устойчивость и шифрование сигнала	Защищённые протоколы (например, DJI OcuSync, HDZero)
Контроллер FPV	Тип джойстика / стика	2–4 канала, регулируемая чувствительность
	Частота отклика	Не менее 100 Гц
Интерфейс отображения	FPV-очки или монитор с низкой инерцией	Обязательны при точном или высокоскоростном управлении
	Телеметрия и визуальные данные	Скорость, GPS, высота, заряд, координаты
Питание и выносливость	Время автономной работы систем FPV	Не менее 20–30 минут
Функции безопасности	Автоматическое возвращение домой (RTH) при потере сигнала	Обязательная функция
	Автоматическая стабилизация	Желательна для непрофессионального управления
Дополненные технологии	Поддержка AR-интерфейса, отображение объектов, маршрутов и подсказок	При наличии задач: инспекция, обучение, спасение

Подводя итоги, следует отметить, что существующие системы имеют

¹¹ Составлено автором

ограниченное применение, а спутниковые каналы большую задержку. Поэтому для создаваемых гибридных сетей связи, которые имеют большие задержки в сегментах, необходимо разрабатывать свои более эффективные системы взаимодействия оператора и беспилотной системы от первого лица на базе ИИ.

1.4 Современные технологии цифрового кодирования видеoinформации

С появлением цифрового видео необходимость в экономии пропускной способности сети связи и дискового пространства для его хранения подтолкнула усилия по эффективному сжатию данных. С годами скорость в пакетных сетях передачи данных росла вместе с вычислительной мощностью конечных устройств, но в то же время росли и параметры видео (частота кадров, разрешение, глубина цвета), предъявляя все больше требований к системам сжатия видео. С этой целью MPEG (*англ.* Moving Picture Experts Group, группа экспертов по движущимся изображениям) и ITU-T (*англ.* International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector, сектор стандартизации международного союза электросвязи) ввели линейку стандартов кодирования видео, начиная с H.261¹² в 1988 году, H.262¹³, H.263¹⁴ и далее через повсеместно распространенные в настоящее время AVC/H.264 (*англ.* Advanced Video Coding, усовершенствованное кодирование видео) с последующими модификациями¹⁵ и HEVC/H.265¹⁶ (*англ.* High-efficiency Video Coding, высокоэффективное кодирование видео) вплоть до новейшего VVC/H.266 (*англ.* Versatile Video Coding, универсальное видео кодирование), а также современных видеокодеков VP9¹⁷ разработки корпорации Google и AV1¹⁸

¹² Recommendation H.261 (11/88) 1988. H.261: Video Codec for Audiovisual Services at p x 384 kbit/s. Standard. ITU-T.

¹³ ITU-T Rec. H.262, ISO/IEC 13818-2. Information Technology -- Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information: Video (MPEG-2 Video). - ITU-T, 2000.

¹⁴ ITU-T Rec. H.263. Video Coding for Low Bit Rate Communication. ITU-T. Version 3 – 2000.

¹⁵ ITU-T Rec. H.264. Advanced Video Coding for Generic Audiovisual Services (ISO/IEC 14496-10. Information Technology - Coding of Audio-Visual Objects - Part 10: Advanced Video Coding). ITU-T and ISO/IEC. Version 16 – 2012.

¹⁶ ITU-T Rec. H.265 and ISO/IEC 23008-2 MPEG-H. High efficiency video coding. ITU-T and ISO/IEC JTC 1. Version 1 – 2014.

¹⁷ Draft VP9 Bitstream and Decoding Process Specification. URL: <https://www.webmproject.org/vp9/>.

¹⁸ AV1 Video Codec. URL: <https://aomedia.org/specifications/av1/>.

(аббр. от англ. AOMedia Video 1) разработки некоммерческой организации Alliance for Open Media. Каждое поколение стандартов в свою очередь стремится удвоить коэффициент сжатия с сохранением визуального качества. Однако вместе с этими улучшениями увеличивается и сложность вычислений.

Однако, улучшение эффективности кодирования является не единственной причиной для совершенствования алгоритмов сжатия видео. Если рассматривать систему видеотрансляции с точки зрения затрат энергии, то часто стоимость энергии, необходимой для вычислений намного ниже, чем энергия, необходимая для передачи данных по сети связи, поэтому улучшенная схема сжатия может обеспечить экономию этой энергии [211]. Улучшение срока службы батареи особенно важно в контексте функционирования беспилотных систем.

Кроме того, даже с учетом накладных расходов на вычисления при сжатии, сокращение времени, затрачиваемого на передачу сжатых данных, может привести к меньшему общему времени, чем при передаче необработанных данных без сжатия. В условиях ограниченных ресурсов, например, при использовании спутникового сегмента ГОНСС, эффективное сжатие позволяет передавать видео между БПЛА и оператором даже при ограниченном объеме доступного канала.

Для неинтерактивных видеосистем, таких как воспроизведение видео, задержка кодирования¹⁹ не так важна, как качество или размер файла, при условии, что скорость кодирования достаточно высока для обработки видео с требуемой частотой кадров. Действительно, современные видеокодеки могут использовать избыточность между кадрами, что требует буферизации кадров и дополнительной задержки при буферизации будущих кадров. Однако, интерактивным видеоприложениям для использования требуется низкая задержка. С текущим поколением беспроводных сетей время передачи по сети обычно является основным фактором, влияющим на общую задержку в

¹⁹ 3rd Generation Partnership Project (3GPP). 2018. Study on Communication for Automation in Vertical Domains (CAV). Technical Report 22.804.

реальных приложениях. Даже при многомегабитных соединениях сложно достичь достаточно низких задержек особенно в каналах спутниковой связи, где основные задержки передачи данных обусловлены ограничениями физической среды. Однако последние достижения в области сетевых технологий, таких как WiFi6 или 5G, обещают снизить задержку передачи до единиц миллисекунд. При таких потенциально низких задержках конвейер кодирования видео становится узким местом.

Более быстрые сети передачи данных открывают пространство для новых приложений, таких как облачный гейминг, XR (*от англ.* Extended Reality – расширенная реальность) или интернет навыков [212, 213]. Однако, высокая задержка может либо ухудшить пользовательский опыт (как с облачным геймингом), либо способствовать “укачиванию” при использовании VR (*от англ.* Virtual Reality, виртуальная реальность). Хотя приложения, ориентированные на использование человеком, толерантны к некоторой задержке, которая ограничена человеческим восприятием, некоторые автоматизированные системы, такие как автономные транспортные средства и беспилотные авиационные системы, полагаются на машинное зрение для взаимодействия оператора и беспилотной системы своими действиями. В случае быстро движущихся и критически важных для безопасности приложений требования к задержке могут быть гораздо строже. Поэтому необходимо учитывать задержку кодирования также с точки зрения приложений, где видеопоток используется для обеспечения ультранизкой задержки принятия решений по взаимодействию с роботами без участия человека.

Другой тенденцией, дающей толчок к развитию кодирования видео с низкой задержкой, являются создание ГОНСС и предоставления услуги взаимодействию оператора с беспилотными системами на ее основе, что характеризуются необходимостью обеспечивать передачу видеопотока на значительные расстояния и где сжатие будет играть важную роль в сокращении полосы пропускания и задержки между БПЛА и оператором. При этом характеристики самой сети являются неоднородными и динамично

изменяющимися. Это обуславливает необходимость снижения интенсивности битового видеопотока.

В процессе обработки видеопотока количество бит, формируемых на выходе кодирующего устройства для каждого кадра, варьируется в зависимости от его содержимого, что приводит к изменению битовой скорости выходного потока. Подобные флуктуации битрейта могут вызывать значительные затруднения при передаче видеоданных, особенно в контексте функционирования транспортных протоколов. Так, в сетях с коммутацией пакетов, несмотря на способность адаптироваться к изменяющейся скорости передачи, средняя пропускная способность в любой момент времени остается ограниченной и определяется совокупностью факторов, включая номинальную скорость передачи данных и степень загруженности канала связи [214].

В связи с этим разработка и совершенствование алгоритмов кодирования, направленных на снижение битовой скорости и флуктуации сжатого видеопотока при сохранении его качества с целью адаптации к пропускной способности каналов передачи данных сегментов ГОНСС, представляет собой актуальную научно-прикладную задачу.

В целом, задержка видеокодирования может быть уменьшена за счет более быстрых алгоритмов и их интеллектуальной реализации на базовых вычислительных платформах. Поскольку максимальные тактовые частоты процессоров больше не масштабируются в соответствии с законом Мура, большая вычислительная мощность достигается за счет распараллеливания вычислений, и поэтому «быстрее» в настоящее время обычно переводится как «более параллельно». Сдвиг вычислительной парадигмы требует переформулирования традиционных подходов для соответствия моделям параллельного выполнения, что в оптимальном случае должно быть заметно при принятии решений по проектированию на уровне алгоритма. Этому в полной мере могут соответствовать нейронные сети, природа которых основана на параллельной обработке информации.

1.4.1 Задержки в каналах информационного обмена видеосистем реального времени

В интерактивных видеосистемах (например, VR) задержка «верхнего уровня», также называемая «задержкой движения к фотону» (*пер. с англ. motion-to-photon latency, M2P*) , представляет собой время, прошедшее между действием пользователя на устройстве фиксации такого действия и наблюдением результата на устройстве отображения (рис. 1.15).

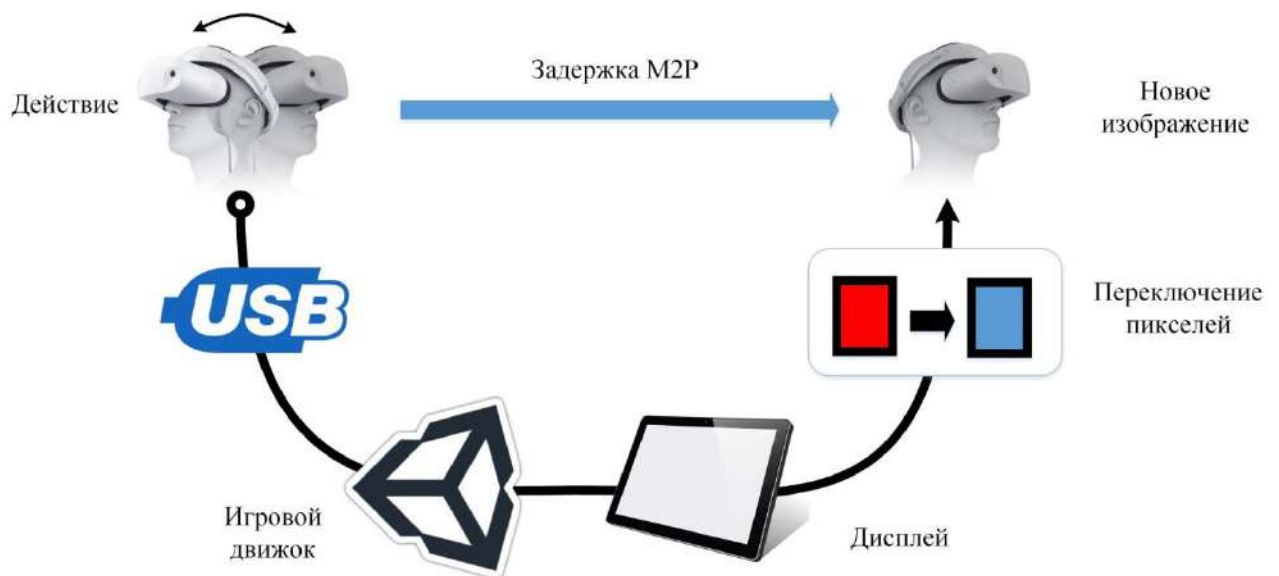


Рисунок 1.15 – Задержка M2P

В системах автоматического управления, где потребителем данных является алгоритм, а не человек, этот термин относится к задержке от получения исходного видео до момента, когда транскодированный сигнал поступает на вход системы отображения.

Насколько низкой должна быть задержка, зависит от приложения. Например, в университете Токио [215] изучали действия пользователей, решающих простую двигательную задачу при проецировании руки с различными величинами M2P задержки. Авторы пришли к выводу, что если задержка превышает 24.3 мс, производительность пользователя начинает снижаться. Также были проведены исследования [216, 217], связанные с задержкой звука, где предположили, что задержка звука ниже 20–30 мс либо незаметна, либо приемлема для людей.

Японские ученые при исследовании автомобильных систем помощи водителю [218] столкнулись с ограничением на задержку системы кругового обзора автомобиля при кодировании видеопотока от камер кодеком AVC/H.264, которая должна быть менее 100 мс, в противном случае процесс автоматической парковки может быть не безопасен для водителя. Как утверждают авторы исследования, за 100 мс автомобиль при скорости 10 км/ч может преодолеть расстояние в 30 см. В то время, как 100 мс достаточно для системы помощи в парковке, чтобы обеспечить то же расстояние в 30 см при скорости 100 км/ч, требуемая задержка должна быть около 10 мс. Из приведенного примера очевидно, что низкая задержка имеет решающее значение для систем автономного вождения, где транспортное средство движется достаточно быстро. Например, в белой книге Ixia определены требования к сквозной задержке канала Ethernet в автомобиле как 0,25–1 мс для приложений помощи водителю и безопасности водителя и <10 мс для систем интерфейса человек-машина.

В спецификации 3GPP²⁰ (*от англ.* 3rd Generation Partnership Project) определены варианты использования и требования к связи 5G в области автоматизации. В спецификации «низкая задержка» определяется как задержка менее 10 мс. Среди прочего, требования к задержке упоминаются для нескольких вариантов использования, таких как AR (*от англ.* Augmented Reality, дополненная реальность) (50 мс задержки M2P для предотвращения эффекта «укачивания») или «мобильные роботизированные комплексы» (цикл дистанционного управления <10 мс, 10–100 мс для управления от первого лица).

На основании вышесказанного определим *низкую задержку* информационного потока в канале информационного обмена (КИО) как задержку на уровне приложения в диапазоне от 10 до 50 мс, а *сверхнизкую задержку* в КИО как задержку менее 10 мс. Для не критичных систем с

²⁰ 3rd Generation Partnership Project (3GPP). 2018. Study on Communication for Automation in Vertical Domains (CAV). Technical Report 22.804.

человеком в контуре низкая задержка обеспечивает высококачественный пользовательский опыт. Сверхнизкая задержка устанавливает требование для систем, критичных к задержке, где для предотвращения повреждений или травм требуется точность выше порога человеческого восприятия.

Типичная задержка современных беспроводных технологий (например, 4G и 802.11ac, он же Wi-Fi 5) составляет порядка десятков миллисекунд, что само по себе слишком много для достижения сверхнизкой задержки. Новейшие и будущие стандарты беспроводных сетей (5G и 802.11ax, он же Wi-Fi 6) обещают сократить задержку до единиц миллисекунд, что делает возможным их использование в приложениях, критичных к задержке. Например, парадигма сверхнадежной связи с минимальными задержками URLLC (*от англ. Ultra-Reliable Low-Latency Communications* – сверхнадежные коммуникации с низкой задержкой), используемая для будущего стандарта 5G, требует сквозной сетевой задержки в 1 мс [219].

Пропускная способность vs задержка

Высокая пропускная способность системы кодирования видео (т. е. количество пикселей, которые кодер/декодер может обработать за единицу времени) является необходимым условием для достижения низкой задержки, хотя сама по себе она может быть недостаточной. Задержка обработки одного кадра может быть слишком высокой для достижения сверхнизкой задержки даже при высокой частоте кадров. Например, для кодирования видео на скорости 120 кадров в секунду (FPS) необходимо обеспечить $1000/120=8.3$ мс времени кодирования одного кадра без учета вариабельности такого процесса. Для цифровых FPV систем требования ко времени кодирования ниже. Так при FPS=25 системе кодирования необходимо обеспечить $1000/25=40$ мс времени на кодирование одного кадра. Таким образом, возможность кодирования подкадров позволит достичь более низких задержек без необходимости значительного увеличения пропускной способности, что является достаточно сложной задачей.

Теоретически, должно быть возможно бесконечно уменьшать задержку,

предполагая, что алгоритм может это поддержать. Например, алгоритмы мезонинного сжатия (*от англ. mezzanine compression algorithms*) способны достигать задержек ниже одной строки пикселей изображения [220]. Однако на практике кодирование подкадров имеет свои ограничения. Даже если алгоритм и его реализация позволяют кодировать подкадры, интеграция в единый кодек может потребовать буферизации между этапами работы кодека, что снижает потенциал достижения низкой задержки выполнения. Кроме того, накладные расходы на несколько потоков подкадров могут быть слишком большими, если размер подкадра слишком мал. Кроме того, для высокопараллельных устройств, в первую очередь графических процессоров, рабочая нагрузка по кодированию небольшого подкадра может быть слишком низкой, чтобы полностью использовать его вычислительные ресурсы. Поэтому в некоторых сценариях оптимизация для минимально возможной задержки может парадоксальным образом повредить пропускной способности системы кодирования в целом.

В качестве последнего пункта хочется отметить, что передача данных между устройствами, такими как CPU и GPU, является известным источником задержек, а также узким местом для пропускной способности. Таким образом, распределение вычислений между устройствами должно быть тщательно продумано.

Степень сжатия

Пропускная способность канала играет важную роль при определении необходимого коэффициента сжатия. В таблице 1.11 показаны минимально необходимые теоретические коэффициенты сжатия, требуемые для передачи видео (предполагая 60 FPS без субдискретизации) по различным цифровым видеоинтерфейсам и сетевым каналам. Примеры приведены для разрешений 1080p, 4K (3840×2160) и 8K (7680×4320) с 10 битами на цветовой компонент (предполагая три компонента на пиксель).

Таблица 1.11 – Требуемые коэффициенты сжатия видео в различных разрешениях для передачи по различным каналам²¹.

«Сырое» видео (60 FPS, 10 бит, 4:4:4)		Видеоинтерфейсы			Сети					
		3G-SDI	DP 1.4	HDMI 2.1	4G	5G mm	WiFi5	WiFi6	25 GbE	5G fu
Разр.	Гбит/с	2.9	25.9	42.6	1.0	2.0	3.5	11	25	50
1080p	3.7	1.3	—	—	3.7	1.9	1.1	—	—	—
4K	14.9	5.1	—	—	14.9	7.5	4.3	1.4	—	—
8K	59.7	20.6	2.3	1.4	59.7	29.9	17.1	5.4	2.4	1.2

Приведенные значения пропускной способности канала являются теоретическими максимальными значениями, не отражающими накладные расходы на передачу, и поэтому коэффициенты сжатия следует воспринимать как слегка заниженные.

1.4.2 Современные кодеки сжатия видеопотока

Разделим возможные алгоритмы сжатия видео на четыре категории на основе их целей проектирования и принципов кодирования: сжатие неподвижных изображений; мезонинное сжатие; сжатие текстур; сжатие видео. Кроме того, кратко обсудим влияние машинного обучения на сжатие изображений и видео.

Сжатие неподвижных изображений

Поскольку видео по сути является потоком изображений, алгоритмы сжатия изображений могут использоваться и для сжатия видео. Это самая широкая и общая категория.

Типичное сжатие изображений выполняется в три этапа. Во-первых, входные образцы декоррелируются. Декорреляция может быть достигнута с помощью различных методов, таких как преобразование, прогнозирование или кодирование поддиапазона (например, дискретное вейвлет-преобразование, DWT), часто предваряемое цветовым преобразованием, которое разделяет

²¹ Полосы пропускания канала связи представлены как теоретические максимальные значения. «DP»: стандарт DisplayPort; «5G mm»: 5G MMWave Standard; «5G fu»: future 5G Standart на коротких длин волн.

цветовые каналы на компоненты яркости и цветности. Затем декоррелированные коэффициенты подвергаются квантованию с отбрасыванием наименее важных элементов, переупорядочиванию, которое гарантирует, что наиболее важные элементы будут передаваться первыми. Последний шаг – энтропийное кодирование, которое уменьшает статистическую избыточность между элементами, например, кодирование Хаффмана, арифметическое или Голомба-Райса. Декомпрессия выполняется путем повторения обратных операций этапов кодирования в обратном порядке: энтропийное декодирование, восстановление выборки и обратное преобразование, за которым может следовать преобразование цвета в исходный вид.

Наиболее широко используемые алгоритмы в этой категории являются вариантами алгоритма JPEG (*аббр. от англ. Joint Photographic Experts Group*): оригинальный JPEG [221], его более сложное усовершенствование JPEG2000 [222] или JPEG-LS [223], предназначенные в первую очередь для кодирования изображений без потерь или почти без потерь. Новый стандарт JPEG XL [224] призван заменить оригинальный JPEG для веб-приложений.

В исследованиях, в которых оценивается задержка M2P, следует выделить [225], где предложили ускоренное на GPU кодирование стандарта JPEG. При кодировании JPEG вся система демонстрирует задержку в 4 кадра (133 мс), такую же, как и несжатое видео (с видеовходом 1080i). Помимо JPEG, в публикации также описано кодирование сжатия текстур на GPU.

В [226] предложена реализация TICO (*аббр. от англ. Tiny Codec*) на базе FPGA, интегрированную в систему потоковой передачи видео качества 1080p с задержкой 0.58 мс. Выбор легкого алгоритма мезонинного сжатия был обусловлен его задержкой всего в несколько строк пикселей и качеством без визуальных потерь. Система использовалась для распределенной потоковой передачи музыкального выступления на расстояние более 300 км со сквозной задержкой приблизительно 5 мс. Однако при этом авторы не приводят измерения пропускной способности.

В некоторых публикациях представлены реализации FPGA кодера JPEG-LS на основе конвейерной [227, 228] и параллельной [229] архитектур. LOCO-I, ядро алгоритма JPEG LS, также было реализовано в [230] с механизмом PER (*аббр. от англ. Parallel Error Prediction* – параллельное прогнозирование ошибок).

Мезонинное сжатие

Алгоритмы мезонинного сжатия предназначены для снижения битрейта видео высокого разрешения, передаваемого по каналам и интерфейсам с высокой пропускной способностью, таким как HDMI, DisplayPort или 10 Гбит Ethernet. Эти алгоритмы предназначены для передачи видео без визуальных потерь с низкой задержкой и низкой сложностью реализации. Обычными примерами использования мезонинного сжатия являются профессиональное производство видео или сжатие видеопотока высокого разрешения между видеокартой и монитором. Можно выделить следующие требования к мезонинному сжатию [231]:

1. Поддержка 1080p–8K, 8–12 бит на компонент, цветовая субдискретизация 4:4:4 и 4:2:2.
2. Степень сжатия в диапазоне 1.5–6:1.
3. Без визуальных потерь качества.
4. Стабильность качества в случае многократных проходов кодирования-декодирования.
5. Низкая вычислительная сложность и малая задержка (<32 строк кадра).

Наиболее известными алгоритмами мезонинного сжатия являются VC-2 [232], VESA DSC [233] и новейший стандарт JPEG XS [220]. Существует множество фирменных форматов, таких как LLVC от Sony или TICO от intoPIX.

Алгоритмы мезонинного сжатия в первую очередь предназначены для хранения видео и его последующей обработки в приложениях видеомонтажа, поэтому в данном исследовании они не рассматриваются.

Современные видеокодеки сжатия подвижных изображений

Большинство современных алгоритмов кодирования видео для сжатия видеопотока используют временной и пространственный тип избыточности данных [234]. Основная идея сжатия кадров в современных кодеках заключается в том, что с большей вероятностью вблизи некоторой области изображения (макроблока) в кодируемом кадре или в соседних кадрах окажется похожий по значениям интенсивности пикселей участок кадра. Таким образом, для передачи данных об изображении в рассматриваемом макроблоке достаточно передать лишь разницу по сравнению с ранее закодированным схожим фрагментом. Процесс обнаружения подобных фрагментов среди уже закодированных изображений называют предсказанием. Набор разностных значений пикселей, определяющих отличие текущего макроблока от найденного предсказания, называют остатком. Такие остатки далее кодируются с помощью процедуры, аналогичной кодированию неподвижных изображений. Обычно в качестве декорреляционного преобразования используется вариация DCT (*аббр. от англ. Discrete Cosine Transform*, дискретное косинусное преобразование) преобразования, за которым следует квантование его коэффициентов. Наконец, квантованные коэффициенты подвергаются энтропийному кодированию, как правило, с помощью алгоритма CAVLC (*аббр. от англ. Context-Adaptive Variable-Length Coding*, контекстно-адаптивное кодирование переменной длины) или CABAC (*аббр. от англ. Context-Adaptive Binary Arithmetic Coding*, контекстно-адаптивное двоичное арифметическое кодирование). Кроме того, современный видеокодек также включает в себя деблокирующий фильтр.

Такие современные методы сжатия позволяют сохранять высокое качество изображения при сравнительно низком битрейте. Это означает, что оператор получает детализированное изображение, необходимое для точного взаимодействия оператора и беспилотной системы, даже если связь ограничена по скорости. Однако, такое расширение функционала ведет к повышению

вычислительной сложности процесса кодирования и, как следствие, увеличению задержек получения видеопотока на стороне оператора.

На рисунке 1.16 показаны обобщенные блок-схемы видеокодера и декодера. Блоки в серой зоне обозначают ядро алгоритмов кодирования видео, которое принципиально не отличается от кодирования неподвижных изображений на основе DCT преобразования. Однако, данная блок-схема иллюстрирует, что помимо дополнительного вычисления остатков предсказания, внутрикадровое и межкадровое предсказание усложняют обработку потока данных, вводя обратную связь, которая повторяет часть процесса декодирования. Помимо остатков, дополнительные команды взаимодействия оператора с беспилотными системами от модулей оценки предсказания и внутрикадровых фильтров, необходимые для восстановления кадров на стороне декодера, также кодируются энтропийным кодером. Для хранения опорных кадров, требуемых межкадровым предсказанием, требуется дополнительная память.



Рисунок 1.16 – Структура типичного кодера (слева) и декодера (справа)

Следует отметить, что для обработки видеопотока в стандартных кодеках применяется классификация кадров на три типа: I-кадры (интракадровые или опорные), P-кадры (предсказанные) и B-кадры (двунаправленно предсказанные). Опорные I-кадры подвергаются сжатию с использованием информации, содержащейся исключительно в пределах отдельного кадра, при

этом применяются алгоритмы, аналогичные стандарту JPEG. В свою очередь, Р-кадры формируются посредством предсказательного кодирования с опорой на данные предыдущего I- или Р-кадра, а В-кадры обрабатываются с использованием двунаправленного предсказания, что подразумевает использование информации как предыдущих, так и последующих I- и Р-кадров.

Несмотря на то, что I-кадры обеспечивают наивысшее качество изображения, их степень сжатия ограничена, поскольку устраняется лишь пространственная избыточность данных. Формирование видеопоследовательности только из I-кадров является нецелесообразным с точки зрения эффективности сжатия. Для повышения коэффициента сжатия в стандарте вводятся Р-кадры, в которых устраняются как пространственная избыточность (обусловленная незначительными вариациями цвета между соседними пикселями), так и временная избыточность (выраженная в схожести между последовательными кадрами). Для уменьшения пространственной избыточности применяется кодирование с использованием преобразования, а временная корреляция компенсируется за счёт предсказательного кодирования с блоковой компенсацией движения. Таким образом, Р-кадры представляют собой разностные кадры, содержащие изменения относительно предыдущего I- или Р-кадра, что позволяет достигать более высокого уровня сжатия за счёт эффективного использования корреляции между соседними кадрами. На сегодняшний день одной из главных задач процесса сжатия видео является устранение информационной избыточности опорных кадров.

Первая группа стандартов цифрового кодирования видео – это кодеки, разработанные MPEG: AVC/H.264, HEVC/H.265 и новейший VVC/H.266. Как было отмечено ранее, каждое поколение стремится примерно удвоить коэффициент сжатия при том же качестве. По сравнению с AVC, HEVC упростил деблокирующую фильтрацию и добавил явную поддержку параллелизма с помощью WPP (*аббр. от англ. Wavefront Parallel Processing* – параллельная обработка волнового фронта), слайсов и тайлов. VVC дополнительно повышает эффективность кодирования HEVC и расширяет его

сферу применения, делая его более универсальным, т. е. пригодным для использования в более широком диапазоне приложений, таких как широкополосное видео, HDR видео (*аббр. от англ. High Dynamic Range* – высокий динамический диапазон) или видео 360°, кодирование неподвижных изображений или кодирование без потерь. Кроме того, рабочая группа по стандартам кодирования аудио и видео Китая разработала свои варианты видеокодеков: AVS [235], AVS2 [236] и AVS3 [237].

В настоящий момент существуют множество публикаций, которые направлены на улучшение отдельных функциональных блоков стандартных кодеков, работающих в пиксельном пространстве. Например, в [238] представлен обзор сложности кодера HEVC/H265 по сравнению с AVC/H264 и описан эталонный программный кодер и декодер HEVC/H265. Хотя сложность декодирования разработана так, чтобы быть похожей на формат AVC/H264 предыдущего поколения, полнофункциональный кодер HEVC/H265 значительно сложнее, чтобы соответствовать цели удвоения эффективности сжатия. В [239] проведен анализ соотношения скорости, искажений и сложности кодера HEVC/H265 по сравнению с кодером AVC/H265. В ходе анализа HEVC/H265 показал улучшение метрики Бьётегора BD-Rate на 23–40% за счет увеличения накладных расходов на кодирование в 3,2–1,2 раз и на декодирование в 2,0–1,4 раз в зависимости от условий теста. В [240] исследована сложность кодера HEVC/H265 и сделаны выводы о том, что просто путем выбора правильных параметров, можно значительно снизить сложность кодирования без значительных затрат на эффективность.

По аналогии с кодером HEVC/H265, кодер VVC/H266 также увеличил сложность кодирования по сравнению со своим предшественником. Согласно исследованию [241], эффективность кодирования (BD-Rate) VTM (*аббр. от англ. VVC Test Model*, эталонная тестовая модель VVC) по сравнению с HM (*аббр. от англ. HEVC Model*, эталонная модель HEVC) улучшилась на 23–33,1% за счет увеличения сложности кодирования в 34–7,5 раз в зависимости от условий теста. Авторы также сообщили и о постоянном увеличении сложности

декодирования в 1,8 раза. Аналогичные результаты были получены в [242, 243]. В [244] провели аналогичный анализ, сосредоточившись на профилировании использования памяти.

Ряд научных публикаций также направлен на исследование кодека AV1. Как заявлено в [245], эталонный кодер AV1 не превосходит эталонный кодер HEVC/H248 с точки зрения эффективности кодирования, несмотря на более высокую сложность кодирования. Однако, в исследованиях [246, 247] сообщается, что AV1 более эффективен, чем HEVC/H248. В [248] проведен обзор аппаратных реализаций кодеков AV1 и VVC/H248. Авторы пришли к выводу, что в случае AV1 нет аппаратных решений для 2D гибридных преобразований, поддерживающих любую из 16 разрешенных комбинаций.

Далее представлен анализ публикаций, сообщающих о задержки M2P. Например, в [249] предложена система просмотра VR видео 360° с кодированием AVC/H264 и разрешением 3840×1920, работающая при 60 FPS. Видео генерируется с помощью шести камер GoPro, кодируется на настольном компьютере с графическим процессором и отправляется по беспроводной сети для отображения на HMD. Задержка M2P получилась примерно 500 мс при использовании беспроводной сети передачи и 160 мс без нее с накладными расходами на отображение, соответственно. Для кодирования авторы использовали аппаратный кодек, интегрированный в графический процессор, и ускорили некоторые этапы предварительной обработки с помощью архитектуры CUDA (*аббр. от англ. Compute Unified Device Architecture, архитектура унифицированного вычислительного устройства*).

В [250] предложили систему совместного использования экрана рабочего стола со сжатием AVC/H250. Чтобы сэкономить время вычислений, авторы использовали большую временную избыточность P-кадров и малозумящие характеристики, типичные для экранного контента. Кодирование выполнялось с помощью четырех интегрированных в GPU аппаратных кодеров. Авторы достигли величины задержки M2P в 17–25 мс на высокопроизводительной рабочей станции с захватом экрана разрешения 4K по проводной сети для

высокой активности экрана, где этот сценарий лучше соответствует общему потоковому видео. По беспроводной сети авторы достигли задержки M2P в 33–65 мс для разрешения 2736×1824 .

В [251] предложена архитектура видеоконференций в реальном времени Salsify, использующая кодек VP8 и специальный сетевой транспортный протокол. Авторы достигли задержки величины M2P в 449 мс по эмулированному сетевому каналу LTE. Система Salsify объединяет управление перегрузкой пакетов и управление скоростью видеокодека в единый алгоритм, чтобы они не мешали друг другу.

В [252] предложили игровую облачную систему виртуальной реальности, где исходное видео 360° разрешения 1080p генерируется на сервере, на котором запущена игра. Каждый кадр делится на фрагменты, которые кодируются независимо, каждый своим экземпляром кодировщика HEVC/H255 с открытым исходным кодом Kvazaar [253], используя WPP. Закодированное видео транслируется по Gigabit Ethernet и декодируется на клиенте с помощью программного декодера OpenHEVC [254]. Клиентский ноутбук принимает фреймы и отправляет кадры для отображения на устройство HMD. Авторам удалось достичь величины задержки M2P около 30 мс, при этом система может поддерживать частоту до 30 кадров в сек. Те же исследования были проведены в [255], где вместо ноутбука авторы использовали смартфон, установленный как HMD и подключенный через стандартную сеть WiFi. Авторы достигли той же пропускной способности видео с задержкой M2P, близкой к 50 мс.

В [256] авторы предложили систему ODSV (*аббр. от англ. OmniDirectional Stereoscopic Video*, всенаправленное стереоскопическое видео), достигающую величины задержки M2P в 2,2 с с задержкой кодирования 0,5 с. Относительно высокая задержка системы вызвана сложной природой расчетов оптического потока ODSV. Тем не менее, система может поддерживать частоту кадров в 30 FPS при разрешении 4096×2048 с кодированием, выполняемым модифицированным программным кодером HEVC x257 [257], работающим в однопоточном режиме.

Далее в разделе представлен краткий обзор снижения сложности и ускорения отдельных модулей стандартного кодека (рис. 1.17).

Поскольку рассмотрение всех модулей выходит за рамки данного анализа, сосредоточимся только на тех, которые обычно упоминаются в литературе [238, 239, 241, 243], как самые сложные с вычислительной точки зрения.

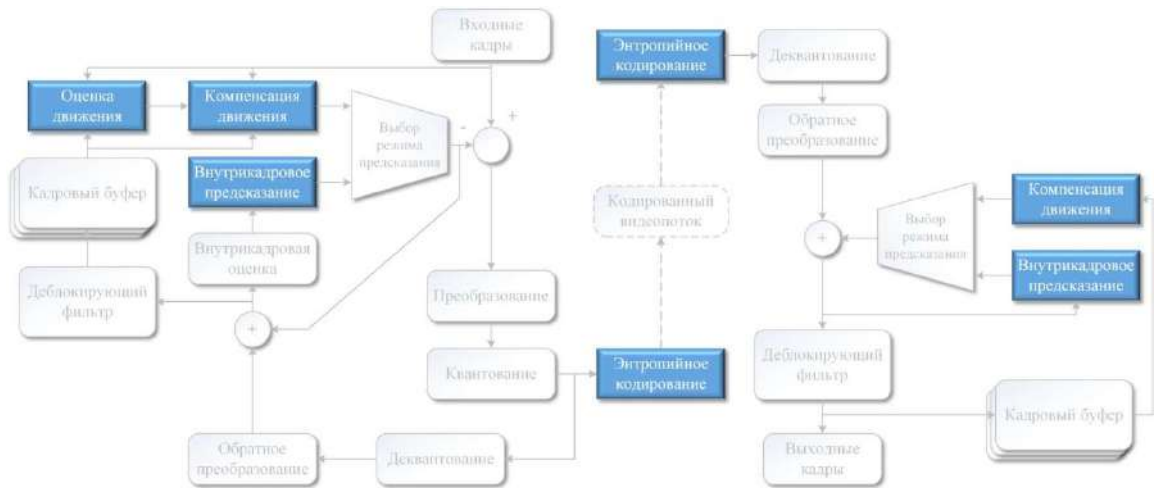


Рисунок 1.17 – Сложные с вычислительной точки зрения модули стандартного видеокodeка

Оценка и компенсация движения

Обычно компенсация движения считается самым затратным в вычислительном отношении шагом, на который сильно влияет значение параметра квантования QP . В отличие от AVC/H260, в HEVC/H265 принято рекурсивное разбиение макроблоков на CU (*аббр. от англ. Coding Units, кодовые единицы*), а затем на единицы внутри-/межкадрового предсказания. Чтобы уменьшить дополнительную сложность, в [258] предложили метод разделения CU, а также раннего завершения для HEVC/H265, сократив время кодирования на 42% за счет увеличения BD-Rate на 1,49% и BD-PSNR на 0,049%. В [259] предложен алгоритм принятия решения в режиме компенсации движения, основанный на основе статистического анализа. Авторы улучшили время кодирования на 49–52% при увеличении BD-Rate на 0,60–0,88%. Другая стратегия ускорения заключается в выполнении всего этапа компенсации движения на GPU [260-262] или FPGA [263, 264]. Всесторонний обзор [265]

охватывает исследования по межкадровому предсказанию в HEVC/H265 до 2019 г.

В исследовании [261] реализовали алгоритм компенсации движения для декодирования VVC/H266 на высокопроизводительном настольном графическом процессоре, где достигается время предсказания в 5 мс для разрешения 4K. Кроме этого, в [266] использовали сверточную нейронную сеть для ускорения предсказания при компенсации движения в кодеке VVC/H266, достигнув 31% экономии времени кодирования за счет 3% увеличения BD-Rate.

Существует достаточно большое количество отечественных публикаций, улучшающих алгоритмы оценки и компенсации движения в стандартных кодеках. В основном исследования направлены на совершенствование алгоритмов оценки движения [267, 268], в том числе на основе иерархических алгоритмов [269], компенсации движения [214, 270, 271], в том числе методом полиадического кодирования предсказываемых Р-кадров [272], интерполяции промежуточных кадров на основе векторов движения [273].

Кроме этого, существует ряд публикаций, описывающих результаты аппаратной реализации алгоритма компенсации движения. Например, в [262] предложен декодер HEVC/H262 с компенсацией движения, реализованной на GPU, в то время как остальные этапы выполняется на CPU. Вместо использования соседних блоков во время поиска движения авторы разделяют процесс на несколько слоев, причем каждый слой повторно использует результаты предыдущего. Этот метод ослабляет зависимости данных между блоками и обеспечивает лучшее распараллеливание при увеличении BD-Rate на 7,5% при 60 FPS.

В [274] предложен декодер MV-HEVC с ускорением на базе FPGA. Декодер работает с несколькими Р-кадрами параллельно, не учитывая зависимости данных между ними. На основе эталонного НТМ авторы решили ускорить функцию декомпрессии слайсов и использовали WPP для повышения параллелизма. Кроме этого, в [275] предложен параллельный декодер HEVC/H265 с ускорением на GPU, работающий на серверном CPU. Авторы

использовали внутренние уровни параллелизма с WPP, перекрывающие несколько Р-кадров. Все этапы декодирования, за исключением энтропийного декодирования, выполнялись на GPU.

В [276] исследовалась совместное использование CPU-GPU для кодера VP8. Авторы сосредоточились, в частности, на ускорении этапа оценки движения, поскольку было установлено, что именно этот этап вносит основной вклад во время выполнения на эталонном кодере. Авторами было установлено, что для достижения небольшого времени кодирования необходима максимизация использования общей памяти. В [277] предложили декодер AVS2, предназначенный для 3D-приложений на мобильных устройствах. Основываясь на анализе времени выполнения эталонного декодера, авторы сосредоточились в основном на ускорении модуля компенсации движения с расширениями SIMD (*аббр. от англ. Single Instruction Multiple Data*, единая инструкция и множественные данные) процессора ARM. Кроме этого, в [278] предложили ускоренный SIMD кодера HEVC/H265, реализованный на цифровом сигнальном процессоре. Авторы сосредоточились на улучшении параллелизма данных и минимизации накладных расходов на трафик памяти.

В [279] предложена реализация ASIC кодера HEVC/H265 с глубоким обучением, способного кодировать видео разрешения 4K со скоростью 30 FPS. Нейронная сеть обучается распознавать поле зрительного контакта человека для оценки распределения зрительного внимания, которое затем используется для взаимодействия оператора и беспилотной системы выбором параметров кодирования.

В [280] разработан модифицированный кодер AVC/H264 с «дрожащей» стабилизацией видео. Стабилизация видео встраивается непосредственно в существующий кодер вместо кодирования кадров после стабилизации. Чтобы снизить общую вычислительную сложность, векторы стабилизации используются также на этапе поиска вектора движения. Кодер был реализован как на настольном компьютере, так и на мобильном процессоре на базе ARM.

В исследованиях [264, 281] представлен декодер HEVC/H264 с

ускорением на базе FPGA на платформе Zynq SoC. На основе распределения времени декодирования эталонного декодера, работающего на процессоре ARM, авторы определили, что расчет интерполяционных фильтров во время компенсации движения является наиболее затратной с вычислительной точки зрения частью и реализовали эту функцию на FPGA платы Zynq. В [282] разработали программную реализацию декодера AVS3 на мобильной платформе Huawei P10. Даже с одним потоком авторы добились декодирования видео 1080p в реальном времени.

Полный программный декодер VVC/H266 предложен в [283]. Представленная реализация достигла эффективного декодирования с использованием инструкций SIMD. Авторы также исследовали параллелизм на уровне потоков с гранулярностью как на уровне кадров, так и на уровне CTU. В [284] предложили распараллеленный программный декодер VVC/H266, достигающий средней скорости декодирования в 23,3 FPS на видеопоследовательностях класса А (разрешение 4K с битовой глубиной 10 и форматом YUV420). Другой программный декодер VVC в реальном времени был предложен в [285], где авторы достигли скорости декодирования более 60 FPS видео 4K с помощью оптимизации SIMD, многоуровневого параллелизма и эффективного выбора между 8- и 16-битными кодовыми путями.

Внутрикадровое предсказание

Общую сложность стандартного кодера можно уменьшить, отключив механизм компенсации движения и используя режим только внутрикадрового предсказания. В таком случае накладные расходы на межкадровое предсказание равны нулю, а большая часть вычислительной нагрузки ложится на преобразование DCT и квантование, внутрикадровое предсказание, энтропийное кодирование и внутрикадровую фильтрацию.

В [286] предложили стратегию принятия решений для раннего разделения CU и сокращения решений в блоке внутрикадрового предсказания кодека HEVC/H265 на основе оценки изменений распределения скорости работы. Предложенный комбинированный метод улучшил время кодирования

приблизительно на 50% при увеличении BD-Rate всего на 0,6%. В [287] предложили двухэтапную стратегию принятия решений в блоке внутрикадрового предсказания, что улучшило время кодирования на 60% за счет увеличения BD-Rate на 1,0%.

По сравнению с HEVC/H265 сложность алгоритмов внутрикадрового предсказания в VVC/H266 значительно возросла за счет расширения числа блоков и направлений предсказания. Например, в [288] снизили сложность внутренней точности VVC/H266, предложив схему разделения CTU (*аббр. от англ. Coding Tree Unit*, элемент дерева кодирования) с низкой сложностью и выбора режима внутреннего предсказания, что улучшило время кодирования на 63% за счет увеличения BD-Rate на 1,93% по сравнению с эталонным кодером VTM. В [289] решена проблема возросшей сложности разделения CTU путем отсечения избыточных разделов и предварительного принятия решения о направлении двоичного/троичного разделения. Это значительно сократило количество режимов для поиска, что привело к сокращению времени кодирования на 41% при увеличении битрейта на 0,84% по сравнению с VTM. В исследовании [290] предложен метод снижения сложности внутрекадрового предсказания VVC/H266 путем отсечения и раннего завершения неважных режимов предсказания. Авторы добились сокращения времени кодирования до 53% за счет увеличения BD-Rate на 1,08%. В [291] предложена настраиваемая модель принятия решений для разделения CU кодека VVC/H266, позволяющая осуществлять раннее завершение данного процесса. Авторами заявлено, что при этом экономия времени кодирования составила от 23 до 68% за счет увеличения BD-Rate на 0,56–2,6%. Метод глубокого обучения для прогнозирования разделения CU кодека VVC/H266 был предложен в [292]. Авторам удалось сократить общее время кодирования на 45–67% при увеличении BD-Rate всего на 1,3–3,2%.

Существует достаточно большое количество отечественных публикаций, улучшающих алгоритмы внутрикадрового предсказания в стандартных кодеках. В основном исследования направлены на разработку быстрых

алгоритмов выбора режимов предсказания [293, 294], размера блока пространственного предсказания [295], методов уменьшения интенсивности видеопотока [296] и компактного представления базовых кадров [297], устранения информационной избыточности опорных кадров [298], а также на разработку инструментов для снижения вычислительной сложности и энергопотребления аппаратной реализации типовых кодеков [299].

Кроме этого, существует ряд публикаций, где представлены результаты аппаратной реализации механизмов внутрикадрового предсказания для сокращения времени кодирования. Так в [300] предложена реализация кодера внутрикадрового предсказания HEVC/H265 на базе ASIC и FPGA, достигающая скорости кодирования 30 FPS для видео разрешения 4K. Кодер является вычислительно масштабируемым, что позволяет компенсировать более низкую эффективность сжатия за счет более высокой пропускной способности, выбирая более простые методы оценки скорости-искажения и предварительного выбора режима.

Авторы в исследовании [301] предложили ускоренный FPGA кодер HEVC/H265, который работает на сервере Nokia AirFrame – 14-ядерном процессоре Intel Xeon с двумя платами Arria 10 FPGA, подключенными через интерфейс PCIe (*аббр. от англ. Peripheral Component Interconnect express* – интерфейс периферийных компонентов). Алгоритм CABAC и логика взаимодействия оператора и беспилотной системы обрабатываются на CPU из-за своей последовательной природы. Авторы использовали WPP и параллельную обработку на уровне изображения для повышения параллелизма. Установка способна кодировать видео с разрешением 4K со скоростью 120 кадров в секунду.

В [302] предложен кодер внутрикадрового предсказания HEVC/H265, реализованный одновременно на ASIC и FPGA. Вычислительная сложность снижается за счет немного более высокого битрейта и снижения качества. Предложенная конвейерная архитектура упрощает предварительный выбор режима прогнозирования яркости и цветности, решение о режиме CU и

алгоритмы оценки скорости CABAC для достижения более высокой пропускной способности и меньшего количества зависимостей от данных.

В исследовании [303] предложен гибкий кодер внутрикадрового предсказания HEVC, реализованный на ПЛИС. Кодер разработан как настраиваемая структура базовых элементов обработки, которые реализуют функциональность кодера, он реализован как четырехступенчатая конвейерная архитектура. Авторы распараллеливают алгоритм, минимизируя зависимости данных между соседними блоками при внутрикадровом предсказании.

Энтропийное кодирование и преобразование

Процессы энтропийного кодирования и декодирования представляют собой проблему из-за их последовательной природы и высокой расхожимости ветвей [275]. По этой причине в [301] в кодере HEVC/H265 на базе FPGA кодирование CABAC совместно с другой логикой взаимодействия оператора и беспилотной системы оставлено на стороне CPU. Аналогично, декодер HEVC/H265 на базе GPU представленный в [275] также оставляет декодирование CABAC на стороне CPU, в то время как остальная часть алгоритма реализована на GPU. Несмотря на последовательную природу CABAC, были предприняты попытки уменьшить его зависимости от данных [304, 305] и увеличить параллелизм [306]. Кроме этого, не было опубликовано никаких работ по исследованию вычислительной сложности этапа энтропийного кодирования специально для кодека VVC/H266. Однако, поскольку и HEVC/H265, и VVC/H266 используют алгоритм CABAC, улучшения, внесенные для этапа энтропийного кодирования HEVC/H265, вероятно, будут применимы также в контексте VVC/H266.

Существует достаточно большое количество отечественных публикаций, улучшающих методы преобразований и энтропийного кодирования. Так в [307] представлен метод обработки базовых кадров на основе диагонально-неравномерного позиционного кодирования трансформант в неравновесном базисе оснований и показано, что сложность метода в основном определяется числом операций двумерного ДКП. В исследовании [308] доказана

потенциальная возможность дополнительного повышения степени сжатия путем описания коэффициентов ДКП двумерными полиадическими числами в результате чего обеспечивается сокращение структурной избыточности.

В [309] предложен подход к формированию квантованного описания трансформанты сегмента аэрофотоснимка на основе двухуровневого представления динамического диапазона значений трансформанты, что позволяет сократить комбинаторную избыточность. В свою очередь исследование [310] направлено на повышение эффективности этапа энтропийного кодирования за счет использования иерархического перечислительного кодирования. Экспериментальные результаты показали, что предложенный метод дает лучшую степень сжатия по сравнению с простым энтропийным кодированием с использованием метода Хаффмана.

В [311] предложен метод сжатия трансформант (матрицы коэффициентов ДКП) на основе ортогональных преобразований и устранения комбинаторной избыточности в трансформантах преобразований, а в [312] технология сжатия бинарного описания трансформант в рамках позиционного структурно-векторного кодирования последовательностей одномерных длин серий двоичных областей. Механизмы совершенствования этапа преобразования также рассмотрены в ряде работ отечественных ученых [313-316].

1.4.3 Роль машинного и глубокого обучения

Как и во многих других областях, машинное обучение также используется для решения сложных задач оптимизации при сжатии изображений и видео. Можно разделить приложения машинного обучения при сжатии видео на две категории [317, 318]:

1. Новые схемы сжатия, созданные преимущественно с использованием методов глубокого обучения;
2. Использование инструментов глубокого обучения в традиционных кодеках для ускорения сложных этапов обработки.

Совместно с достижениями в области машинного обучения неуклонно растет спектр приложений машинного зрения. Ожидается, что предстоящие улучшения задержки в сетях 5G еще больше ускорят внедрение машинного зрения в системах с низкой задержкой [319]. Таким образом, растет потребность в сжатии, оптимизированном специально для алгоритмов машинного зрения.

С точки зрения машинного зрения может быть полезным сжимать и передавать признаки, извлеченные из исходных пикселей, а не сами пиксели. Такой подход известен как «сжатие признаков». Для приложений визуального поиска разработаны два стандарта MPEG: CDVS (*аббр. от англ. Compact Descriptors for Visual Search*, компактные дескрипторы для визуального поиска) [320] и CDVA (*аббр. от англ. Compact Descriptors for Visual Analysis*, компактные дескрипторы для визуального анализа) [321]. CDVS определяет набор созданных вручную дескрипторов и конвейер обработки для обеспечения лучшей воспроизводимости и взаимодействия между приложениями. CDVA еще больше расширяет концепцию CDVS, включая глубокие признаки наряду с созданными вручную и используя временную избыточность между видеокадрами. Существуют три реализации CDVS в реальном времени, достигающие 98 [322], 144 [323] и 39 [262] мегапикселей в секунду на графических процессорах настольного уровня, соответственно. По сравнению с другими реализациями, результаты относительно медленные, и для снижения вычислительной сложности CDVS и CDVA требуются дополнительные исследования.

Недавно были предложены сквозные фреймворки, основанные на идее автокодировщика, специально нацеленные на сжатие для систем машинного зрения [319, 324, 325]. В работе [324] авторы достигли пропускной способности всего 14 мегапикселей в секунду на высокопроизводительном настольном GPU. Однако, у предложенного метода есть большой потенциал, который превосходит VVC/H266 с точки зрения точности машинного зрения.

Другое значение «сжатия признаков» было дано работами, которые

предлагают сжимать промежуточные глубокие признаки [326]. То есть, вместо сжатия самого визуального сигнала, часть целевой зрительной нейронной сети выполняется на исходном устройстве, за которым следует глубокое сжатие признаков, передача, декомпрессия признаков и вычисление остальной части нейронной сети.

Подведем промежуточные итоги. Достижение низкой задержки является сложной задачей для видеосистем реального времени с высоким разрешением.

Авторы [250, 255] достигли низкой задержки по беспроводной сети с помощью своих систем потоковой передачи в VR видеоиграх. Настольная система потоковой передачи [250] смогла достичь низкой задержки по беспроводной сети (даже сверхнизкой задержки при низкой активности экрана при использовании проводной сети) для разрешения 4K. Такая низкая задержка стала возможной благодаря выделенным аппаратным кодерам в графическом процессоре и довольно простой природе системы совместного использования экрана, состоящей всего из двух соединенных между собой компьютеров на коротком расстоянии.

Собранные результаты задержек M2P предполагают, что текущее поколение беспроводных сетей не подходит для приложений с низкой задержкой на большом расстоянии [251]. Аналогичным образом, достижение низкой задержки также проблематично для сложных систем, включающих внешние камеры или дополнительные этапы обработки видео [256]. Кроме того, большинство систем обработки видео 360°, также сообщают о задержке M2P, что подчеркивает важность задержки для систем виртуальной реальности.

Общая тенденция к улучшению скорости кодирования заключается в снижении зависимостей данных для параллельной обработки. В случае программных решений кодирования видео наиболее распространены комплексные модели обработки (такие как CPU+GPU или CPU+FPGA), чем в категории кодирования неподвижных изображений, вероятно, из-за более сложной природы алгоритмов кодирования видео. Обычно энтропийное кодирование выполняется на стороне CPU. Реализации, использующие

межкадровое предсказание, в основном сосредоточены на оптимизации этапа оценки и компенсации движения, который, как было показано, является наиболее вычислительно затратной частью алгоритмов.

Новейший стандарт VVC/H266 демонстрирует многообещающую производительность декодирования. Однако на текущий момент нет ни одного кодека реального времени, вероятно, из-за высокой вычислительной сложности кодирования VVC/H266 и его ранней стадии внедрения.

Подход глубокого обучения к снижению сложности кодирования HEVC/H266 [279] показывает самое низкое энергопотребление среди всех рассмотренных кодеров HEVC/AVC, реализованных на базе ASIC. Инструменты глубокого обучения также использовались [266, 292] для снижения сложности алгоритмов компенсации движения и внутрикадрового предсказания в кодеке VVC/H266, соответственно.

Как было показано выше, передача данных между несколькими устройствами требует буферизации и может вызывать задержки в несколько кадров. Конечно, сеть также вносит большой вклад в задержку. В частности, беспроводные сети более непредсказуемы, поскольку пропускная способность канала в большей степени зависит от близости устройства, чем в проводных сетях. Хотя высокоскоростные кодеры и декодеры существуют, их применение в реальных системах все еще довольно ограничено. Это говорит о том, что скорость кодирования не является основным узким местом задержки современных видеосистем.

Резюме рассмотренных реализаций

1. Уменьшение задержки. Основным подходом к уменьшению задержки кодирования видео, является увеличение пропускной способности кодирования, поскольку эти цели обычно идут рука об руку. Основными направлениями по улучшению пропускной способности современных видеокодеков являются конвейерная аппаратная архитектура [327], снижение вычислительной сложности [328], увеличение параллелизма [275], увеличение вычислительных ресурсов [329] и использование аппаратных ускорителей [301,

330].

2. Ограничения современного уровня техники. Большинство рассмотренных реализаций (за исключением конвейерных архитектур ASIC и FPGA) рассматривают кодирование целых кадров. Пример кодирования субкадров AVC/H264 с программируемым медиапроцессором был представлен в [331]. Авторам удалось сократить задержку с одного кадра (33 мс) до всего лишь 2 мс, используя подход кодирования субкадров, что указывает на большой потенциал кодирования субкадров даже для программных реализаций. Кодирование целых кадров может быть необходимым для сохранения высокой пропускной способности системы кодирования при использовании оборудования на параллельной архитектуре, например, графических процессоров [275, 332].

При ускорении процесса кодирования на параллельном оборудовании наиболее распространенным шагом, который остается выполнить на стороне CPU, является энтропийное кодирование. Последовательная природа большинства алгоритмов энтропийного кодирования делает их параллельную реализацию сложной. Несмотря на то, что были предприняты успешные попытки распараллелить и ускорить процесс на оборудовании [304], параллельные программные реализации по-прежнему, по-видимому, либо выполняют энтропийное кодирование на CPU [301], либо реализуют менее сложный параллельный алгоритм [225, 328].

Подводя итог узким местам каждой категории сжатия, самые быстрые алгоритмы кодирования неподвижных изображений не имеют высокой степени сжатия. Поэтому их использование ограничено только сетями с высокой пропускной способностью. Стандартные видеокодеки достигают высокой степени сжатия за счет повышенной вычислительной сложности. Хотя некоторые реализации достигают очень высоких скоростей кодирования, они обычно требуют значительной вычислительной мощности. Хотя мезонинное кодирование кажется перспективным решением для кодирования видео с низкой задержкой, необходимы дополнительные исследования, поскольку

количество реализаций слишком мало, а их производительность ограничена.

3. Вычислительные требования. Высокопроизводительные реализации стандартных видеокодеков, таких как AVC/H264 или HEVC/H264, требуют значительного количества вычислительных ресурсов и мощности [275, 301, 333, 334]. Декодирование новейшего стандарта VVC/H266 было продемонстрировано при высокой пропускной способности на потребительских процессорах [283, 335]. Реализация совместной обработки [264] позволила достичь скорости кодирования видео 60 FPS разрешением 4K на высокопроизводительной встраиваемой платформе Zynq-7045 за счет использования как CPU, так и ПЛИС, что делает ее, возможно, самым легким решением для высокопроизводительного сжатия HEVC/H264 на текущий момент.

Из-за растущей сложности современных видеокодеков (таких как VVC/H266) приложения, критичные к задержке, могут потребовать переформулирования целей проектирования систем сжатия видео, при этом задержка должна быть основной целью. После достижения цели по задержке могут быть сделаны улучшения в направлении лучшего качества или коэффициента сжатия. Перспективным стандартом в этом отношении, по мнению автора, является недавно представленный JPEG XS, который соответствует, с одной стороны, критериям высокого качества, а с другой - низкой задержки. Однако научных публикаций об этом кодеке на сегодняшний день недостаточно при отсутствии открытой реализации.

Глубокое обучение использовалось для ускорения сложных шагов существующих алгоритмов [266, 279, 292, 336]. Хотя вычислительная сложность выполнения нейронных сетей очень высока, она все равно может быть ниже, чем некоторые части современных сложных кодеков, таких как ASTC или VVC/H266. С увеличением производительности оборудования и большим количеством исследований в области быстрого выполнения нейронных сетей этот метод может стать жизнеспособным для достижения низкой задержки кодирования.

1.5 Гибридные сети связи

как основа взаимодействия БАС с глобальным покрытием

Новые технологии в области взаимодействия оператора с беспилотными системами в последнее время находятся в центре внимания многих учёных и крупных корпораций. Надежная связь с низкой задержкой для БАС является основой для обеспечения безопасных операций управления и контроля, облегчения передачи данных с датчиков и поддержки приложений, размещенных на вычислительных платформах БПЛА.

Венчурные инвесторы, готовые вкладывать средства в современные технологии воздушной мобильности, а также правительства делают ставку на беспроводную индустрию в попытке найти варианты для нерешенных задач по обеспечению критически важных каналов связи и управления для БАС. Прорыв в области надежности может убедить законодателей ослабить регулирование гражданских полетов, открыв путь для новых вертикальных рынков. В результате, сотовые коммуникации с участием БАС [337] вызвали всплеск интереса, следуя двум философиям, которые можно охарактеризовать как «что БАС могут сделать для сетей» и «что сети могут сделать для БАС» [338]. Вторая философия, сначала преобладавшая в форумах по стандартизации, вызвала параллельный поток исследований, направленных на поддержку конечных устройств БАС через сотовые сети.

Независимо от того, выступают ли БАС в качестве получателей или поставщиков данных, стремление достигнуть «летающего соединения» сталкивается с серьезными препятствиями. Поскольку наземные сотовые базовые станции обычно наклонены вниз, БАС принимают сигнал только верхними боковыми лепестками антенны и испытывают резкие колебания сигнала. Летая над зданиями, БАС принимают/создают сигналы, мешающие прямой видимости (LoS), от/к множеству сот, что препятствует правильному декодированию чувствительных к задержкам сигналов C2 и заглушает более слабые сигналы наземных пользователей (GUE) [339]. Сильные колебания уровня сигнала, с которыми сталкиваются БАС, в сочетании с их высокой

скоростью и быстрыми маневрами, создают проблемы управления мобильностью, вызывая частые и иногда ненужные переключения. Технические решения этих и ряда других проблем были внедрены в 4G/LTE для работы с небольшим количеством подключенных БАС. Однако, как прогнозируется, по мере их распространения сотовая связь БАС будет испытывать трудности с «взлетом», полагаясь исключительно на сеть, построенную для наземных устройств.

Альтернативу уплотнению наземной сети БАС способны составить неназемные сети NTN (*аббр. от англ. Non-Terrestrial Networks*), реализуемые, например, через группировки спутников на низкой околоземной орбите LEO (*аббр. от англ. Low Earth Orbit, низкая околоземная орбита*). Хотя NTN в основном предназначены для обслуживания районов с недостаточным покрытием, они также могут быть использованы для расширения городской связи, например, когда оператор наземной сети (TN) арендует спектр и инфраструктуру у оператора NTN. Действительно, текущие усилия 3GPP по интеграции TN и NTN позволят мобильным устройствам беспрепятственно переключаться с одного сегмента на другой [340].

В качестве еще одного перспективного направления поддержки дистанционного взаимодействия БАС с глобальным покрытием получила свое развитие идея объединения спутниковых и наземных сетей связи с учетом фундаментальных характеристик обеих систем, которые получили название *гибридные орбитально-наземные сети связи* (HSTNs). Хотя и спутниковые, и наземные сети могут обеспечивать высокую скорость передачи данных, спутники способны расширить зону покрытия на обширные территории, включая сельские, городские и океанические районы. Объединяя преимущества обеих сетей, интегрированная архитектура спутниковых и наземных сетей является многообещающей для сетей 6G, поскольку обеспечивает глобальное покрытие и доступ в Интернет, а также повсеместную поддержку связи для БАС. HSTNs имеют ряд преимуществ, включая, но, не ограничиваясь следующими:

1. Разнообразие предоставляемых услуг, таких как многоадресная рассылка и широковещательная трансляция.
2. Расширенное покрытие с наилучшей возможной связью и стоимостью.
3. Оптимизация ресурсов за счет выбора наилучшей доступной сети.
4. Доступность услуг для критически важных и новых видов связи, таких как Интернет вещей (IoT), морская, авиационная и железнодорожная связь.
5. Повышение производительности блокчейна за счет решения проблемы масштабируемости, вызванной ограниченным увеличением размера блоков и эффективных соседей из-за фиксированной пропускной способности на каждом узле.

Помимо вышеизложенного заслуживают внимания возможности глобально интегрированной сети «космос–воздух–земля–море» (SAGSINs), которая объединяет все уровни коммуникационной инфраструктуры. SAGSINs соединяет наземные, воздушные, водные и космические сети с помощью унифицированных стандартов. В отличие от традиционных стационарных наземных базовых станций LAP и NAP, она действует в качестве воздушных базовых станций и ретрансляционных узлов, обладая такими преимуществами, как возможность повторного развертывания, высокая гибкость и более низкие затраты.

Использование отмеченных выше технологий для взаимодействия оператора с беспилотной системой открывает широкие возможности их применения в новых сферах и приложениях, недоступных ранее (табл. 1.12).

Резюмируя вышеизложенное, отметим, что, осознавая существующие на сегодняшний день препятствия и признавая важность воздушной связи, сообщество исследователей в области беспроводных технологий приложило все усилия для внедрения и использования гибридных сетей, способных стать основой для FPV с глобальным покрытием.

Таблица 1.12 – Сферы применения БАС в условиях гибридных сетей связи²²

Название	Полное название	Уровни сети	Применение в БАС
HSTNs	Гибридные орбитально-наземные сети	Спутник + Земля	Дроны в гибридных зонах покрытия
SAGSINs	Интегрированные сети «космос-воздух-земля-море»	Космос + Воздух + Земля + Море	Глобальная интеграция, роевые БАС над океаном
NTN	Не наземные сети	Любые внеземные (LEO, HAPS)	Связь для БАС в районах без инфраструктуры

В таблице 1.13 представлены технические характеристики, которые подтверждают, почему гибридные сети важны для FPV.

Таблица 1.13 – Сравнение технических характеристик каналов связи для БАС²³

Параметр	Наземные сети (4G/5G)	Спутниковые сети (LEO/GEO)	Гибридные сети
Зона покрытия	До 10–30 км от БАС	Глобальная (GEO) или ~1000 км (LEO)	Глобальная с возможностью локального усиления
Задержка (латентность)	1–10 мс (5G)	500–700 мс (GEO), 20–50 мс (LEO)	10–100 мс (зависит от канала)
Пропускная способность	До 10 Гбит/с (5G mmWave)	До 100 Мбит/с (LEO), меньше в GEO	Адаптивная (выбор канала по задаче)
Надежность	Зависит от инфраструктуры	Высокая, но зависит от погоды	Максимально высокая (есть резервирование)
Уязвимость к потерям сигнала	Высокая (лес, горы, море)	Меньше, но есть проблемы с тенью	Минимальная за счет переключения
Энергопотребление на борту БПЛА	Низкое/среднее (LTE/5G NR)	Среднее/высокое	Оптимизируется в зависимости от канала
Задержка при переключении каналов	Нет (один канал)	Нет	< 100 мс (при наличии логики балансировки)
Стоимость трафика и оборудования	Низкая/средняя	Высокая	Средняя (затраты окупаются устойчивостью)

Итак, учитывая выделенные в таблице 1.13 преимущества гибридных сетей, рассмотрим более подробно их ключевые характеристики и возможности для процесса FPV БАС.

²² Составлено автором²³ Составлено автором

1.5.1 Сети NTN

Non-Terrestrial Networks (*пер. с англ.* неназемные сети или внеземные сети связи) – термин, используемый 3GPP для описания сетей связи, работающих над поверхностью Земли. Эта категория включает в себя различные типы сетей, в том числе низколетящие БАС, НАР (высотные платформенные станции) и спутники связи. В последние годы спутники играют важную роль в предоставлении услуг передачи данных и связи, особенно в отдаленных и труднодоступных районах. Существующим беспроводным технологиям пятого поколения (5G), основанным на наземных станциях, сложно обеспечить адекватное покрытие в крайне отдаленных территориях и при этом соответствовать строгим стандартам качества обслуживания (QoS), предъявляемым к наземным сетям. Поскольку летающие узлы могут функционировать на значительно больших высотах по сравнению с наземными методами зондирования, платформы NTN и высота их компонентов призваны создать бесшовную и эффективную инфраструктуру связи, охватывающую наземные и внеземные сети, а также улучшая связь для широкого спектра приложений и пользователей [341]. Другими словами, связь NTN расширяет применение связи 5G с наземной связью до космической/воздушной связи. Кроме того, NTN могут легко обеспечить многоадресную связь с высокой скоростью передачи данных и низкой задержкой на больших территориях, что позволяет реализовать массовую связь между устройствами (mMTC) и усовершенствованную мобильную широкополосную связь (eMBB). Также, несколько NTN могут быть соединены между собой и/или подключены к существующим наземным сетям для обеспечения непрерывного и повсеместного беспроводного покрытия, что приближает нас к эре связи «все, всегда и везде» [342].

Для обеспечения полностью глобальной беспроводной связи в любом месте и в любое время, которая позволит реализовывать взаимодействие оператора и БАС с повсеместным покрытием, беспроводные сети должны беспрепятственно сочетать NTN с наземными сетями. В отличие от наземных

сетей связи, которые могут подвергаться сбоям в работе из-за стихийных бедствий или действий злоумышленников, NTN гарантируют бесперебойную работу действительно важных, критически необходимых приложений. Также использование NTN выгодно в случаях перегрузки наземных сетей во время специальных мероприятий, таких как спортивные соревнования. В целом, согласно прогнозам, NTN имеют все шансы повысить функциональность беспроводных сетей с точки зрения покрытия, пропускной способности, емкости системы, надежности обслуживания, доступности, энергопотребления и плотности соединений [343].

Использование низколетящих БАС в сочетании с NTN является особенно перспективной областью исследований. Эти БАС обладают высокой мобильностью и часто поддерживают четкую линию прямой видимости с наземными платформами и спутниками. Когда БАС перегружает свой трафик на ближайший спутник LEO через NTN, перебои в нисходящем канале связи для БАС могут быть сведены практически до 0% в наземных сотовых сетях [344]. Кроме того, этот подход способен обеспечить покрытие восходящего канала связи, и, наоборот, наземные UE имеют все шансы повысить эффективность восходящего канала связи за счет снижения коэффициента пропадания сигнала. Симбиотическая связь между БАС и NTN обладает значительным потенциалом увеличения производительности и расширения возможностей подключения для более широкого спектра приложений и случаев использования [345].

На рисунке 1.18 [245] показана архитектура спутниковой системы NTN, состоящей из спутников для связи и БАС для ретрансляции информации. Набор наземных устройств (GD) развернут заранее в пределах некоторой области для выполнения конкретных задач, например, сбора данных. БАС взаимодействуют с оператором через LEO, который получает команды от удаленного наземного центра, для отслеживания заданной траектории дрона и пересылает собранные им данные на наземный шлюз для обработки.

Процесс выполнения поставленной задачи по сбору данных в рамках

структуры «Спутник–БАС» может быть охарактеризован в трех этапах.

Во-первых, центр управления должен предоставить эталонную траекторию для сбора данных по целевым GD.

Во-вторых, БАС взаимодействует с оператором для отслеживания этой траектории на основе своего текущего состояния.

В-третьих, БАС собирает данные с GD и загружает их на спутник для передачи на наземный шлюз.

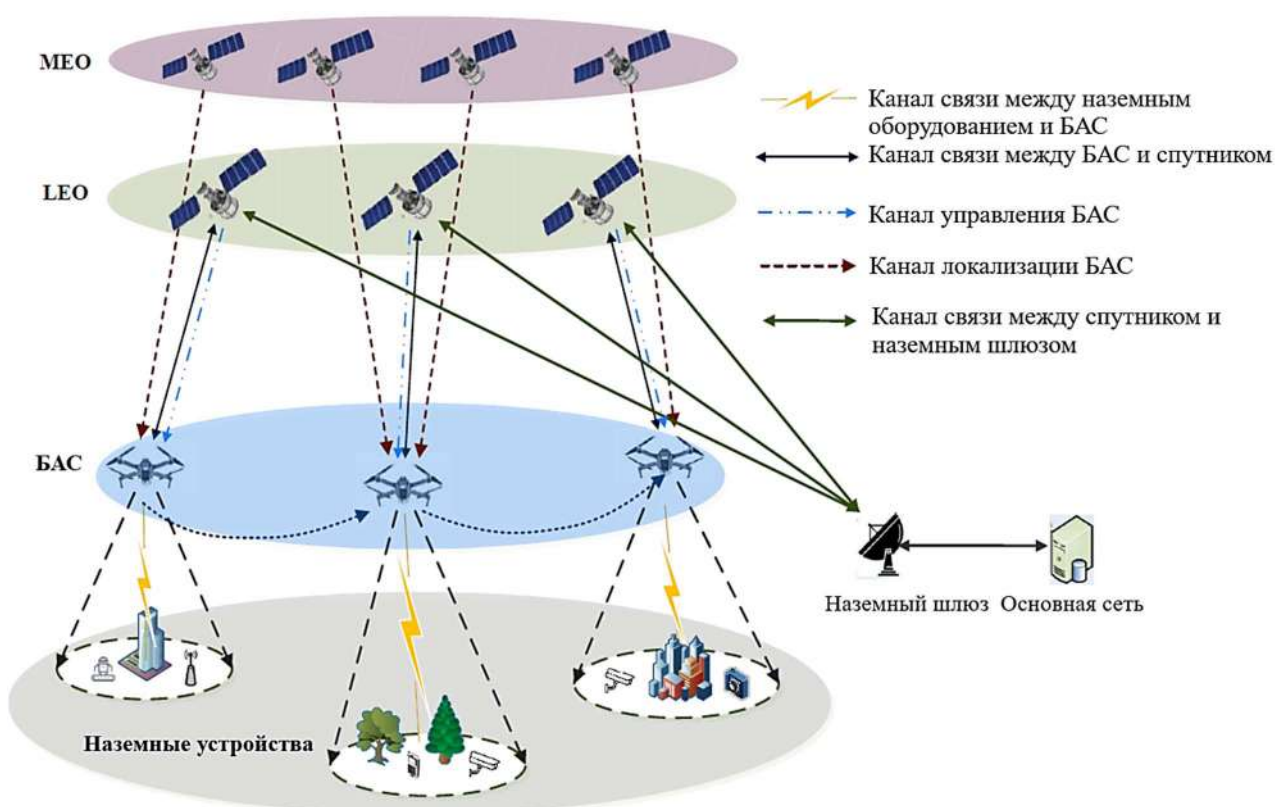


Рисунок 1.18 – Сценарий взаимодействия оператора и беспилотной системы для сбора данных

Для обеспечения стабильности взаимодействия оператора с беспилотной системой и выполнения задачи необходимо достаточно часто отбирать данные о состоянии БАС и передавать их в удаленный центр управления для расчета соответствующих действий контроля. Такая система может быть описана с помощью беспроводной сетевой структуры для взаимодействия оператора с беспилотной системой, представленной на рисунке 1.19 [346], где исполнительный механизм, датчик и устройство удаленного управления разделены и соединены беспроводной сетью.



Рисунок 1.19 – Структура взаимодействия оператора и БАС

Исполнительный механизм расположен на БАС для выполнения команд взаимодействия оператора (команд движения БПЛА). Точные GD также могут повысить эффективность локализации БАС за счет выполнения операций зондирования. Таким образом, результат зондирования датчика определяется совместно на основе информации GNSS (от MEO) и измерений GD. Контроллер находится в удаленном облаке, где на основе результатов датчика рассчитываются команды движения БПЛА, которые передаются на исполнительный механизм.

По мнению ряда экспертов перспективным является интеграция сетей TN-NTN, состоящих из наземной сотовой сети в сочетании с группой спутников LEO [347, 348]. Помимо автономных TN, предназначенных в первую очередь для использования в 2D-режиме, интегрированная система TN-NTN может обеспечить надежную передачу данных и взаимодействие между оператором и несколькими БАС. Эти услуги будут гарантированы в определенных 3D-зонах – воздушных коридорах или траекториях путевых точек – где конечные устройства смогут летать на разных высотах.

На рисунке 1.20 [349] представлена иллюстрация интегрированной системы TN-NTN состоящей из наземного и спутникового сегментов, обслуживающих GUEs и БАС в городской местности.

На рисунке 1.20 представлена сотовая сеть TN, согласно определению,

приведенному в 3GPP. Также предполагается наличие сегмента NTN, который работает через спутник LEO, вращающийся на орбите на высоте около 600 км. По мере роста проникновения БАС в различные сферы деятельности оператор TN, намеревающийся предоставлять воздушную связь, может принять решение арендовать инфраструктуру и спектр у оператора NTN. Хотя последний в первую очередь будет разворачивать и эксплуатировать группировки LEO для покрытия в настоящее время не обслуживаемых районов, их врожденная мобильность делает их доступными и в городах, что создает возможности в сценарии с несколькими операторами.



Рисунок 1.20 – Иллюстрация интегрированной системы TN-NTN

Итак, в рассматриваемой схеме есть портативные GUEs и БАС, каждый из которых может подключаться как к TN, так и к NTN. Опишем более подробно представленную схему.

Наземная сеть: базовые станции развернуты по шестиугольной схеме и связываются со своими соответствующими группами подключенных пользователей по нисходящему и восходящему каналам. Места развертывания состоят из трех соседних базовых станций, каждая из которых покрывает один сектор, т.е. ячейку TN, охватывающую угловой интервал 120° . Для межсайтового расстояния ISD_{TN} площадь ячейки TN определяется как $A_{TN} = \sqrt{3} \cdot ISD_{TN}^2/6$.

NTN: Сегмент спутника LEO генерирует несколько лучей для обслуживания пользователей как в нисходящем, так и в восходящем канале.

Лучи направлены на землю в виде шестиугольника, каждый из которых создает одну соответствующую ячейку NTN. Расстояние между соседними лучами рассчитывается в соответствии с полушириной луча (HPBW) диаграммы излучения каждого луча. Из-за своего орбитального движения спутник LEO виден под разными углами возвышения с точки зрения TN, и, соответственно, пятно его лучей, движущихся по Земле, освещает разные области. В данном случае отдельного внимания заслуживает то, как угол возвышения влияет на характеристики NTN, поскольку это имеет значение для плотности группировки спутников LEO, необходимой для обеспечения надежного покрытия.

Пользовательская популяция: как TN, так и NTN способны обслуживать GUEs и БАС, например, предоставляя первым данные, а вторым – данные и информацию C2. Общее количество пользователей сосредоточено в городской зоне площадью AU, содержащейся в ячейке NTN, что дает в сумме AU/ATN ячеек TN. В этой зоне GUEs расположены как на открытом воздухе на высоте $h_{out} = 1,5$ м, так и внутри зданий, состоящих из нескольких этажей, на высоте h_{in} . БАС летают на открытом воздухе на высоте $h_{БАС}$.

Распределение спектра: TN и NTN используют ортогональные полосы и частотное разделение дуплекса (FDD). Для TN и NTN номинальные частоты несущих сигналов нисходящего и восходящего каналов составляют 2 ГГц. Для TN доступная полоса пропускания полностью повторно используется во всех ячейках. Для NTN предусмотрено два коэффициента повторного использования частот (FRF), а именно: $FRF=1$, когда все частотные ресурсы полностью повторно используются во всех лучах, и $FRF=3$, когда они разделены на три набора, каждый из которых повторно используется каждые три луча.

Итак, перенаправляя трафик БАС на космический сегмент LEO, целью является обеспечение надежного покрытия связи C2 БАС без ухудшения характеристик, параллельно существующих GUEs. Проведенные тесты интегрированной системы TN-NTN показали, что у БАС, перенаправленных на NTN и летающих на высоте 150 м, количество сбоев в нисходящем канале

связи сократилось с 70% до почти нуля. БАС также демонстрируют повышение SINR в восходящем канале, если группировка спутников LEO достаточно плотная, чтобы гарантировать минимальный угол возвышения.

И в завершении обзора представляется целесообразным акцентировать внимание на оборудовании для организации гибридных сетей связи на основе NTN для FPV БАС (табл. 1.14).

Таблица 1.14 – Оборудование для построения NTN-сетей для FPV БАС²⁴

Компонент	Назначение и особенности
ELTA ELK-1882T SATCOM	Авиационный SATCOM-терминал для Ku/Ka/X диапазонов. Оснащён активной фазированной антенной (AESA), поддерживает программно-определяемую радиосвязь (SDR). Обеспечивает устойчивую связь в движении (COTM), адаптацию модуляции, автоматическое переключение между спутниками LEO/GEO.
Honeywell JetWave MCX	Терминал спутниковой связи для воздушных платформ, сертифицированный для Inmarsat Global Xpress (GEO/MEO). Обеспечивает широкополосный uplink/downlink (до 50 Мбит/с), поддерживает видеопотоки, команды взаимодействия оператора и телеметрию, способен работать в сложных погодных условиях.
MediaTek MT6825	Чипсет с поддержкой NB-IoT через спутники (LEO, GEO), совместим с 3GPP Release 17. Обеспечивает энергоэффективную связь с низкой скоростью передачи данных — идеально для малых БАС. Устойчив к эффекту Доплера и подходит для передачи телеметрии в реальном времени.
Samsung Exynos Modem 5300	5G-модем с поддержкой NTN-соединений и стандарта Rel-17. Обеспечивает компенсацию доплеровского эффекта, работу с Earth-fixed beams, переключение между ячейками спутниковой связи. Предназначен для высококомбинированных платформ, включая БПЛА и HAPS.
Phased Array Antennas	Цифровые фазированные антенные решётки (DPAAAs) с возможностью многолучевой работы. Обеспечивают точное направление сигнала без механических приводов, поддерживают электронное сканирование, малую боковую засветку. Используются на БАС, HAPS и наземных ретрансляторах.
VIAVI TM500-AS2 + TeraVM	Комплексная система для тестирования 5G-RAN и ядра в условиях NTN. Позволяет моделировать задержки, эффекты Доплера, мобильность, отказоустойчивость. Применяется для лабораторной отладки архитектур связи БПЛА перед полевыми испытаниями.
R&S CMX500 Simulator	Эмулятор спутниковых каналов связи для GEO/LEO/MEO. Поддерживает тестирование фазовых и частотных искажений, замираний сигнала, доплеровских смещений частоты, а также процессов межсотовой передачи. Полностью совместим с тестами для 5G NR и NTN по 3GPP.
Mavenir NTN RAN solution	Облачная сетевая архитектура 5G NTN, включающая ядро, RAN и SDR-интеграцию. Поддерживает прозрачную и регенеративную полезную нагрузку, а также многоуровневое оркестрирование. Готова к эксплуатации в гибридных сетях с наземным, воздушным и спутниковым сегментом.

²⁴ Составлено автором

Что касается Российской Федерации, то АО «РЕШЕТНЕВ» при поддержке Государственной корпорации «Роскосмос» с 2022 г. приступило к инициативной разработке отечественной сети NTN – проекта Гибридной системы связи (ГСС). Система разрабатывается как национальная, доверенная инфраструктура спутниковой связи с учётом жёсткого требования о размещении наземных станций исключительно на территории Российской Федерации. При этом она призвана обеспечивать телекоммуникационные услуги на любой точке земного шара, включая труднодоступные районы и акватории в арктических и антарктических широтах. Проектирование ГСС выполняется на основе принципов «Secure by Design» (*пер. с англ.* безопасность в проектировании), что гарантирует изначальную безопасность и доверенность каналов связи. Работы ведутся в кооперации с промышленными и специализированными предприятиями ракетно-космической отрасли, а также с ведущими техническими вузами, располагающими конструкторскими бюро и опытными производствами. Все ключевые узлы и компоненты системы разрабатываются с учётом возможности их последующей локализации производства на территории Российской Федерации.

1.5.2 SAGSINs – интегрированная сеть «космос-воздух-земля-море».

Для компенсации недостатков наземной сети с целью обеспечения более качественных услуг при реализации сценариев связи «4А» (*от англ.* Anytime, Anywhere, Anyone, Anything – в любое время, в любом месте, для любого пользователя и для любой информации) сегодня активно развивается новая вертикальная гетерогенная сетевая архитектура, называемая интегрированной сетью «космос-воздух-земля-море».

SAGSINs состоит из космической, воздушной, морской, а также наземной сети. Космическая сеть включает в себя спутники геостационарной орбиты (GEO) и спутники низкой орбиты (LEO), которые обычно образуют созвездия. Воздушная сеть состоит из самолетов, беспилотных аппаратов и высотных

платформ, которые обычно выступают в виде отрядов. Морская сеть основана на таких узлах, как морские базовые станции, судна и беспилотные корабли. Наземная сеть получила широкое развитие с появлением сотовой мобильной связи, автономного вождения и Интернета вещей (IoT). Соединяя узлы в пределах определенной области с помощью коротких или длинных беспроводных каналов для построения вышеупомянутых четырех типов сетей и интегрируя составные части с помощью межсетевых каналов, SAGSINs может в полной мере воспользоваться преимуществами связи 6G благодаря массовым соединениям между удаленными узлами.

В отличие от традиционных сетей, при использовании гибридных сетей связи на основе SAGSINs для FPV БАС, ожидается, что разработчики откажутся от философии проектирования «best-effort» (максимальные усилия). Вместо этого задачи сосредоточены на достижении надежного управления сетью, обеспечении детерминированной задержки и всестороннем учете требований к качеству обслуживания и стабильности сети. SDN и NFV предлагают новые парадигмы проектирования архитектуры SAGSINs, что оказывает значительное влияние на развитие сетей будущего для взаимодействия оператора и беспилотной системы. SDN решает проблему сложности, вызванную недостаточной прозрачностью традиционных распределенных сетей, с помощью централизованного подхода к управлению. Ее основная концепция заключается в отделении плоскости управления от плоскости данных и управление сетью через программируемые интерфейсы. Контроллеры SDN могут предоставлять подробные параметры состояния сети и осуществлять точное управление ею [350]. Однако одного программного обеспечения недостаточно для полного решения проблемы сложности сетей. Текущие исследования сосредоточены на усовершенствовании программируемых аппаратных чипов и языков программирования для дальнейшего расширения возможностей SDN.

Суть NFV заключается в абстрагировании и управлении вычислительными, сетевыми и ресурсами хранения с помощью технологий

виртуализации сетей и виртуальных сетевых функций (VNF). VNF отделяет сетевые функции от базовых физических сетей, обеспечивая развертывание по требованию, и динамическое управление. Несколько VNF могут быть объединены в цепочки сервисных функций (SFC), которые динамически координируются и развертываются контроллерами SDN. Этот подход был применен для решения проблем координации и управления ресурсами в SAGSIN. Кроме того, NFV использует виртуальные сетевые платформы, чтобы сетевые узлы с вычислительными возможностями могли выполнять задачи обработки данных, тем самым продвигая пограничные вычисления и облачные вычисления.

С ростом спроса на многопользовательский доступ, проблема распределения ресурсов в SAGINs становится все более сложной. Традиционные технологии множественного доступа, такие как NOMA и SDMA, могут эффективно улучшить общие характеристики связи для FPRV БАС, но они игнорируют вопросы безопасности [351]. Многопользовательский доступ с разделением скорости (RSMA), основанный на частичном декодировании, существенным образом повышает эффективность использования спектра за счет разделения сообщений и особенно подходит для сценариев, когда оператору необходимо взаимодействовать с БАС в условиях с высоким уровнем помех или крупномасштабной связи. Безопасность физического уровня (PLS) использует физические свойства канала для обеспечения того, чтобы законные получатели могли точно декодировать конфиденциальную информацию, эффективно подавляя прослушивание со стороны неавторизованных пользователей, тем самым повышая безопасность системы и конфиденциальность данных [352].

Однако существующие на сегодняшний день исследования в основном сосредоточены на улучшении пропускной способности и энергоэффективности гибридных FSO/RF SAGINs, при этом ограниченное количество публикаций посвящено повышению безопасности в многопользовательских системах связи, особенно в сценариях с широкомасштабным доступом и сложными

требованиями безопасности. Поэтому, обеспечивая высокоскоростную связь в SAGINs, сочетание гибридных FSO/RF с технологией PLS для оптимизации распределения ресурсов и повышения безопасности стало важной проблемой, которую необходимо решать. В таблице 1.15 представлено описание особенностей управления каналами связи в SAGINs для решения задач контроля БАС.

Таблица 1.15 – Управление каналами связи в SAGINs для контроля БАС²⁵

Условия	Тип связи	Действие SAGIN	Задержка	Пропускная способность	Энергопотребление БАС
Нормальная работа наземной сети	Наземная (Ground)	Маршрутизация через базовые станции	Низкая (10–50 мс)	Средняя (1–5 Мбит/с)	Среднее
Потеря наземной связи	Спутниковая (Space)	Переключение на спутниковый канал	Высокая (300–800 мс)	Низкая (до 1 Мбит/с)	Высокое
Плохие условия спутниковой связи	Воздушная (Air: через аэростаты)	Ретрансляция через воздушные узлы связи	Средняя (50–150 мс)	Средняя (1–10 Мбит/с)	Средне-высокое
Работа в морской зоне	Морская (Sea: корабли, буи, морские платформы)	Связь через корабельные ретрансляторы или морские шлюзы связи	Средняя (100–300 мс)	Средняя (1–5 Мбит/с)	Среднее
Все каналы недоступны	Автономный режим (Offline)	Автономное выполнение миссии, удержание позиции или возврат по GPS	Отсутствует	Нет активной передачи	Низкое
Восстановление связи	Любая: Ground / Sea / Space (в зависимости от зоны)	Автоматическое восстановление приоритетного канала	Зависит от канала	Зависит от канала	Зависит от канала

На основании данных, приведенных в таблице 1.15, можно отметить следующее.

Наземная связь (Ground): используется, когда имеется стабильное соединение с наземной инфраструктурой – базовыми станциями, наземными ретрансляторами и сетями (например, LTE/5G). Это основной и приоритетный канал связи для взаимодействия оператора с беспилотной системой при нормальных условиях. Его свойства могут быть описаны следующим образом:

²⁵ Составлено автором

1. Он обеспечивает низкую задержку, вследствие чего подходит для FPV в режиме реального времени.
2. Поддерживает среднюю или высокую пропускную способность (видео, телеметрия).
3. Энергопотребление – умеренное, так как наземные станции близко и не требуют высокой мощности передатчика.

Спутниковая связь (Space): активируется при потере наземной связи, особенно при полётах на большой высоте, в океанических или удалённых районах, где отсутствует наземная инфраструктура. Данный канал имеет высокую задержку, особенно при использовании геостационарных спутников. Кроме того, для него характерным является низкая пропускная способность, которая часто ограничена передачей телеметрии и команд. Энергопотребление высокое, так как требуется передача сигнала на большую высоту.

Воздушная связь (Air): применяется при недоступности спутниковой связи, когда БАС переключается на ретрансляцию через другие летательные аппараты (дроны, аэростаты, дирижабли и т.п.). Отличительными особенностями данной связи для FPV БАС являются следующие:

- использует mesh-сети или схемы типа A2A (*аббр. от англ. Air-to-Air*).
- обеспечивается средняя задержка и средняя/высокая пропускная способность.
- энергопотребление зависит от расстояний и числа узлов – среднее или выше среднего.

Морская связь (Sea): она необходима в случае выполнения миссий над водой (патрулирование, поисково-спасательные операции и пр.). БАС может связываться с кораблями, морскими платформами или буями, оснащёнными ретрансляторами. Характеристики данного канала включают в себя:

1. Задержка средняя, зависит от качества морской инфраструктуры.
2. Пропускная способность ограничена – подходит для передачи команд и периодической телеметрии.

3. Энергопотребление умеренное, особенно при близком расположении морских ретрансляторов.

Отдельный акцент необходимо сделать на автономном режиме. Он активируется при потере всех доступных каналов связи. В этом режиме БАС выполняет миссию по предварительно загруженному алгоритму. Дрон может удерживать позицию, двигаться к точке возврата или выполнять уклонение от угроз. Автономный режим предполагает использование инерциальных систем, GPS и локальных сенсоров. Энергопотребление минимальное, так как передача данных отключена.

Переключения в системе SAGSINs происходят автоматически на основе: качества связи, сигнала RSSI, уровня ошибок/потерь пакетов, величины задержки, доступности каналов в текущем регионе. Система всегда выбирает наиболее надёжный и оптимальный канал с учётом энергопотребления, загрузки БАС и типа выполняемой миссии.

1.5.3 HSTNs – гибридные орбитально-наземные сети связи

С целью преодоления так называемого «эффекта маскирования», возникающего из-за атмосферных условий (облаков, дождя и т.д.) и наземных препятствий (например, приемника в туннеле и т.д.), которые сильно ослабляют спутниковые сигналы на Земле, были предложены гибридные орбитально-наземные сети связи (HSTNs). Учитывая характеристики и возможности HSTNs в последнее время они все больше привлекают внимание исследователей и экспертов для использования при взаимодействии оператора с БАС.

HSTNs сочетают в себе преимущества спутниковых и наземных систем связи, обеспечивая интегрированные и повсеместные беспроводные услуги. Они необходимы по ряду причин, к числу которых относятся следующие:

1. Применение технологий когнитивного радио позволяет повысить спектральную эффективность за счёт совместного и адаптивного использования слабо загруженных участков спутникового спектра в интеграции с наземными

сетями.

2. Покрытие и надежность беспроводных услуг могут быть значительно улучшены благодаря совместным усилиям и разнообразию различных сетевых узлов. Это включает интеграцию широкого спектра объектов: спутников, базовых станций, ретрансляторов и даже пользовательского оборудования.

3. Они могут поддерживать различные приложения и сценарии, требующие высокой скорости передачи данных, низкой задержки, исключительной мобильности и универсального доступа.

4. Дальняя связь, настраиваемые контексты связи и широкая зона покрытия – это лишь некоторые из преимуществ спутниковых сетей связи по сравнению с традиционными беспроводными сетями.

С учетом вышеизложенного, очевидно, что использование HSTNs для бесшовной интеграции наземной сотовой и спутниковой связи приобретает все большее значение. В таблице 1.16 представлена оценка параметров HSTNs при взаимодействии оператора с БАС.

В тоже время, практическое использование HSTNs для взаимодействия оператора и беспилотной системы является более сложной задачей по сравнению с традиционными сетями. В настоящее время было предпринято множество попыток исследовать ключевые показатели производительности HSTNs, например, вероятность сбоя, эргодическая пропускная способность и коэффициент битовых ошибок. Сочетание спутниковых и наземных систем создает гетерогенную среду, которая требует гибкости сети для удовлетворения требований к качеству обслуживания, качеству сигнала (покрытию) и условиям сети. Объединение спутниковых и наземных каналов связи нуждается в многоканальных решениях, способных эффективно распределять информацию по различным каналам.

Однако обеспечение многоканальности недостаточно, поскольку затухание канала приводит к значительному ухудшению качества сигнала и соответствующим потерям пакетов.

Таблица 1.16 – Параметры HSTN в задачах взаимодействия оператора с беспилотной системой²⁶

Параметр	Наземный сегмент	Спутниковый сегмент	Гибридный режим (HSTNs)
Доступность связи	Ограничена зоной покрытия наземных станций	Глобальное покрытие	Объединение преимуществ обоих — максимальное покрытие
Задержка	Низкая (10–50 мс)	Высокая (300–800 мс)	Адаптивная маршрутизация в зависимости от QoS
Пропускная способность	Средняя–высокая	Низкая–средняя	Оптимизация трафика: видео → земля, команды → спутник
Надёжность соединения	Высокая в зоне покрытия	Высокая, но зависит от условий среды	Повышенная за счёт избыточности каналов
Стоимость эксплуатации	Низкая (при наличии инфраструктуры)	Высокая	Умеренная — за счёт переключения и балансировки трафика
Энергопотребление	Среднее	Высокое	Динамическое управление энергией связи
Приемлемость для взаимодействия оператора и беспилотной системы в реальном времени	Да	Ограничено	Да, если приоритет у наземного канала
Отказоустойчивость	Низкая при потере базовых станций	Средняя (зависит от спутников)	Высокая — приоритизация доступных узлов
Примеры применения	Городские миссии, базы, инфраструктура	Океаны, горы, пустыни, экстремальные условия	Долгосрочные и распределённые миссии, ISR и SAR

Итак, несмотря на то, что HSTNs считаются двигателем развития спутниковой связи в современную эпоху и обладают уникальными характеристиками, они развиваются медленнее, чем наземные беспроводные сети. Основные сложности применения HSTNs для системы FPV включают в себя:

Во-первых, при проектировании траектории БАС необходимо учитывать мобильность спутников. Это особенно важно для спутниковых сетей на низкой околоземной орбите, в которых время обслуживания в зоне покрытия спутника составляет около 15 минут.

²⁶ Составлено автором

Во-вторых, наземные пользователи могут обслуживаться как наземными, так и соединениями через БАС в HSTNs, что отличается от большинства существующих исследований по проектированию траекторий БАС, где рассматривается только соединение с БАС.

В-третьих, поскольку БАС имеют ограниченные энергетические ресурсы и пропускную способность канала связи, не каждый запрос на передачу может быть удовлетворен. Для HSTNs необходима балансировка трафика, но в тоже время сложно выполнять динамический выбор канала связи в условиях неизвестной мобильности пользователей.

В-четвертых, высокая мобильность HSTNs, приводит к неопределенности местоположения мобильных пользователей. Эта высокая мобильность, с точки зрения всех разнородных компонентов, составляющих HSTNs, приводит к частым переключениям и необходимости использования различных схем передачи для обеспечения бесперебойной связи и других функций. Частые передачи затрудняют обеспечение маршрутизации, а сеть становится уязвимой для помех, которые трудно устранить из-за широкой зоны покрытия.

Таким образом, резюмируя результаты проведенного исследования, в таблице 1.17 представлены результаты сравнения технических параметров сетей HSTNs, SAGSINs и NTNs для FPV БАС.

HSTNs – представляют собой гибридную архитектуру, объединяющую наземные, воздушные и спутниковые сегменты. Это обеспечивает сочетание низкой задержки (за счёт наземных и HAPS-каналов) и глобального покрытия (за счёт сегментов LEO/MEO/GEO). HSTNs наиболее эффективны в городских и пригородных зонах с развитой инфраструктурой, но при этом позволяют оператору взаимодействовать с БАС и в удалённых районах, где наземная сеть отсутствует. Основные трудности связаны с балансировкой трафика и динамической маршрутизацией в условиях высокой мобильности.

Таблица 1.17 – Сравнительная таблица технических характеристик FPV БАС на базе HSTNs, SAGSINs и NTN²⁷

Характеристика	HSTNs	SAGSINs	NTNs
Высота платформы / связи	18 км (HAPS, БПЛА) – 36 000 км (LEO/MEO/GEO)	0–36 000 км (интеграция наземных сетей, HSTNs и спутников)	500–36 000 км (LEO, MEO, GEO)
Тип архитектуры	Гибрид: наземные станции + воздушные платформы (HAPS/БПЛА) + спутниковый сегмент (LEO/MEO/GEO)	Интегрированная многоуровневая архитектура: наземные, воздушные, морские и спутниковые сегменты	Спутниковые системы (LEO/MEO/GEO)
Полоса пропускания	100 Мбит/с – 10 Гбит/с (зависит от сегмента)	100 Мбит/с – 10 Гбит/с	100 Мбит/с – 1 Гбит/с
Средняя задержка	10–300 мс (низкая при HAPS/наземном, выше при спутниковом сегменте)	10–100 мс (адаптивное переключение между сегментами)	30–600 мс (LEO: 30–50 мс, GEO: 500–600 мс)
Дальность прямой видимости	До 2000 км (за счёт интеграции воздушных и спутниковых каналов)	До 1000 км (мульти сегментная интеграция)	До 2000 км
Точность позиционирования БПЛА	Высокая (при использовании спутникового и наземного сегмента)	Высокая при мультизвенной коррекции	Средняя (зависит от орбиты и покрытия)
Надёжность канала связи	Высокая за счёт избыточности сегментов и маршрутизации	Очень высокая (резервирование по всем сегментам)	Высокая (особенно при LEO-созвездиях)
Поддержка мобильных БПЛА	Да (адаптивная маршрутизация через наземный, воздушный и спутниковый сегменты)	Да (широкая адаптивность за счёт интеграции сегментов)	Ограниченная (задержки выше при GEO, лучше при LEO)
Энергоснабжение БПЛА от платформы	Возможно при использовании HAPS (солнечные панели, лазерная подзарядка)	Частично возможно (в зависимости от архитектуры)	Как правило, отсутствует
Время развёртывания сети	Часы–недели (HAPS + подключение к спутникам)	Недели–месяцы	Месяцы–годы (зависит от ОГ)
Стоимость инфраструктуры	Умеренная (выше наземной, ниже полностью спутниковой)	Высокая (сложная многоуровневая архитектура)	Очень высокая (запуск и эксплуатация спутников)
Применимость в зонах БПЛА-операций	Городские и сельские зоны с инфраструктурой + глобальное покрытие за счёт спутникового сегмента	Тактические и стратегические задачи на больших территориях	Стратегические и глобальные миссии (особенно в удалённых районах)

²⁷ Составлено автором

SAGSINs – являются наиболее универсальными, так как интегрируют наземные, воздушные, морские и спутниковые сегменты в единую архитектуру. Они обеспечивают взаимодействие оператора с БАС в глобальном масштабе, включая зоны вне покрытия наземных сетей. Однако высокая сложность координации сегментов и высокая стоимость делают их применимыми в основном для стратегических и военных задач.

NTNs – представляют собой спутниковые сети (LEO, MEO, GEO) и обеспечивают глобальное покрытие при относительно низкой потребности в наземной инфраструктуре. Они особенно полезны для медленных или автономных БАС, работающих в удалённых районах. Основной недостаток – высокая задержка при использовании GEO-сегмента, что ограничивает применение в задачах реального времени.

Гибридные орбитально-наземные сети связи и сети «космос-воздух-земля-море» являются двумя разными подходами к организации связи, каждый из которых имеет свои особенности и преимущества. Сети SAGSINs обычно сложнее в управлении БАС из-за включения воздушного компонента, который требует координации с движущимися объектами (БПЛА, высотные платформы). Такой компонент обеспечивает большую гибкость, поскольку БПЛА или другие платформы могут быстро перепозиционироваться в ответ на меняющиеся потребности, однако, такой подход требователен к наличию инфраструктуры обслуживания.

Сети HSTNs часто ориентированы на более стабильное покрытие с более высокой пропускной способностью, в то время как сети SAGSINs могут предложить более гибкое и быстро развертываемое покрытие для специфических сценариев. Эти сети идеально подходят для обеспечения связи в случаях стихийных бедствий, военных операций, или для расширения связи в регионах, где построение традиционной инфраструктуры затруднено. HSTNs часто используются для обеспечения широкополосного доступа в интернет в удаленных или труднодоступных районах, а также для мобильной и спутниковой связи.

1.6. Выводы по главе 1

1. Анализ развития беспилотных систем показал, что XXI век переживает революцию в сфере беспилотных авиационных систем, которые применяются во всех сферах народного хозяйства. Такой экспоненциальный рост использования и внедрения БАС во всем мире, а также технологий, лежащих в основе сферы их применения и эксплуатации, диктует необходимость координации и управления полетами БАС в режиме реального времени в т.ч. и за пределами прямой видимости (VLOS) с глобальным покрытием связью. Применение VLOS имеет решающее значение в процессе взаимодействия оператора с беспилотной системой, т.к. обеспечивает оператору полный контроль над дроном, помогая предотвратить столкновения и лучше оценивать высоту, скорость и ориентацию. Однако, оператору сложно сохранять ситуационную осведомленность из-за ограниченности сенсорной информации, когда взаимодействовать с дроном, опираясь только на визуальную информацию. Такая концепция аллоцентрического зрения (вид от третьего лица) затрудняет оценивание оператором направления движения БАС, в результате чего возникает расхождение между предполагаемой траекторией взаимодействия оператора и беспилотной системы и фактическим перемещением. Обозначенные проблемы могут быть эффективно решены при использовании технологии дистанционного управления (FPV) с «видом от первого лица», при котором БАС дистанционно взаимодействует с оператором, полагающимся на видеопоток, передаваемый в режиме реального времени с борта аппарата.

2. Надежная связь с низкой задержкой FPV-видеопотока для БАС является основой для обеспечения безопасных операций управления и контроля со стороны оператора. Как показали результаты проведенного анализа, из-за растущей сложности современных видеокодеков задержка должна быть основной целью проектирования систем сжатия видео для приложений FPV с учетом требований к перцептивному качеству восстановленного видеопотока, необходимого для достижения цели функционирования БАС. После

достижения цели по задержке с учетом требований к качеству могут быть сделаны улучшения в направлении лучшего коэффициента сжатия. При этом вычислительная сложность выполнения, например, нейронных сетей все равно может быть ниже, чем некоторые части современных сложных видеокодеков, поэтому методы видеокодирования на основе ИИ могут стать жизнеспособными для достижения низкой задержки кодирования и уменьшения рассинхронизации FPV-видеопотока и команд взаимодействия оператора с беспилотной системой (команд движения).

3. В качестве перспективного направления поддержки FPV БАС с глобальным покрытием получили свое развитие гибридные орбитально-наземные сети связи (HSTNs), которые являются частью интегрированной архитектуры SAGSINs и могут обеспечить более стабильное покрытие с более высокой пропускной способностью, что очень важно для FPV БАС в реальном времени.

4. Существующие системы управления БАС имеют ограниченное применение из-за небольшого покрытия территории Российской Федерации сотовыми сетями связи и ограниченностью радиовзаимодействия оператора и беспилотной системы, а спутниковые каналы связи космического сегмента ГОНСС характеризуются большой задержкой особенно при использовании спутниковых систем на геостационарной орбите. Поэтому для создаваемых гибридных сетей связи, которые имеют большие задержки в сегментах, необходимо разрабатывать более эффективные системы передачи информационных потоков на базе искусственного интеллекта для обеспечения глобального FPV на всей территории Российской Федерации.

В связи с изложенным требуется решение **научной проблемы**, заключающейся в разработке комплекса моделей каналов информационного обмена и методов по уменьшению задержки информационных потоков в каналах информационного обмена при взаимодействии оператора с беспилотной системой в условиях значительных задержек передачи данных в спутниковых каналах связи космического сегмента гибридных орбитально-

наземных сетей связи.

5. Актуальность указанной научной проблемы обусловлено разрешением научного противоречия между жесткими требованиями к минимизации задержки информационных потоков в каналах информационного обмена с учетом требований к перцептивному качеству восстановленного видеопотока при взаимодействии оператора с беспилотной системой в гибридных орбитально-наземных сетях связи и ограниченной эффективностью существующих методов по устранению задержки FPV-видеопотока в условиях физических ограничений спутниковых каналов связи. Для разрешения этого противоречия необходимо разработать и исследовать новые подходы, основанные на моделях искусственного интеллекта, способных обеспечить уменьшение задержки за счет более сильного сжатия FPV-видеопотока и команд взаимодействия оператора, проактивного предсказания кадров видеопотока на стороне оператора и агрегации данных видео и телеметрии в одном цифровом канале информационного обмена.

ГЛАВА 2. АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА ДЛЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПЕРАТОРА С БЕСПИЛОТНЫМИ СИСТЕМАМИ В ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ

В современных условиях развития беспилотных авиационных систем наблюдается значительный рост требований к эффективности передачи данных, минимизации задержек и обеспечению надежного FPV в условиях ограниченной пропускной способности каналов связи. Традиционные подходы к передаче видеоинформации от первого лица с использованием стандартных видеокодеков демонстрируют существенные ограничения при работе в гибридных орбитально-наземных сетях связи [353].

Анализ существующих систем передачи видеоданных в реальном времени (параграф 1.4) выявляет критические проблемы задержек передачи. Как было отмечено в главе 1, геостационарные спутники обеспечивают задержку сигнала от 600 до 800 миллисекунд, что является неприемлемым для FPV БАС, где критичны реакции в миллисекундном диапазоне. Даже современные сети LTE/LTE adv, несмотря на заявленную минимальную сетевую задержку около 10 миллисекунд [354], в реальных условиях демонстрируют значительно более высокие показания, особенно при передаче видеопотоков высокого разрешения.

Как было отмечено ранее, БАС представляет собой комплекс, включающий один или несколько БПЛА, оборудованных системами навигации и связи, а также наземные технические средства приёма-передачи данных (терминал оператора, ТО).

Функциональные возможности терминала оператора включают в себя: преобразование и передачу команд взаимодействия оператора на БПЛА; приём и декодирование кадров FPV-видеопотока, поступающего с БПЛА; визуализацию этих кадров для оператора; сбор и обработку телеметрических параметров БПЛА, а также предоставление оператору обработанных телеметрических данных.

Функции самого БПЛА состоят в следующем: приём и декодирование команд взаимодействия со стороны терминала оператора, их интерпретация и исполнение; кодирование и передача видеок кадров полетной обстановки на терминал оператора, а также передачу телеметрических данных в обратном направлении.

Отображаемые видеок кадры обеспечивают визуальный контроль за текущей воздушной обстановкой. Телеметрические данные характеризуют текущее состояние БПЛА, предоставляя информацию о скорости, географических координатах, высоте полёта, курсовом угле и других параметрах. Команды взаимодействия оператора с беспилотной системой (команды движения) служат для непосредственного воздействия на органы движения беспилотной системы.

При организации FPV в удалённых районах с ограниченной пропускной способностью каналов связи применение традиционных видеокодеков может оказаться затруднительным. Одним из перспективных подходов к решению данной проблемы является внедрение нейросетевых видеокодеков. Основная особенность таких кодеков заключается в использовании искусственных нейронных сетей для преобразования видеок кадров из пиксельного представления во внутреннее латентное пространство признаков (ЛПП) нейронной сети.

2.1 Задержки уровня приложения

Качество обслуживания QoS (*аббр. от англ. Quality of Service* – качество услуги) задает требования к задержкам в сетевых услугах, критически важных для приложений реального времени. Для традиционных услуг реального времени допустимые задержки варьируются от единиц до сотен миллисекунд, при этом превышение данных значений существенно ухудшает или делает невозможным предоставление услуги. В сетях общего пользования стандартом МСЭ-Т Y.1541 выделяется шесть классов QoS (от 0 до 5), каждый из которых

характеризуется специфическими требованиями к задержкам и другим параметрам (джиттер, потери пакетов) [355]:

- Класс 0: услуги реального времени с высокой чувствительностью к вариациям задержки (джиттер) и высокой интерактивностью;
- Класс 1: услуги реального времени с меньшей интерактивностью и чувствительностью к джиттеру;
- Класс 2: интерактивные услуги передачи данных;
- Класс 3: менее интерактивные услуги передачи данных;
- Класс 4: услуги с низким уровнем потерь пакетов;
- Класс 5: услуги с наилучшей попыткой передачи (best effort).

Средние требования по задержке для классов 0 и 2 составляют 100 мс, для классов 1 и 3 – 400 мс, тогда как классы 4 и 5 не предъявляют жестких требований к задержке. К традиционным услугам реального времени относятся, например, IP-телефония и телеконференции, где задержки свыше 100 мс затрудняют, а свыше 300 мс практически исключают возможность эффективной коммуникации. В телеконференциях допустимая задержка звукового потока не должна превышать 280 мс, а видеопоток – 320 мс [356].

Современные сетевые услуги, включая сервисы 5G, 6G и перспективные сети-2030, предъявляют более жесткие требования к задержкам – в порядке десятков или единиц миллисекунд. Например, для голографических коммуникаций и дополненной реальности задержка не должна превышать 5 мс. Контроль роботов-аватаров, роботизированных манипуляторов, услуги телеприсутствия [357] и тактильного интернета [358] требуют задержек не более 1 мс. Выполнение таких требований требует реализации сетей с ультрамалыми задержками.

Кроме того, между нормативными требованиями к предельной задержке и фактическими пределами обеспечения услуг реального времени могут возникать расхождения. В стандартах требования иногда содержат запас. Так, 3GPP TS 22.829 устанавливает максимальную задержку видеопотока для FPV

БПЛА равной 100 мс, тогда как оценка практической максимальной односторонней задержки допускает значения до 250 мс для успешного функционирования данной услуги [359].

Для систем визуального контроля, к которым относится и взаимодействие от первого лица, критическим параметром, отражающим минимизацию времени задержки между датчиком и контроллером, является так называемая задержка «стекло–алгоритм» (*пер. с англ.* Glass-to-Algorithm, G2A). Этот параметр определяется как интервал времени между возникновением событийной информации (фотонами, прошедшими через объектив камеры) и моментом, когда первое сформированное изображение становится доступным для алгоритма обработки. Иными словами, в системах автоматического взаимодействия с беспилотной системой, где потребителем данных является алгоритм, а не человек, этот термин относится к задержке от получения исходного видео до момента, когда транскодированный сигнал поступает на вход системы отображения (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Задержки G2A и G2G

В современных системах передачи видеосигнала величина задержки G2A составляет, как правило, 50–80 мс. В то же время для приложений «тактильного интернета» требуемые значения задержки «из конца в конец» (*пер. с англ.* End-to-End latency, E2E) должны быть существенно ниже (например, менее 10 мс, а в граничных сценариях менее 1 мс) [360]. При этом задержка E2E в контексте систем FPV включает все компоненты: от момента регистрации события

сенсором до этапов обработки, передачи сигнала и срабатывания исполнительного механизма. Следовательно, задержка G2A представляет собой лишь часть общей задержки E2E, что ещё более усиливает требование к минимизации задержек при передаче видео для систем FPV по сетям связи [361, 362].

В случае демонстрации видео оператору-наблюдателю ключевым показателем становится задержка «от стекла к стеклу» (*пер. с англ.* Glass-to-Glass latency, G2G), требования к которой менее жёстки. Задержка G2G определяется как время от прохождения фотонов события через объектив камеры до их прохождения через стекло дисплея оператора (рис. 2.1). В зависимости от области применения человек способен заметить отставание изображения уже при задержках порядка 6 мс (например, при рисовании на сенсорном экране [363]) и до примерно 50 мс для интерактивных приложений, таких как видеоигры или графические редакторы [364]. При этом минимальная различимая величина задержки для натренированного наблюдателя находится в диапазоне 8–17 мс [365].

В интерактивных видеосистемах (например, VR) задержка «верхнего уровня» M2P, представляет собой время, прошедшее между действием пользователя на устройстве фиксации такого действия и наблюдением результата на устройстве отображения (рис. 1.15).

Все вышесказанное, по сути, полностью соответствует процедуре передачи FPV-видеопотока при взаимодействии оператора с беспилотной системой от первого лица, где в качестве исходного устройства выступает БПЛА, а за ввод данных в систему передачи видеопотока отвечает камера, установленная на беспилотной системе.

С учетом этого схема, изображенная на рисунке 1.15, может быть изменена (рис. 2.2), где задержка G2G представляет собой задержку передачи информационного потока удаленной обстановки (кадр видеопотока) на элементы ее отображения на стороне оператора, а задержка M2P представляет собой задержку передачи информационного потока команд взаимодействия

оператора (команды движения) на исполнительные механизмы БПЛА. Далее будем называть такой канал передачи «верхнего уровня» *каналом информационного обмена* (КИО), а задержку в нем *задержкой в канале информационного обмена*, где T_3^B – задержка кадров FPV-видео, T_3^K – задержка команд взаимодействия оператора (команд движения БПЛА).

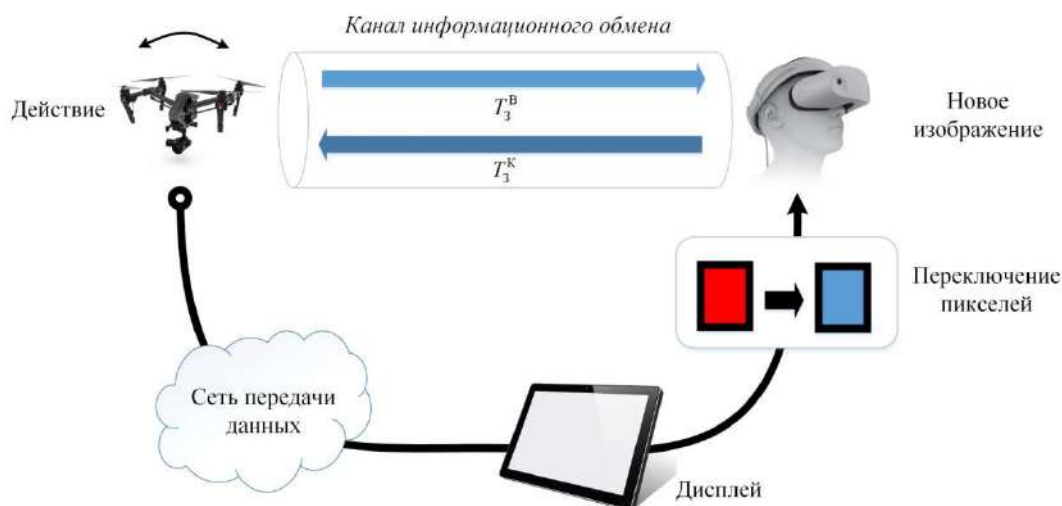


Рисунок 2.2 – Задержка в канале информационного обмена

Информационный обмен в рамках приложения FPV осуществляется на прикладном уровне КИО (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Каналы информационного обмена

Управление информационным потоком данных осуществляется с помощью разрабатываемого протокола прикладного уровня FPV-CTVP (*аббр. от англ. First Person View - Command Telemetry Video Procotol* – протокол передачи команд взаимодействия оператора, телеметрии и видео от первого лица).

2.2 Модель системы информационного обмена

Разработка любой модели сложной технической системы начинается с построения соответствующей концептуальной модели. На данном этапе основой является определение входных и выходных параметров модели. В качестве входных параметров рассматриваются характеристики, описывающие архитектуру системы FPV (облик), а в качестве выходных – показатели эффективности функционирования данной системы. Исходя из этого, необходимо обоснование множества этих показателей.

2.2.1 Показатели эффективности СИО

Обоснование показателей эффективности системы взаимодействия оператора с беспилотной системой должно исходить из задач и целей, поставленных перед БАС. Для достижения заданных целей система FPV должна обеспечивать взаимодействие с другими подсистемами, датчиками и исполнительными устройствами в режиме реального времени, что гарантирует получение актуальной информации об окружающей среде, координацию действий с внешними системами и адаптацию к изменяющимся условиям обстановки.

Анализ различных систем FPV БАС, основанных на каналах связи, выявил, что в 90% случаев такие каналы подвержены негативному воздействию различных факторов, включая сетевые перегрузки, помехи и ограничения по дальности передачи. Влияние этих факторов приводит к значительным задержкам в передаче данных внутри системы FPV, что критично для

своевременного получения информации о состоянии окружающей среды и генерации КВО, и, соответственно, влияет на степень достижения целей БАС.

Следовательно, одним из ключевых показателей эффективности системы FPV является минимальная величина задержки видеопотока T_3^B и КВО T_3^K .

Для обеспечения эффективного процесса FPV БАС и выполнения им поставленных задач необходимо обеспечение передачи видеопотока необходимого перцептивного качества в реальном времени по КИО с ограниченной пропускной способностью. Для этого требуется предварительное сжатие видеоданных. С учетом реальных скоростей передачи и объема видеоинформации видеокодек должен обеспечивать коэффициент сжатия в пределах от 8 до 15 раз. Кодеки без потерь (например, J2K Lossless) не достигают требуемого уровня сжатия [366], что обуславливает широкое применение кодеков с потерями на практике [367].

Изменение условий передачи видеоданных и наличие ошибок в канале ухудшают качество передаваемого FPV-видео. Таким образом, еще одним значимым показателем эффективности системы FPV является перцептивное качество восстановленного видеопотока, передаваемого по КИО.

На основании анализа существующих метрик качества видео, наиболее распространенными являются следующие:

1. Среднеквадратическое отклонение MSE (*аббр. от англ. Mean Square Error*), характеризующее усреднённое квадратичное отклонение между соответствующими пикселями исходного и передаваемого изображений.

Пусть есть два изображения I и J одинакового разрешения, где W – ширина изображения, а H – высота. Тогда значение метрики MSE вычисляется согласно формуле [368]:

$$MSE = \frac{1}{H \times W} \sum_h^H \sum_w^W (I(w, h) - J(w, h))^2, \quad (2.1)$$

где $I(w, h)$ и $J(w, h)$ – значение w по ширине и h по высоте пикселей изображений I и J .

2. Показатель структурного сходства SSIM (*аббр. от англ. Structure Similarity*), отражающий степень структурного соответствия между исходным и сжатым изображениями. SSIM вычисляется на основе среднеквадратического отклонения σ и среднего значения μ пикселей, а также дополнительных констант C_1 и C_2 согласно формуле [368]:

$$\text{SSIM} = \frac{(2\mu_I\mu_J + C_1)(2\sigma_{IJ} + C_2)}{(\mu_I^2 + \mu_J^2 + C_1)(\sigma_I^2 + \sigma_J^2 + C_2)}. \quad (2.2)$$

3. Пиковое отношение сигнала к шуму PSNR (*аббр. от англ. Peak Signal-to-Noise Ratio*), измеряющее отношение максимального значения сигнала к мощности шума, искажающего этот сигнал. PSNR вычисляется на основе значения MSE согласно формуле [368, 369]:

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{MAX}^2}{\text{MSE}} \right), \quad (2.3)$$

где $\text{MAX} = 255$ – максимальное значение пикселя изображения.

4. Косинусное сходство (*от англ. Cosine Similarity*), описывающее угол между векторами значений пикселей двух изображений, вычисляемое через косинус этого угла. Пусть изображения I и J представляют собой вектора, где . Тогда косинусное сходство вычисляется согласно формуле [370]:

$$\text{Cos}(I, J) = \frac{I * J}{|I| \times |J|} = \frac{\sum_{i=1}^N I_i \times J_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N I_i^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N J_i^2}}. \quad (2.4)$$

5. Расстояние Хэмминга (*от англ. Hamming Distance*), характеризующее количество пикселей, различающихся в двух изображениях:

$$d(I, J) = \sum_h \sum_w \begin{cases} 1, I(w, h) \neq J(w, h) \\ 0, I(w, h) = J(w, h) \end{cases}. \quad (2.5)$$

6. MOS (*аббр. от англ. Mean Opinion Score* – средняя оценка мнений) – это метрика оценки качества видеопотока от 1 до 5 включительно [371]. В то время как данная метрика корректно отражает субъективное качество восприятия видеопотока человеком, её измерение требует проведения экспертной оценки. Это приводит к значительным временным и финансовым

затратам при необходимости исследований искажения качества видеопотока видеокодеками.

7. VMAF (*аббр. от англ. Video multi-method assessment fusion*) – метрика оценки субъективного качества восприятия видео человеком, разработанная Netflix [372]. VMAF учитывает значения двух дочерних метрик, VIF и DLM. VIF (*аббр. от англ. Visual Information Fidelity* – точность визуальных данных) отражает степень утраты точности изображения. DLM (*аббр. от англ. Detail Loss Metric* – метрика потери деталей) учитывает, сколько деталей было утрачено после кодирования видео. Значения данных метрик объединяются методом опорных векторов.

8. LPIPS (*аббр. от англ. Learned perceptual image patch similarity* – обученная схожесть восприятия частей изображений) – это метрика оценки субъективного качества видеопотока человеком, основанная на применении свёрточных нейронных сетей [373]. Данная метрика разработана в результате исследования, целью которого была разработка метрики, которая лучше бы отражала качество восприятия видео человеком по сравнению с существующими на тот момент метриками.

9. Метрика DISTs (*аббр. от англ. Deep Image Structure and Texture Similarity*), которая представляет собой метрику оценки субъективного качества видеопотока глазом человека, основанная, как и LPIPS, на выполнении свёрточной нейронной сети [374]. Данная метрика представляет собой улучшение LPIPS с точки зрения устойчивости к искажениям. Значения классических метрик, такие как SSIM, сильно подвержены искажениям, например, гауссовым шумом. Добавление небольшого гауссова шума, которое не оценивается человеком как значительное ухудшение видеопотока, приводит к значительному ухудшению результата метрики. При этом LPIPS, как показано в [374], также в небольшой степени подвержена искажениям. Метрика DISTs разработана таким образом, чтобы быть устойчивой к подобным искажениям, присущим в том числе и режиму FPV.

$$\text{DISTS}(x, y) = 1 - \sum_{l=0}^L w_l \cdot \Phi(x_l, y_l),$$

где Φ – комбинация метрик сходства: средних значений (яркость, структура), корреляций (текстура, детали).

Косинусное расстояние и расстояние Хэмминга менее предпочтительны для оценки качества передаваемого видеопотока в беспилотных системах, поскольку они преимущественно применяются в иных задачах: косинусное расстояние используется при поиске похожих изображений, классификации и сегментации, а расстояние Хэмминга – в криптографии для проверки целостности сообщений и обнаружения ошибок при передаче данных. Кроме того, расстояние Хэмминга применяется для сравнения генетических последовательностей и других типов данных. Косинусное расстояние измеряет лишь разницу в направлении векторных представлений, не учитывая их амплитуду.

Среднеквадратическая ошибка MSE является наиболее распространённой метрикой для оценки качества видеопотоков, однако показатель отношения сигнал-шум PSNR, который основан на MSE, более универсален, так как учитывает среднеквадратичное отклонение по каждому пикселю двух изображений, обеспечивая более адекватную оценку качества передачи видеоданных. При этом и PSNR, и MSE плохо коррелируют с субъективным перцептивным качеством видеопотока, а потому их применение для оценки качества FPV БПЛА на прикладном уровне не рекомендуется.

Индекс структурного сходства SSIM имеет преимущество в том, что учитывает не только яркость и цветовые характеристики изображения, но и текстуру и контрастность. Тем не менее, строго говоря, SSIM не является прямым показателем качества передаваемого видео. Этот индекс отражает степень сходства по фрагментам между исходным и полученным изображениями, и поэтому рекомендуется использовать SSIM как вспомогательную метрику для оценки пофрагментного сходства.

В данном диссертационном исследовании используется две метрики: DISTS и SSIM. Необходимость использования SSIM обуславливается простотой, низкоуровневостью и совместимостью результатов с другими исследованиями. Выполнение нейронных сетей требует существенных ресурсов, поэтому оценки по метрикам LPIPS и DSITS в исследования используются ограниченно, несмотря на то, что они лучше отражают качество восприятия видеопотока человеком. В то же время необходимо обеспечить согласованность результатов с существующими исследованиями, что и достигается с помощью метрики SSIM. Использование DISTS обусловлено тем, что видеопоток беспилотных систем очень часто “зашумлён” [375]. Соответственно, из рассмотренных выше метрик VMAF, LPIPS и DISTS, которые позволяют оценить субъективное качество восприятия видеопотока человеком лучше всего, рекомендуется использовать метрику DISTS как наиболее устойчивую к искажениям, присущим процессу FPV.

В качестве дополнительной метрики может использоваться метрика PSNR. Однако в некоторых случаях PSNR не позволяет полноценно оценить качество видео на уровне приложения FPV. Например, при наличии задержек передачи или ошибок канала возникает отсутствие данных на декодере, приводящее к сбоям – частичной или полной потере отображаемой информации. Если доля таких потерь невелика (около 5-7% от общего числа), влияние на PSNR кадра минимально, но визуально заметны артефакты в виде черных строк, что иногда недопустимо. При значительном количестве потерь (свыше 80%) PSNR не отражает качество видеопотока. В таких случаях необходимо дополнительно использовать показатель вероятности потерь $P_{\text{потерь}}$, который характеризует долю потерянных кадров видеопотока, для более полной оценки качества передачи FPV-видео.

Следовательно, в качестве показателей эффективности системы FPV необходимо использовать такие показатели, как:

$$\{T_3^B, T_3^K, \text{DISTS}, \text{SSIM}, P_{\text{потерь}}\}. \quad (2.6)$$

2.2.2 Постановка задачи и описание модели СИО

Задача установления зависимости показателей эффективности функционирования системы информационного обмена (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;

$C = \{c_i\}_{I_C}$ – 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:

$$\begin{aligned} T_3^B &= f_1(\text{кио}_i, v_{ij}, c_{ij}); \quad T_3^K = f_2(\text{кио}_i, v_{ij}, c_{ij}); \\ \text{SSIM} &= f_3(\text{кио}_i, v_{ij}, c_{ij}); \quad \text{DISTS} = f_4(\text{кио}_i, v_{ij}, c_{ij}); \\ P_{\text{потерь}} &= f_5(\text{кио}_i, v_{ij}, c_{ij}), \end{aligned} \quad (2.7)$$

где f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 – зависимости показателей эффективности функционирования (ПЭФ) СИО от параметров, характеризующих облик этой системы.

Для решения поставленной задачи необходимо поэтапно решить следующие частные задачи:

1. Формализация и определение множества возможных структур КИО.
2. Определение пространства вариантов моделей видеокодеков V .

3. Определение множества вариантов моделей кодеков КВО с последующей фильтрацией для выбора наиболее соответствующих критериям эффективности и точности S .

4. Создание и построение моделей КИО на основе заданных параметров и требований.

Реализация указанных этапов обеспечит переход к разработке комплексной модели функционирования СИО, обобщенная структурная схема которой представлена на рисунке 2.4, где представлены отдельные КИО как для передачи видеопотока КИО^B, так и для передачи КВО КИО^K в космическом и наземном сегментах ГОНСС.

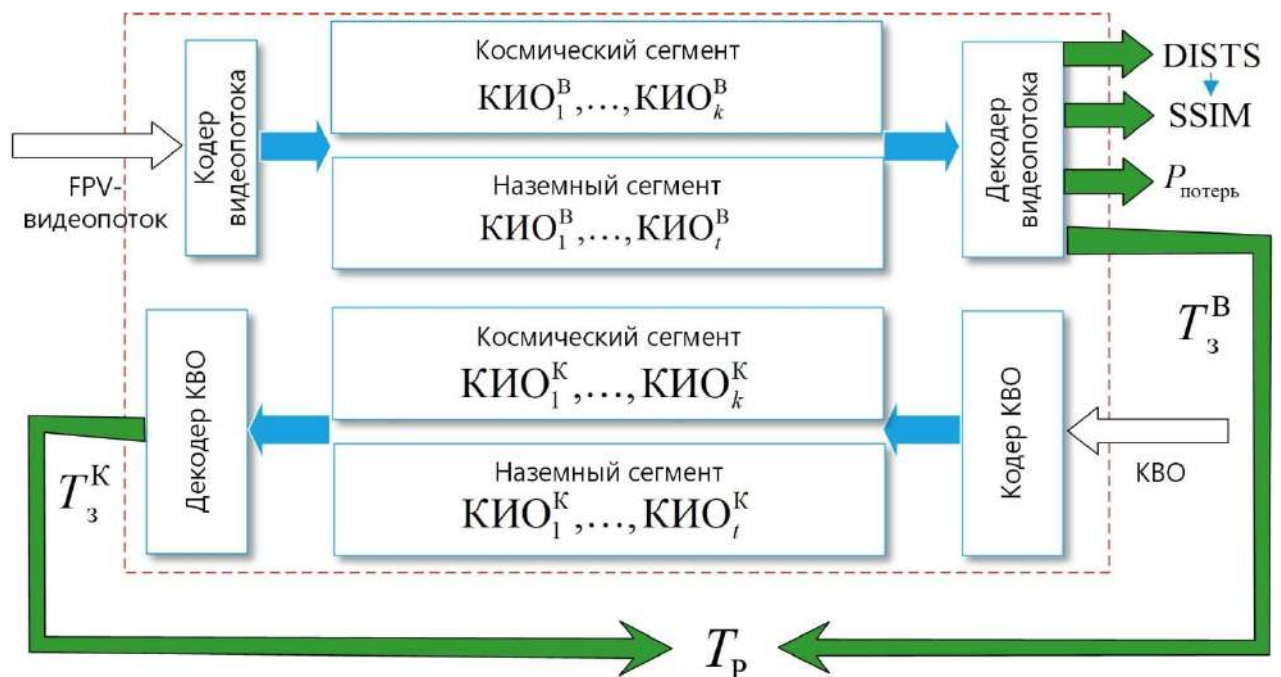


Рисунок 2.4 – Структурно-логическая схема модели СИО

Поскольку рассматриваемая модель является интеграцией моделей сжатия видеопотока, моделей КИО и моделей кодека КВО, для обеспечения её эффективного функционирования необходимо разработать алгоритмы агрегирования, обеспечивающие координацию взаимодействия между компонентами модели.

Данная модель позволяет выявить функциональную зависимость между параметрами, определяющими структуру СИО и показателями её эффективности (2.6).

Однако, как отмечалось ранее, процесс функционирования СИО характеризуется влиянием множества неопределённых факторов различной природы, что обуславливает стохастический характер значений показателей эффективности. В связи с этим целесообразно перейти от задачи детерминированного анализа (2.7) к задаче вероятностного моделирования, заключающейся в определении зависимости вероятности достижения комплекса целей функционирования системы от заданных параметров, характеризующих структуру СИО.

Формально данная задача может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} P[(T_3^B \leq T_3^{B\text{тр}}), (T_3^K \leq T_3^{K\text{тр}}), \\ (SSIM \geq SSIM^{\text{тр}}), (DISTS \leq DISTS^{\text{тр}}), \\ (P_{\text{потерь}} \leq P_{\text{потерь}}^{\text{тр}})] = f(\text{кио}_i, v_{ij}, c_{ij}), \end{aligned} \quad (2.8)$$

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

Определение вероятности по формуле (2.8) должно выполняться на основе статистической обработки результатов многократного имитационного моделирования работы СИО при фиксированных исходных условиях. Зависимость (2.8) позволяет при обосновании параметров, описывающих структуру СИО, учитывать множественность её функциональных целей.

При этом для решения задачи (2.8) необходимо установить целевые показатели эффективности функционирования СИО, то есть задать их требуемые значения $(T_3^{B\text{тр}}, T_3^{K\text{тр}}, SSIM^{\text{тр}}, DISTS^{\text{тр}}, P_{\text{потерь}}^{\text{тр}})$. Поскольку в большинстве случаев жёстко формализованные требования к значениям этих показателей отсутствуют, их определение должно исходить из целей функционирования самой беспилотной авиационной системы.

Однако, чтобы воспользоваться выражением (2.8) 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 $f(T_3^B, T_3^K, SSIM, DISTS, P_{\text{потерь}})$, где последующее ее интегрирование даст искомую вероятность (2.8).

2.2.3 Восстановление плотности вероятности

показателей эффективности функционирования СИО

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 СИО. Для нахождения плотности вероятности системы случайных величин существует два класса методов: *параметрические* и *непараметрические*.

2.2.3.1 Параметрические методы и непараметрические методы

Параметрические методы

Параметрические методы восстановления функции плотности вероятности представляют собой совокупность статистических процедур, основанных на априорном предположении о функциональном виде распределения исследуемой случайной величины с фиксированным набором неизвестных параметров. В соответствии с данным подходом осуществляется оценивание параметров распределения на основе анализа доступной выборочной совокупности данных.

В практике прикладного статистического анализа наиболее широкое распространение получили два основных параметрических метода: *метод моментов* и *метод максимального правдоподобия*.

Метод моментов

Метод моментов представляет собой подход, базирующийся на фундаментальном принципе математической статистики, согласно которому точечные оценки моментов генеральной совокупности конструируются на основе соответствующих выборочных моментов. В соответствии с данным

подходом математическое ожидание и дисперсия генеральной совокупности аппроксимируются выборочным средним арифметическим и выборочной дисперсией соответственно:

$$M\xi: \approx M\xi^* = v_1^* = \bar{x}; D\xi: \approx MD\xi^* = \mu_2^* = s^2. \quad (2.9)$$

Остальные числовые характеристики распределения определяются посредством функциональных преобразований выборочных моментов. В частности, коэффициент асимметрии генеральной совокупности оценивается выборочным коэффициентом асимметрии, тогда как коэффициент эксцесса – соответствующим выборочным коэффициентом эксцесса:

$$A: \approx A^* = \frac{\mu_3^*}{s^3}, E: \approx E^* = \frac{\mu_4^*}{s^4} - 3. \quad (2.10)$$

Данный метод обладает гибкостью и может быть применен к различным типам распределений. Например, для экспоненциального распределения $\xi \in \mathcal{E}(\alpha)$ параметр α оценивается соотношением $\alpha = \frac{1}{x}$, вытекающим из условия $M\xi = \frac{1}{\alpha}: \approx x$. В случае равномерного распределения $\xi \in R[c; d]$ с неизвестными граничными параметрами c и d допускается использование крайних членов вариационного ряда:

$$c: \approx x_1^*, d: \approx x_n^*, \quad (2.11)$$

где x_1^* и x_n^* обозначают минимальное и максимальное значения упорядоченной выборки.

Метод максимального правдоподобия

Метод максимального правдоподобия основывается на принципе оптимизации функции правдоподобия. Пусть распределение генеральной совокупности ξ детерминируется неизвестным параметром Q , а $\vec{x}_{\langle n \rangle} = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle^T$ представляет простую случайную выборку объема n из данной генеральной совокупности. Задача состоит в построении точечной оценки $\hat{Q}_n$ параметра Q , оптимальной в смысле максимизации вероятности реализации именно наблюдаемой выборки.

Принцип максимального правдоподобия базируется на эвристическом предположении о том, что в выборочную совокупность с наибольшей вероятностью попадают наиболее вероятные значения случайной величины. Следовательно, параметр Q должен быть выбран таким образом, чтобы обеспечить максимальную вероятность реализации конкретной полученной выборки.

Интерпретируя выборку $\vec{x}_{\langle n \rangle} = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle^T$ в качестве реализации n -мерного случайного вектора $\vec{\xi}_{\langle n \rangle} = \langle \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n \rangle^T$, вероятность получения именно этой выборки выражается формой $P\{\vec{\xi}_{\langle n \rangle} = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle^T\}$. В контексте простой выборки и равноточных наблюдений все компоненты $\xi_k, k = \overline{1, n}$ распределены идентично генеральной совокупности ξ и являются взаимно независимыми. В дискретном случае совместное распределение вероятностей факторизуется:

$$P\{\vec{\xi}_{\langle n \rangle} = \langle \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n \rangle^T\} = P\{\xi_1 = x_1\} \cdot P\{\xi_2 = x_2\} \cdot \dots \cdot P\{\xi_n = x_n\}. \quad (2.12)$$

В непрерывном случае совместная плотность распределения может быть представлена как произведение маргинальных плотностей:

$$f_{\xi}(x_1, \dots, x_n) = f_{\xi}(x_1) \cdot f_{\xi}(x_2) \cdot \dots \cdot f_{\xi}(x_n). \quad (2.13)$$

Данные теоретические соображения обусловили формализацию концепции функции правдоподобия. Для непрерывной случайной величины ξ с плотностью распределения $f_{\xi}(x, Q)$ функция правдоподобия определяется как:

$$L(Q) \stackrel{\text{def}}{=} f_{\xi}(x_1, Q) \cdot f_{\xi}(x_2, Q) \cdot \dots \cdot f_{\xi}(x_n, Q). \quad (2.14)$$

Для дискретной случайной величины ξ , принимающей значения $\{a_k\}_{k=1}^l$ с вероятностями $\{p_k(\theta)\}_{k=1}^l$, функция правдоподобия представляется в форме:

$$L(\theta) \stackrel{\text{def}}{=} p_1^{m_1}(Q) \cdot p_2^{m_2}(Q) \cdot \dots \cdot p_l^{m_l}(Q). \quad (2.15)$$

где m_k обозначает количество членов выборки, совпадающих со значением $a_k, k = \overline{1, l}$.

При определении функции правдоподобия выборочные значения $x_1, x_2, \dots, x_n$ рассматриваются как фиксированные величины, тогда как параметр Q выступает в качестве независимой переменной.

Непараметрические методы

Ввиду того, что применение параметрических подходов к восстановлению плотности вероятности требует априорного знания функционального вида распределения, а для многомерных систем случайных величин такое знание недостижимо на практике, возникает необходимость рассмотрения альтернативного класса методов — непараметрических методов восстановления плотности вероятности систем случайных величин.

Спектр непараметрических методов включает в себя гистограммный метод, метод Парзена-Розенблатта (ядерный метод), метод интегральной оценки плотности вероятности, метод стохастической регуляризации, метод рекуррентных ядерных оценок, сплайн-аппроксимацию, проекционные методы, метод корневой оценки, метод Карандеева-Эсымонта, а также методы ядерных оценок с пониженным смещением и их модификации.

Гистограммный метод остается наиболее распространенным в практическом применении благодаря простоте реализации. Однако он характеризуется существенными ограничениями: неудовлетворительной надежностью при малых объемах выборки, чувствительностью к выбросам и низкой адаптивностью к особенностям эмпирического распределения.

Метод Парзена-Розенблатта занимает второе место по значимости. Его методологическая основа базируется на постулате о локальном сгущении вероятностной массы в окрестности точек наибольшей концентрации выборочных элементов. Метод оперирует сглаженной эмпирической функцией распределения и вводит концепцию ядерной функции.

Метод интегральной оценки плотности вероятности представляет собой модификацию метода Парзена-Розенблатта для задач классификации и распознавания образов. Он устраняет проблему разрывности функции плотности, сохраняя высокие аппроксимационные качества оценки.

Исследования демонстрируют его превосходство в точности приближения.

Метод стохастической регуляризации основывается на применении регуляризирующего оператора при учете приближенного характера исходной информации. Его недостатки включают медленную скорость сходимости и риск расхождения в локальных минимумах. Несмотря на это, метод получил широкое распространение в научной практике.

Метод оценивания максимума правдоподобия может быть рассмотрен как непараметрический аналог параметрической оценки. Отличие состоит в том, что решением служит функция плотности, определяемая посредством оптимизации функционала правдоподобия при известных ограничениях.

Метод рекуррентных ядерных оценок исходит из представления выборочной совокупности в виде упорядоченной последовательности многомерных наблюдений. Основное преимущество подхода – простота компьютерной реализации, нетребовательность к настройке параметров и отсутствие необходимости полного пересчета данных при поступлении новой информации, что обеспечивает существенную экономию вычислительных ресурсов.

2.2.3.2 Метод Парзена-Розенблатта

Для решения задачи восстановления плотности вероятности ПЭФ СИО будем использовать метод Парзена-Розенблатта так как он лишен указанных выше недостатков других методов и дает возможность получения функции плотности вероятности ПЭФ СИО в явном виде даже при малом объеме выборки исходных данных.

Фундаментальный принцип метода Парзена-Розенблатта базируется на замещении индикаторной функции ядром – симметричной весовой функцией $Y(z)$, удовлетворяющей набору формальных условий:

$$Y(z) \geq 0, \int Y(z)dz = 1, \int zR(z)dz = 0, \int z^2Y(z)dz = y_2 < \infty. \quad (2.16)$$

Ядерная оценка плотности распределения определяется следующим

выражением:

$$f(x) = \frac{1}{Kh} \sum_{i=1}^K Y \left(\frac{x_i - x}{h} \right). \quad (2.17)$$

где x_i – реализация случайной величины в i -ом опыте, h – ширина пропускания случайной величины, Y – ядерная функция, K – общее количество опытов.

Оценка качества производится посредством вычисления совокупности количественных метрик, среди которых среднеквадратичная ошибка. Согласно исследованиям [376, 377], асимптотическое смещение демонстрирует обратную зависимость от ширины окна (параметра сглаживания) h , тогда как дисперсия увеличивается при его уменьшении. Величина смещения определяется второй производной плотности $f''(x)$, достигая экстремальных значений в области модальных точек распределения. При выполнении условия состоятельности оценки ($h \rightarrow 0$ и $Kh \rightarrow \infty$ при $n \rightarrow \infty$) как дисперсионная, так и смещенная компоненты ошибки асимптотически исчезают при возрастании объема выборки. Произведение Kh интерпретируется в качестве «эффективного размера выборки», причем условие $Kh \rightarrow \infty$ отражает баланс между расширением информационной базы ($n \rightarrow \infty$) и сужением локальной окрестности ($h \rightarrow 0$), что гарантирует увеличение объема локально релевантной информации.

Главная задача при выборе ядра состоит в обеспечении требуемого уровня гладкости результирующей оценки. Основная функциональная роль ядра заключается в гарантировании дифференцируемости получаемого «оценителя», что делает выбор оптимальной ширины сглаживающего окна (ширины пропускания) h критической проблемой в контексте ядерной регрессии. Данный параметр определяет асимптотическое поведение оценки при конечных объемах выборки. В статистической литературе выделяются несколько методологических подходов к определению параметра h : опорные эвристические правила, методы подстановки и процедуры кросс-валидации. В практике наиболее распространено применение опорных эвристических правил, в рамках которых для оценивания h вместо истинной неизвестной плотности

привлекается параметрическое семейство стандартных распределений, в частности, семейство нормальных распределений. В настоящей работе в качестве ядерной функции была использована Гауссова функция [378]:

$$\Gamma(\mu; \sigma^2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.18)$$

где μ – среднее значение, а σ – среднеквадратическое отклонение.

Оптимальное значение параметра h определялось на основании критерия минимизации интеграла квадрата отклонений истинной плотности вероятности от её ядерной оценки [379].

$$h^* = \arg \min_{h \in \Delta} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x) dx - \frac{2}{Kh(K-1)} \sum_{k=1}^K \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^K Y\left(\frac{x_k - x_j}{h}\right) \right), \quad (2.19)$$

где h^* – оценка полосы пропускания.

Для решения задачи восстановления плотности вероятности ПЭФ СИО с использованием метода Парзена-Розенблатта был разработан алгоритм, представленный на рисунке 2.5 [377].

Исходной информацией для реализации алгоритма служит выборка, сформированная на основе эксперимента либо результатов имитационного моделирования процесса функционирования СИО.

Для определения количества интервалов используется выражение

$$x = 1 + 3,322 \cdot \ln(E), \quad (2.20)$$

где E – объем выборки исходных данных.

Для определения ширины пропускания h по каждому ПЭФ был использован эмпирический метод, суть которого заключается в нахождении ширин интервалов в соответствии с выражением для каждого ПЭФ:

$$h_N = \frac{N_{\text{макс}} - N_{\text{мин}}}{x}, \quad (2.21)$$

где $N_{\text{макс}}$, $N_{\text{мин}}$ – максимальное и минимальное значение соответствующего ПЭФ.

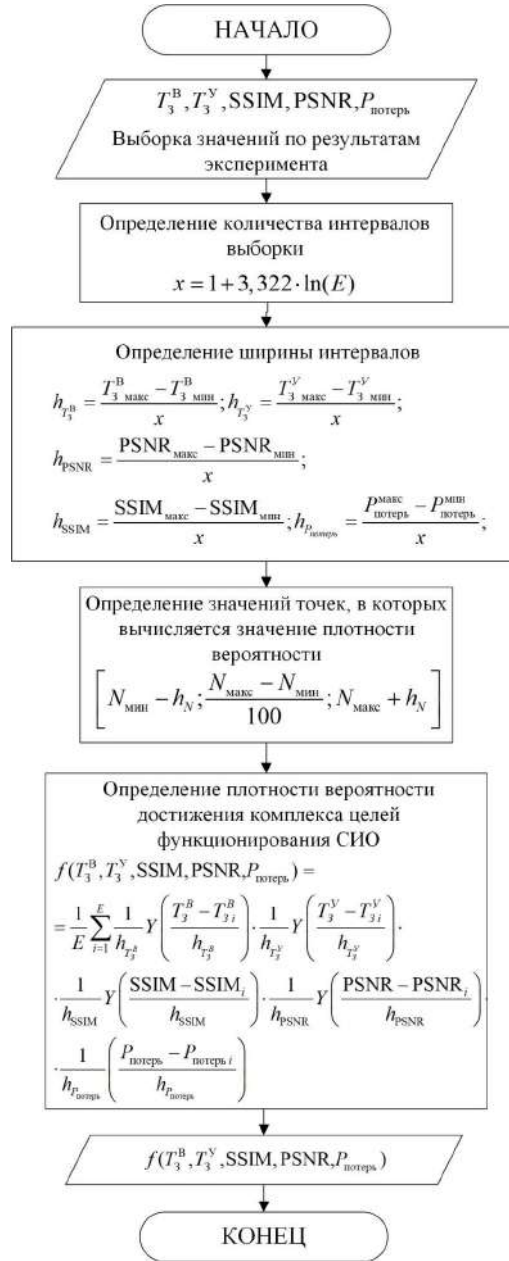


Рисунок 2.5 – Алгоритм восстановления плотности вероятности ПЭФ СИО с использованием метода Парзена-Розенблатта

В общем случае пропускная способность h_x некоторой величины x вычисляется по правилу Сильвермана [380]:

$$h_x = \left(\frac{4\sigma_x^5}{3n_x} \right)^{1/5}, \quad (2.22)$$

где n_x – размер выборки x , а σ_x – среднеквадратическое отклонение. При использовании Гауссовой ядерной функции (2.18) значение ширины пропускания можно вычислить в соответствии с выражением [376]:

$$h_{N_k} = 0,9 A_{N_k} I^{-0,2}, \quad (2.23)$$

где A_{N_k} – вычисляется как минимальное из значений стандартного отклонения k -й последовательности выборки исходных данных и интерквартильного диапазона этой же последовательности соответствующего ПЭФ N , разделенного в последствии на 1,34.

При избыточной изменчивости полученной функции плотности вероятности допускается применение правила Стёрджеса для поиска пропускной способности [381]:

$$h_x = \frac{R_x}{1 + \log_2 n_x} = \frac{x_{max} - x_{min}}{1 + \log_2 n_x}. \quad (2.24)$$

Функция плотности вероятности определяется в соответствии с выражением:

$$\begin{aligned} f(T_3^B, T_3^K, SSIM, DISTS, P_{потерь}) = & \frac{1}{E} \sum_{i=1}^E \frac{1}{h_{T_3^B}} Y\left(\frac{T_3^B - T_{3i}^B}{h_{T_3^B}}\right) \cdot \frac{1}{h_{T_3^K}} Y\left(\frac{T_3^K - T_{3i}^K}{h_{T_3^K}}\right) \cdot \\ & \cdot \frac{1}{h_{SSIM}} Y\left(\frac{SSIM - SSIM_i}{h_{SSIM}}\right) \cdot \frac{1}{h_{PSNR}} Y\left(\frac{DISTS - DISTS_i}{h_{DISTS}}\right) \cdot \frac{1}{h_{P_{потерь}}} Y\left(\frac{P_{потерь} - P_{потерь i}}{h_{P_{потерь}}}\right). \end{aligned} \quad (2.25)$$

Полученная плотность вероятности (2.25) позволит на основе ее многократного интегрирования оценить значение вероятности достижения комплекса целей функционирования СИО:

$$\begin{aligned} P = \int_{P_{потерь}^{тр}} \int_{DISTS^{тр}} \int_{SSIM^{тр}} \int_{T_3^K^{тр}} \int_{T_3^B^{тр}} f(T_3^B, T_3^K, SSIM, DISTS, P_{потерь}) \\ dP_{потерь} dDISTS dSSIM dT_3^K dT_3^B. \end{aligned} \quad (2.26)$$

В настоящее время существуют различные способы вычисления интеграла (2.26). В частности, возможно использование специализированных встроенных функций пакетов компьютерной математики, включая Matlab [376]. Вместе с тем указанные функции, как правило, ограничены реализацией интегрирования первого и второго порядков. Для реализации интегрирования высших порядков предложено применение метода вложенных интегралов. Однако данный подход характеризуется существенными ограничениями при

работе со сложными подынтегральными функциями, проявляющимися в виде высокой вычислительной сложности и относительно низкой точности результатов, особенно при увеличении порядка кратности интеграла.

Результаты проведённого анализа указывают на целесообразность применения метода стохастического численного интегрирования на основе алгоритма Монте-Карло [382] для расчёта искомой вероятности (2.26). Основа данного подхода заключается в статистической оценке интеграла посредством вычисления значений подынтегральной функции в случайно распределённых точках I -мерного евклидова пространства. Величина интеграла определяется как произведение математического ожидания функции на объём рассматриваемой области, численно представленной выбранным множеством точек [383].

Реализованная таким образом оценка вероятности попадания ПЭФ СИО в область заданных требований создаёт методическую основу для последующего обоснования оптимальных значений параметров, характеризующих их облик.

2.2.4 Постановка задачи

Так как качество решения целевых задач взаимодействия оператора с беспилотной системой зависит от эффективного функционирования системы взаимодействия оператора и беспилотной системы, то задача обоснования облика такой системы становится актуальной [384]. Для решения этой задачи необходим научно-методический аппарат, позволяющий получить зависимость показателей эффективности (ПЭ) системы взаимодействия оператора и беспилотной системы от параметров, характеризующих ее облик.

Задача диссертационного исследования заключается в обосновании облика системы взаимодействия оператора и беспилотной системы, при котором будет соблюдаться минимизация ПЭФ T_3^B и T_3^K при обеспечении требуемого качества видеопотока. Облик системы взаимодействия оператора и беспилотной системы будут составлять функциональные блоки,

обеспечивающие сжатие видеопотока и КВО БПЛА, передачу этих данных и их последующее восстановление. В качестве таких блоков, определяющих облик системы взаимодействия оператора и беспилотной системы, целесообразно использовать модели кодирования видеопотока и КВО, а также КИО (рис. 2.4). Таким образом, параметрами, характеризующими облик системы взаимодействия оператора и беспилотной системы, будут являться параметры моделей кодирования и КИО. При этом (2.26) можно представить в виде, при котором должны соблюдаться условия минимизации задержки в канале информационного обмена при определенной вероятности обеспечения требований к качеству видеопотока:

$$w^* = \arg \min_{w \in \Delta} \begin{cases} T_3^B \\ T_3^K \end{cases}, \quad (2.27)$$

$$\Delta = \left\{ w \mid P \left[\text{SSIM}(w) \in \Pi_1; \text{DISTS}(w) \in \Pi_2; P_{\text{потерь}}(w) \in \Pi_3 \right] \geq P^{\text{тр}} \right\}, \quad (2.28)$$

$$\tilde{\Pi} = \left\{ \Pi_1 = \{0; \text{SSIM}^{\text{тр}}\}, \Pi_2 = \{0; \text{DISTS}^{\text{тр}}\}, \Pi_3 = \{0; P_{\text{потерь}}^{\text{тр}}\} \right\}, \quad (2.29)$$

$$\begin{aligned} P \left[\left\{ \text{SSIM}, \text{DISTS}, P_{\text{потерь}} \right\} \in \tilde{\Pi} \right] = \\ = \underbrace{\int \int \int}_{\tilde{\Pi}} \left(\text{SSIM}, \text{DISTS}, P_{\text{потерь}} \right) dP_{\text{потерь}} d\text{DISTS} d\text{SSIM}, \end{aligned} \quad (2.30)$$

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

2.2.5 Рассинхронизация видеопотока и команд взаимодействия оператора

Значимая проблема взаимодействия оператора с беспилотной системой заключается во временной рассинхронизации видеопотока и КВО. Временная рассинхронизация определяется как разница между временной меткой полётной ситуации, отображаемой конкретным кадром видеопотока, и моментом формирования оператором соответствующих КВО, основанных на этом кадре. Увеличенное время рассинхронизации приводит к передаче оператору устаревшей информации о текущей полётной обстановке, что

вызывает задержку подачи на БПЛА актуальных команд для маневрирования. Суммарное время задержки видеопотока T_3^B и времени задержки КВО T_3^K характеризует общее время рассинхронизации взаимодействия оператора и беспилотной системы T_p в КИО (рис. 2.6):

$$T_p = T_3^B + T_3^K. \quad (2.31)$$

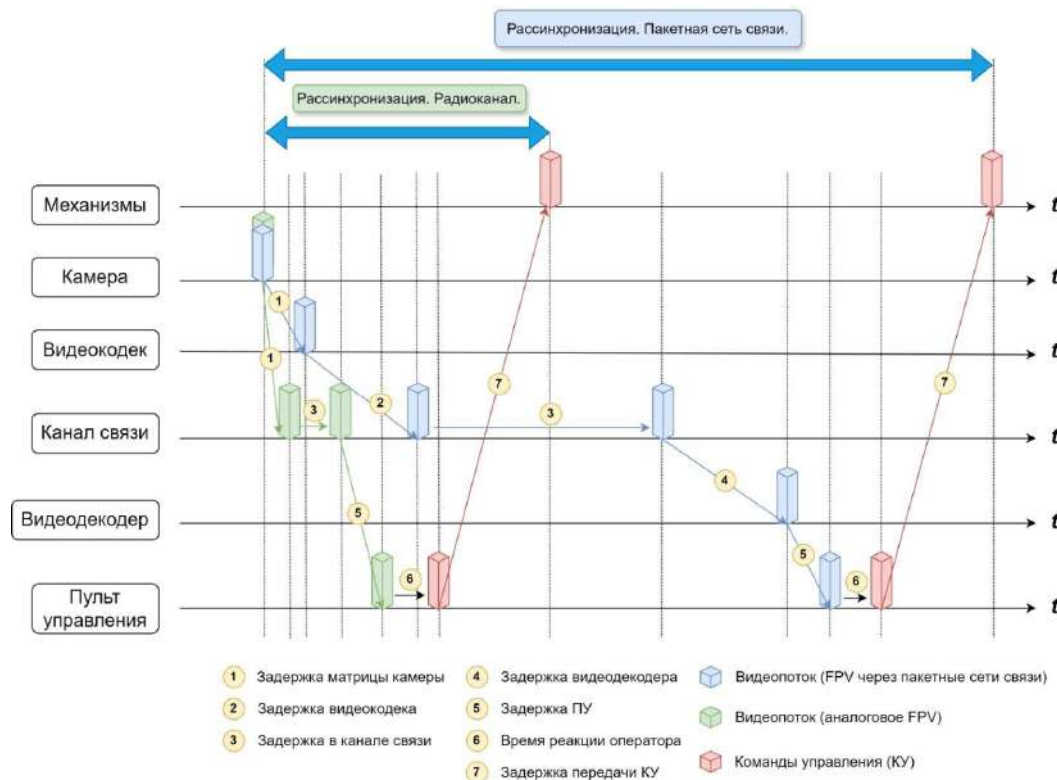


Рисунок 2.6 – Рассинхронизация в системе взаимодействия оператора и беспилотной системы

Такой тип временной диаграммы (рис. 2.6) впервые был введен в статье Владимирова С. С. и Кучерявого А. Е. 2018 года «Механизм компенсации задержек для приложений тактильного интернета» [385] в рамках задачи по предсказанию тактильных ощущений. Он хорошо отражает изменение состояний во времени и подходит для иллюстрации проблемы рассинхронизации, рассматриваемой в данном разделе.

Параметр T_3^B включает в себя время кодирования кадров видеопотока взаимодействия оператора и беспилотной системы $T_{\text{код}}^B$, время декодирования кадров $T_{\text{декод}}^B$, параметр сетевой задержки $T_{\text{сеть}}$:

$$T_3^B = T_{\text{код}}^B + T_{\text{декод}}^B + T_{\text{сеть}}. \quad (2.32)$$

Задержка в КИО для передачи КВО T_3^B является суммой времени кодирования КВО $T_{\text{код}}^B$, времени декодирования КВО $T_{\text{декод}}^B$ и сетевой задержки $T_{\text{сеть}}$:

$$T_3^K = T_{\text{код}}^K + T_{\text{декод}}^K + T_{\text{сеть}}. \quad (2.33)$$

Задержка в сети $T_{\text{сеть}}$ включает задержку коммутации и маршрутизации T_r , задержку в очередях T_q , задержку сериализации T_s и задержку распространения T_{prop} [386].

$$T_{\text{сеть}} = T_s + T_{\text{prop}} + T_r + T_q. \quad (2.34)$$

При этом задержка сериализации T_s представляет собой задержку на передачу всех данных в КИО. Она вычисляется как частное количества бит передаваемых данных $payload$ и полосы пропускания канала B [387]:

$$T_s = \frac{payload}{B}. \quad (2.35)$$

Время передачи данных по КИО характеризуется задержкой распространения сигнала T_{prop} . В КИО передача данных зависит от физических свойств носителей сигнала и среды распространения. В частности, при взаимодействии оператора с беспилотной системой по радиоканалу передача осуществляется с помощью электромагнитных волн в радиочастотном диапазоне, распространяющихся в вакууме приблизительно со скоростью света 3×10^8 м/с с учетом возможных влияний атмосферных условий, таких как задержка из-за тропосферы. Аналогично, при использовании оптоволоконных линий электромагнитные волны передаются в оптическом диапазоне, при этом скорость распространения сигнала в оптоволокне составляет примерно 2×10^8 м/с. При этом задержка распространения определяется как отношение расстояния d между передатчиком и приемником к скорости распространения:

$$T_{\text{prop}} = \frac{d}{3 \times 10^8}. \quad (2.36)$$

Задержка коммутации и маршрутизации T_r формируется за счет суммарного времени обработки пакетов на промежуточных активных сетевых

устройствах, проявляющегося в процессе принятия решений о выборе выходного порта для пересылки пакета.

Задержка в очередях T_q определяется суммарным временем ожидания пакетов в буферах промежуточных сетевых устройств перед их дальнейшей передачей. Величина этой задержки прямо пропорциональна степени загруженности сети и увеличивается при росте интенсивности сетевого трафика. Таким образом, задержка передачи данных в сетях определяется комплексом факторов, включающих особенности среды распространения сигнала, архитектуру и нагрузку активных сетевых устройств, а также динамику формирования очередей передачи.

С учетом (2.32–2.36) выражение (2.31) можно представить в следующем виде:

$$T_p = T_{\text{код}}^B + T_{\text{декод}}^B + T_{\text{код}}^K + T_{\text{декод}}^K + 2 \left(\frac{\text{payload}}{B} + T_r + T_q + \frac{d}{3 \times 10^8} \right). \quad (2.37)$$

2.2.6 Модель КИО наземного сегмента ГОНСС

Различные структуры каналов информационного обмена представляют собой совокупность множества сегментов передачи данных, каждый из которых характеризуется собственной функцией распределения задержек и вероятностей потерь кадров видео и КВО. Объединение этих сегментов формирует модель *гибридного КИО* (рис. 2.7, рис. 2.8). Для наземного сегмента ГОНСС в качестве такого КИО выступает мобильная сеть связи.



Рисунок 2.7 – Структура КИО наземного сегмента

На рисунке 2.8 представлена структура некоторых КИО ГОНСС для

взаимодействия оператора и беспилотной системы (соответствующие сегменты КИО выделены различным цветом). С учетом наличия в составе ГОНСС сегментов с различными технологиями передачи данных, что в первую очередь влияет на задержку передачи видеопотока и на структуру используемых нейросетевых видеокодеков, необходимо определить законы распределения такой задержки для наземного и космического сегментов.

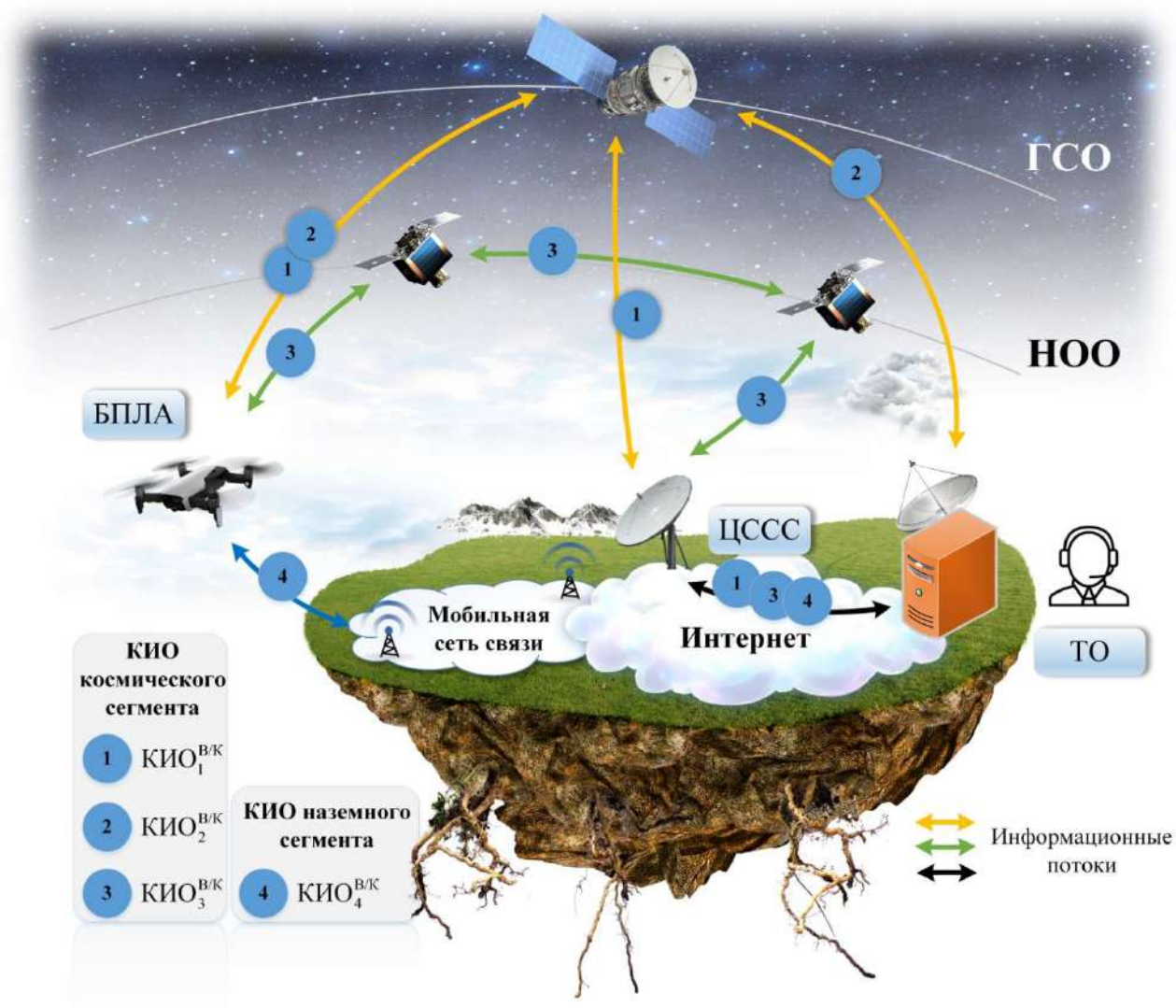


Рисунок 2.8 – Структура каналов информационного обмена

Определение задержки на уровне приложения проводилось с применением программного обеспечения (ПО) на языке программирования Python 3.11. ПО было разработано специально для исследования такой задержки и состоит из клиентской и серверной части. Принцип работы данного ПО описан далее.

Пусть кадр видеопотока представляет собой полезную нагрузку, которую необходимо передать со стороны БПЛА на сторону оператора. Для каждой полезной нагрузки размером $payload_i$ байт, формируется N пакетов

$$\begin{cases} N = 1, \frac{payload_i}{1385} < 1 \\ N = \left\lceil \frac{payload_i}{1385} \right\rceil, \frac{payload_i}{1385} \geq 1 \end{cases}, \quad (2.38)$$

Объём каждого пакета кроме последнего – 1385 байт с учетом ограничений MTU=1500 интернет сегмента КИО. N -й пакет имеет объём $payload_i - \left\lceil \frac{payload_i}{1385} \right\rceil \cdot 1385$ байт. К каждому пакету добавляется 20 байт в качестве системных заголовков. Пакеты отправляются по протоколу UDP со стороны БПЛА с интервалом в 1 мс. Таймаут подключения равен 5 секундам. При получении всех пакетов, которые относятся к некоторой полезной нагрузки, проводится их декапсуляция, упорядочивание, обратная инкапсуляция и отправка обратно на сторону отправителя. Далее проводится упорядочивание пакетов и сравнение восстановленной и исходной полезной нагрузки (рис. 2.9). Значение задержки КИО вычисляется по формуле:

$$t_{\text{КИО}} \approx \frac{(t_{fc} + t_{bc})}{2}, \quad (2.39)$$

где t_{fc} – задержка в канале «БПЛА→ТО», t_{bc} – задержка в канале «ТО→БПЛА».

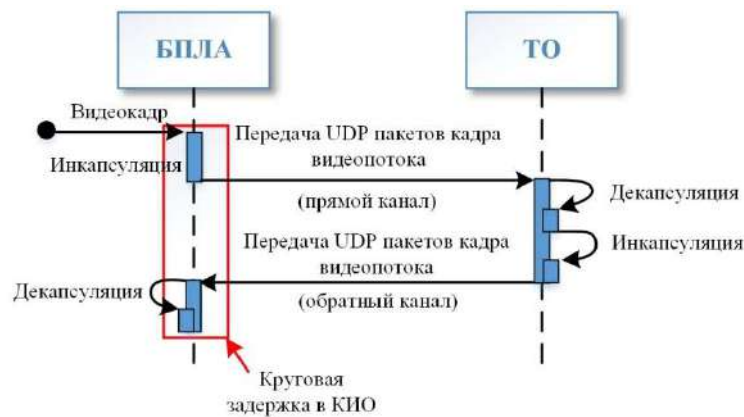


Рисунок 2.9 – Измерение задержек на уровне приложения

В результате проведения 10000 итераций передачи сжатых видеок кадров между БПЛА и ТО для каждого варианта пространственного размещения

БПЛА была сформирована выборка значений параметра $t_{\text{КИО}}$. Обработка полученных данных позволила установить характер распределения данной величины с применением метода Парзена–Розенблатта (2.17), где общее количество измерений $K=10000$.

Для определения зависимости параметров закона распределения задержки от расстояния между БПЛА и ТО были проведены измерения такой задержки из следующих городов Российской Федерации: Петергоф (23 км), Великий Новгород (166 км), Череповец (438 км), Москва (635 км), Архангельск (735 км), Апатиты (860 км), Оленегорск (930 км), Сочи (1926 км), Южно-Сахалинск (6660 км) (рис. 2.10). Для передачи данных были использованы технологии 3G и LTE/LTE adv. В качестве исследуемых вариантов размеров полезной нагрузки использовались следующие размеры: 100, 300, 500, 700, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 7000, 10000, 15000, 20000, 30000, 50000, 70000, 100000 и 500000 байт.

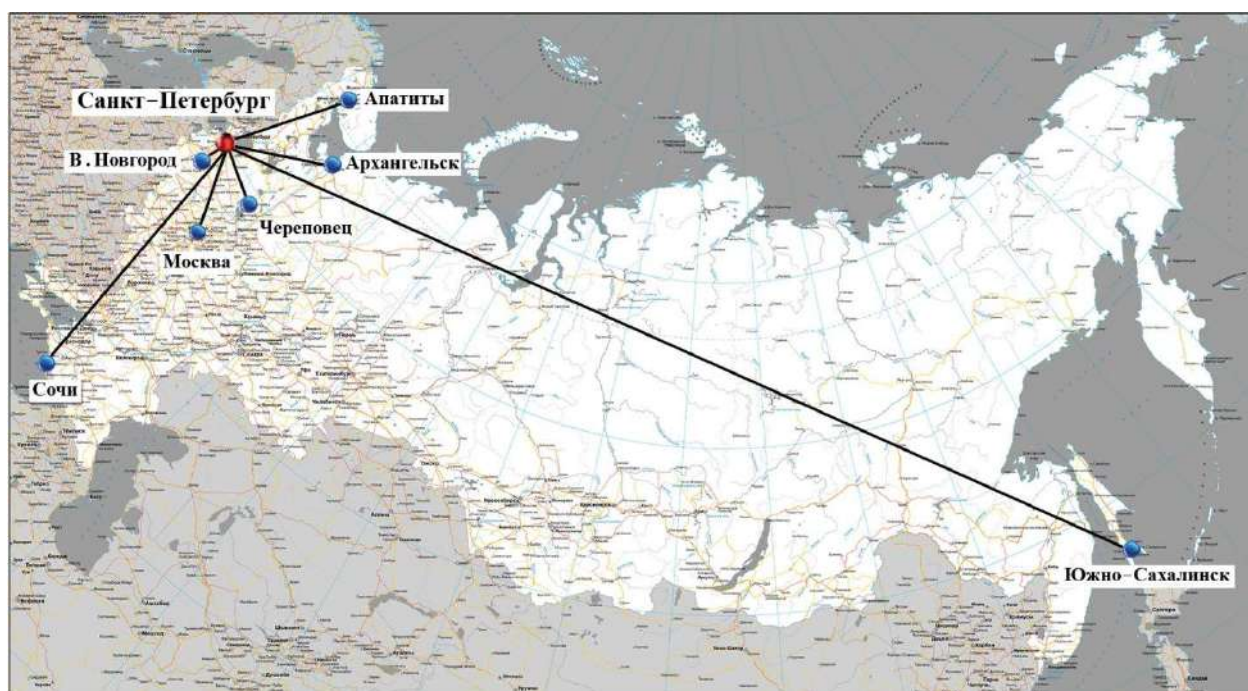


Рисунок 2.10 – Расстояния КИО на карте РФ

Выявленные распределения параметра $t_{\text{КИО}}$, характеризующего процесс передачи видеопотока наземного сегмента ГОНСС, для различных размеров полезной нагрузки позволили определить наиболее вероятное значение,

математическое ожидание и дисперсию данного параметра. Эти результаты обеспечили возможность оценки влияния характеристик полезной нагрузки на указанные статистические показатели при различных конфигурациях расположения БПЛА.

Как показали результаты исследований, распределение задержки прикладного уровня наземного сегмента ГОНСС для различных вариантов сочетаний расположения БПЛА, размера полезной нагрузки и используемой технологии передачи подчиняется закону усеченного двухпараметрического бета-распределения [388] (рис. 2.11).

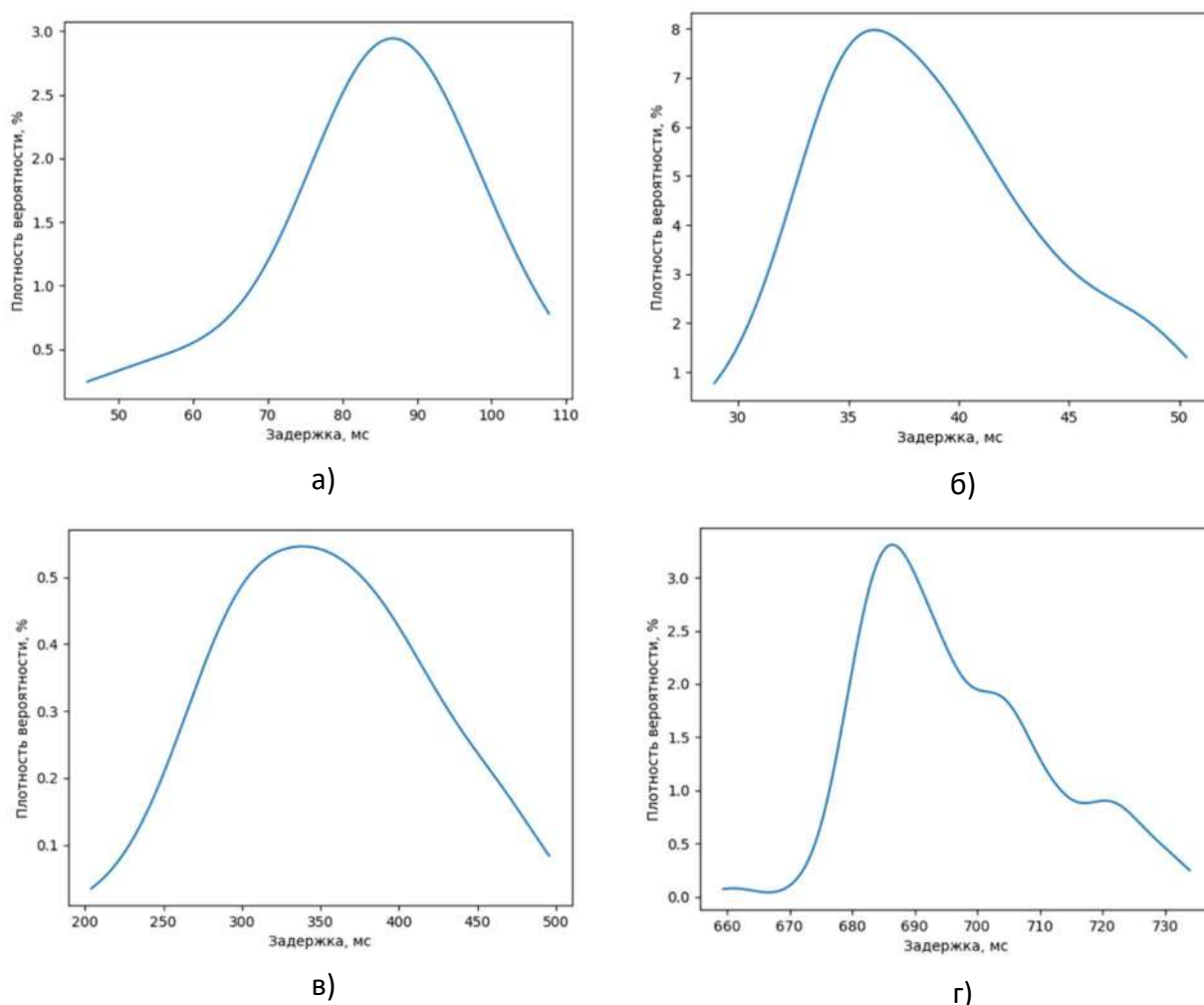


Рисунок 2.11 – Плотности вероятности величины задержки:

- а) Апатиты: сеть 3G и 100 байт полезной нагрузки; б) Архангельск: сеть LTE и 5000 байт полезной нагрузки; в) Сочи: сеть 3G и 20000 байт полезной нагрузки; г) Южно-Сахалинск: сеть LTE и 500 килобайт полезной нагрузки.

Выявленный закон бета-распределения учитывает следующие особенности формирования $t_{\text{КИО}}$:

1. Существует такая величина задержки $t_{\text{КИО}}^{\text{макс}}$, выше которой задержка не возрастает, несмотря на стечение самых неблагоприятных обстоятельств, и такая величина задержки $t_{\text{КИО}}^{\text{мин}}$, ниже которой задержка не уменьшается. Данная особенность требует, чтобы закон распределения был усеченным.
2. Задержка представляет собой непрерывную случайную величину с областью допустимых значений из интервала $[t_{\text{КИО}}^{\text{мин}}, t_{\text{КИО}}^{\text{макс}}]$. Данная особенность требует, чтобы закон распределения был непрерывным.
3. Среди всех наблюдаемых задержек могут встречаться задержки, которые зависят от большого числа случайных факторов, каждый из которых в отдельности является малосущественным, а также задержки, на которые оказывает влияние небольшое число важных факторов. Данная особенность требует, чтобы закон распределения был таким, при котором наиболее вероятное значение $t_{\text{КИО}}$ могло располагаться в любом месте интервала $[t_{\text{КИО}}^{\text{мин}}, t_{\text{КИО}}^{\text{макс}}]$.

Поскольку практические задачи требуют выбора распределения, наилучшим образом удовлетворяющего установленным статистическим критериям, в данном случае наиболее адекватной моделью является бета-распределение. Проверка выдвинутой гипотезы осуществлялась с применением критериев согласия Пирсона и Колмогорова-Смирнова.

Критерий Пирсона основан на вычислении статистики расхождения χ^2 между теоретическими вероятностями p_i и наблюдаемыми частотами p_i^* .

В результате проверки была получена величина статистики расхождения $\chi^2=3.94$. Согласно табличным значениям, соответствующая вероятность составила приблизительно 0,56. Этот показатель нельзя считать малым, следовательно, гипотеза о соответствии случайной величины $t_{\text{КИО}}$ закону бета-распределения является обоснованной.

Критерий Колмогорова-Смирнова основан на вычислении меры расхождения между теоретическим и статистическим распределениями, в качестве которой рассматривается максимальное значение модуля разности между статистической функцией распределения $F^*(x)$ и соответствующей теоретической функцией распределения:

$$D = \max |F^*(x) - F(x)|. \quad (2.40)$$

Исходя из максимального значения модуля разности D была определена величина

$$\lambda = D\sqrt{n} = 0,8. \quad (2.41)$$

Полученному значению λ соответствует табличное значение вероятности $P(\lambda) = 0,544$. Так как данное значение вероятности можно отнести к сравнительно большому, то гипотезу о соответствии случайной величины $t_{\text{КИО}}$ закону бета-распределения также можно считать достоверной.

Плотность вероятности бета-распределения определяется по формуле [389]:

$$p(lat) = \frac{(lat - lat_{\text{мин}})^{\alpha-1} \times (lat_{\text{макс}} - lat)^{\beta-1}}{(lat_{\text{макс}} - lat_{\text{мин}})^{\alpha+\beta-1} \times B(\alpha, \beta)}, \quad (2.42)$$

где α и β – параметры формы бета-распределения, а B – бета-функция:

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} dx, \quad (2.43)$$

Параметры бета-распределения α и β находятся из системы уравнений:

$$\begin{cases} t_{\text{КИО}}^{\text{HB}} = t_{\text{КИО}}^{\text{мин}} + (t_{\text{КИО}}^{\text{макс}} - t_{\text{КИО}}^{\text{мин}}) \frac{\alpha - 1}{\alpha + \beta - 2}, \\ \sigma = (t_{\text{КИО}}^{\text{макс}} - t_{\text{КИО}}^{\text{мин}}) \frac{\sqrt{\alpha\beta}}{(\alpha + \beta)\sqrt{\alpha + \beta + 1}} \end{cases}, \quad (2.44)$$

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

$$t_{\text{КИО}}^{\text{HB}} = \operatorname{argmax}(\hat{p}(t_{\text{КИО}})). \quad (2.45)$$

Перед вычислением (2.42) необходимо очистить выборку T от выбросов в

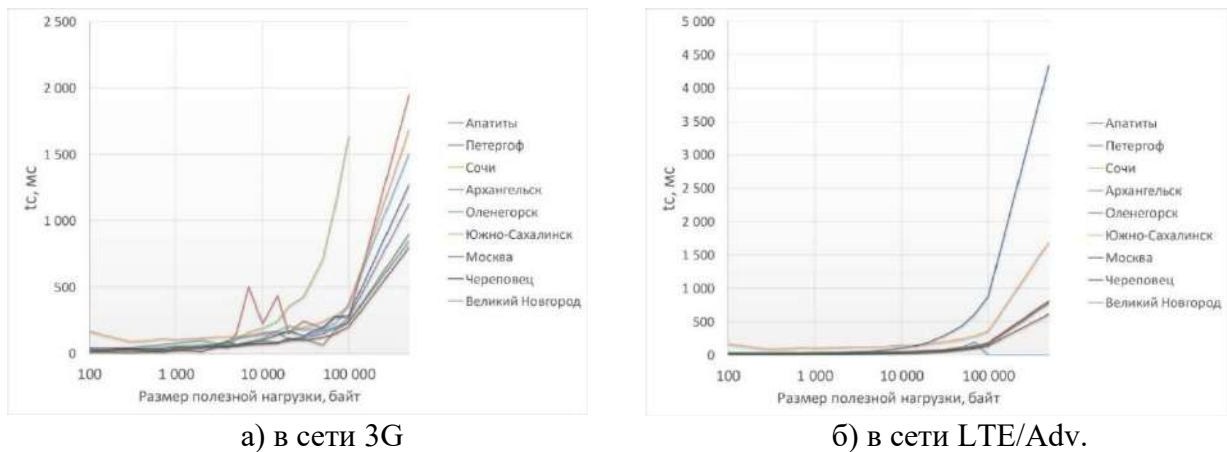
соответствии с квартильным критерием, где $Q1$ – первый квартиль, $Q3$ – третий квартиль, а $IQR = Q3 - Q1$ – межквартильное расстояние:

$$t_{\text{КИО}}^i \in T : \begin{cases} t_{\text{КИО}}^i < Q3 + IQR \\ t_{\text{КИО}}^i > Q1 - IQR \end{cases} \quad (2.46)$$

Анализ полученных эмпирических плотностей вероятности показал, что значения указанных параметров для наземного сегмента ГОНСС находятся в диапазоне

$$2 \leq \alpha \leq 9; 2 \leq \beta \leq 14. \quad (2.47)$$

Зависимости математического ожидания величины задержки на уровне приложения от объёма полезной нагрузки представлены на рисунке 2.12.



а) в сети 3G

б) в сети LTE/Adv.

Рисунок 2.12 – Зависимость задержки от объёма полезной нагрузки

Зависимость величины задержки от объёма передаваемой полезной нагрузки представляет собой показательную функцию. При изменении объёма полезной нагрузки от 100 до 15000 байт флуктуации задержки незначительны и равны в среднем 35 мс как для 3G, так и для LTE/LTE adv.

Следует отметить, что усреднённые размеры сжатых кадров видеопотока при применении нейросетевого кодека находятся в диапазоне [500; 9000] байт [390], что соответствует установленным ограничениям. В связи с этим можно заключить, что при передаче видеопотока в КИО наземного сегмента ГОНСС рационально использовать единую конфигурацию нейросетевого кодека, обеспечивающую наилучшее качество реконструируемых кадров видеопотока [391]. Исключение: при расстоянии более 6000 км задержка при данных объёма полезной нагрузки составляет 100 мс и более.

По результатам проведённого эксперимента установлено, что уровень потерь кадров видеопотока (рис. 2.13) при передаче полезной нагрузки в диапазоне от 100 до 15000 байт не демонстрирует зависимости от расстояния и используемой технологии передачи данных. Среднее значение данного показателя составляет менее одного процента, если не учитывать кратковременные обрывы соединения. Однако при увеличении размера полезной нагрузки свыше 15000 байт влияние указанных факторов становится существенным. В частности, при передаче пакетов объёмом 50000 байт на расстояние свыше 1500 км с использованием технологии 3G из-за низкой скорости и ограничения на время передачи уровень потерь кадров видеопотока в КИО может достигать 90%.

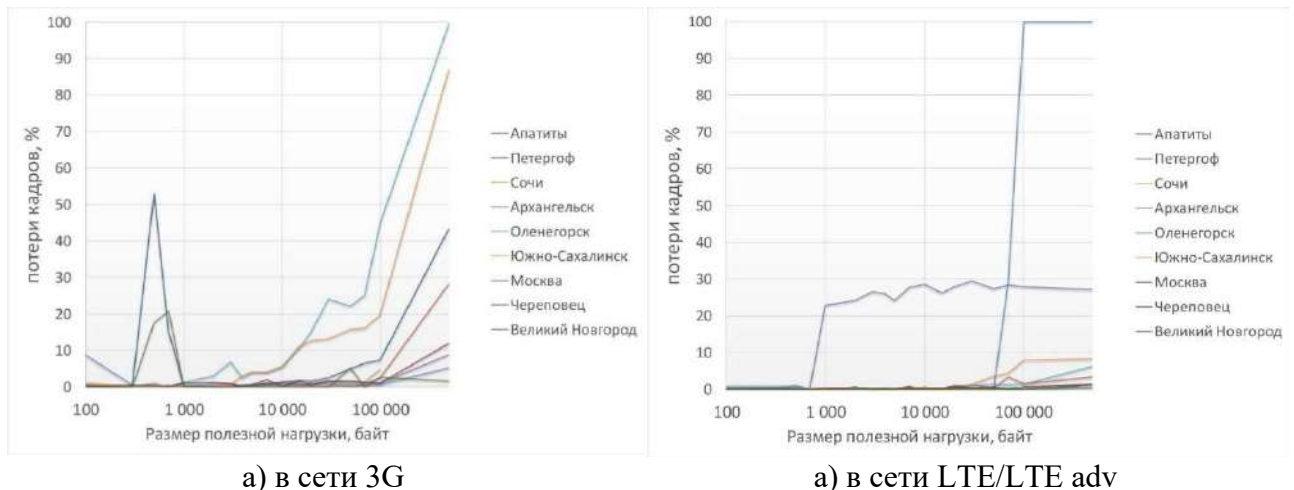


Рисунок 2.13 – Зависимость потерь кадров от размера полезной нагрузки

Использование полученных экспериментальных данных в процессе моделирования функционирования КИО обеспечивает возможность выбора оптимальной конфигурации нейросетевых кодеков, направленной на повышение эффективности работы системы информационного обмена в целом. Кроме того, результаты исследования могут быть применены при проектировании и организации каналов информационного обмена, основанных на использовании стандартных видеокодеков.

2.2.7 Модель КИО космического сегмента ГОНСС

Для космического сегмента ГОНСС в качестве КИО выступают спутниковые сети связи (рис. 2.8). Из-за высокой задержки распространения сигнала спутниковые сети связи имеют большую задержку на уровне приложения. Спутниковые системы связи образуют спутниковые аппараты на: низкой околоземной орбите (НОО) [392], средней околоземной орбите (СОО) [393], высокой околоземной орбите (ВОО) [394] и геостационарной орбите (ГСО) [395]. Их расстояния над экватором над уровнем моря соответственно равны: от 200 до 1500 километров над экватором – для НОО, от 1500 до 35 786 – для СОО; 35 786 км – для ГСО; свыше 35 786 км – для ВОО [396]. Задержки НОО оцениваются приблизительно как 50 мс, СОО – 180-360 мс, ГСО – 600 мс, ВОО – более 600 мс [397].

В настоящем разделе рассматриваются модели КИО для низкоорбитальных и геостационарных спутниковых систем связи. Некоторые варианты организации гибридных КИО представлены на рисунке 2.14, где красной пунктирной линией выделены сегменты с различной технологией передачи данных.

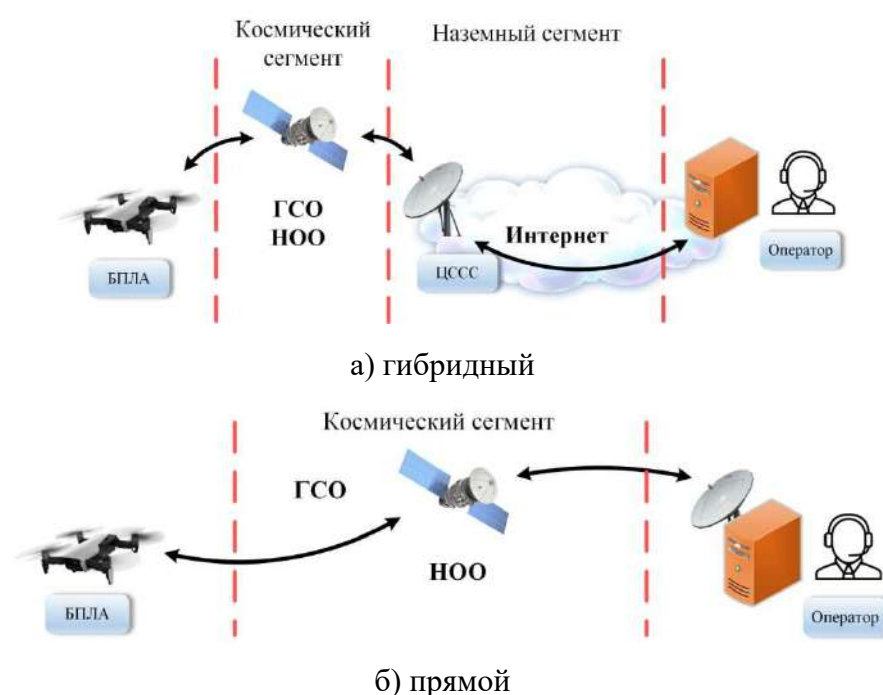


Рисунок 2.14 – Различные КИО космического сегмента ГОНСС

2.2.7.1 Низкоорбитальные спутниковые системы связи

Европейский регион

Для низкоорбитальной спутниковой системы связи «Starlink» в Европейском регионе получены плотности вероятности величины задержки на уровне приложения при использовании в качестве КИО при разной величине полезной нагрузки [398]. Полученные плотности вероятности позволили сделать вывод, что величина такой задержки при передаче полезной нагрузки в диапазоне от 100 до 3000 байт подчиняется усеченному двух-параметрическому закону бета-распределения (рис. 2.15).

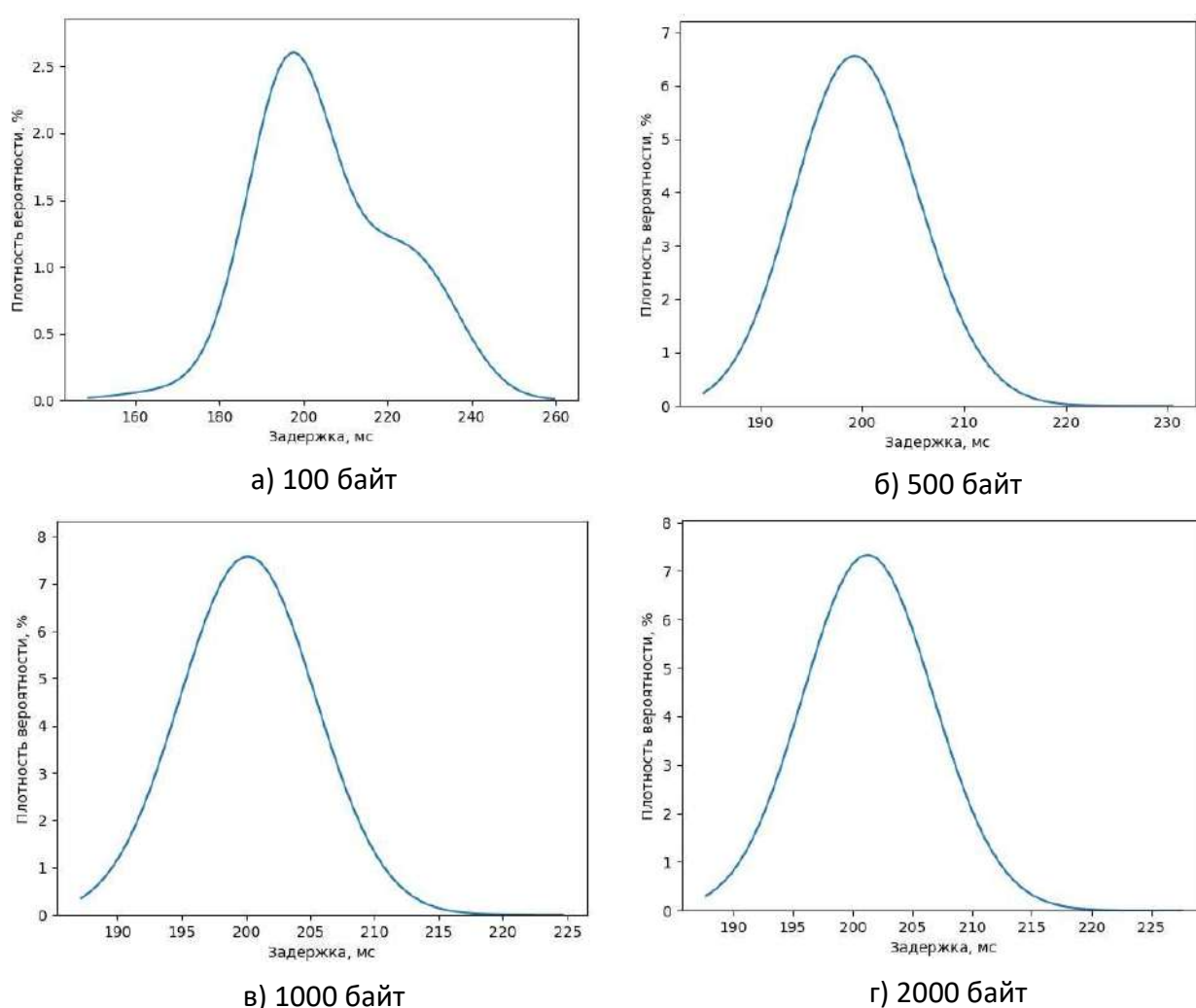


Рисунок 2.15 – Плотности вероятности величины задержки при использовании в качестве КИО «Starlink» при величине полезной нагрузки от 100 до 2000 байт

Проверка выдвинутой гипотезы осуществлялась также с применением критериев согласия Пирсона и Колмогорова-Смирнова. В результате проверки была получена величина статистики расхождения $\chi^2=4,35$. Согласно табличным значениям, соответствующая вероятность составила приблизительно 0,5.

Значение λ при использовании критерия Колмогорова-Смирнова равно 0,9, а соответствующая ему вероятность 0,393.

Так как значение обеих вероятностей нельзя считать малым, то это подтверждает обоснованность гипотезы о соответствии случайной величины $t_{\text{кио}}$ закону бета-распределения.

Интервалы изменения параметров формы (α и β) бета-распределения, полученные с использованием выражений (2.44), принимают следующие значения:

$$0,3 \leq \alpha \leq 3,6; 0,8 \leq \beta \leq 4. \quad (2.48)$$

Следует отметить, что параметры α и β принимают практически равные значения, что позволяет заключить о близости распределения величины задержки к нормальному закону. При этом при полезной нагрузке, объём которой лежит в интервале [3000, 15000], величины задержки распределены в соответствии с бимодальным законом распределения (рис. 2.16), т.е. плотность вероятности величины $t_{\text{кио}}$ представляет собой смесь двух нормальных распределений (рис. 2.17).

$$f(t_{\text{кио}}) = af_1(t_{\text{кио}}) + bf_2(t_{\text{кио}}), \quad (2.49)$$

где a и b – это весовые коэффициенты.

Параметры законов распределения (2.49) $f_1(t_{\text{кио}})$ и $f_2(t_{\text{кио}})$ при изменении величины передаваемой полезной нагрузки от 3000 до 15000 байт остаются неизменными и равны, соответственно:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 205 \text{ мс}, \sigma_1 = 3 \text{ мс}, \\ \mu_2 &= 230 \text{ мс}, \sigma_2 = 10 \text{ мс}. \end{aligned} \quad (2.50)$$

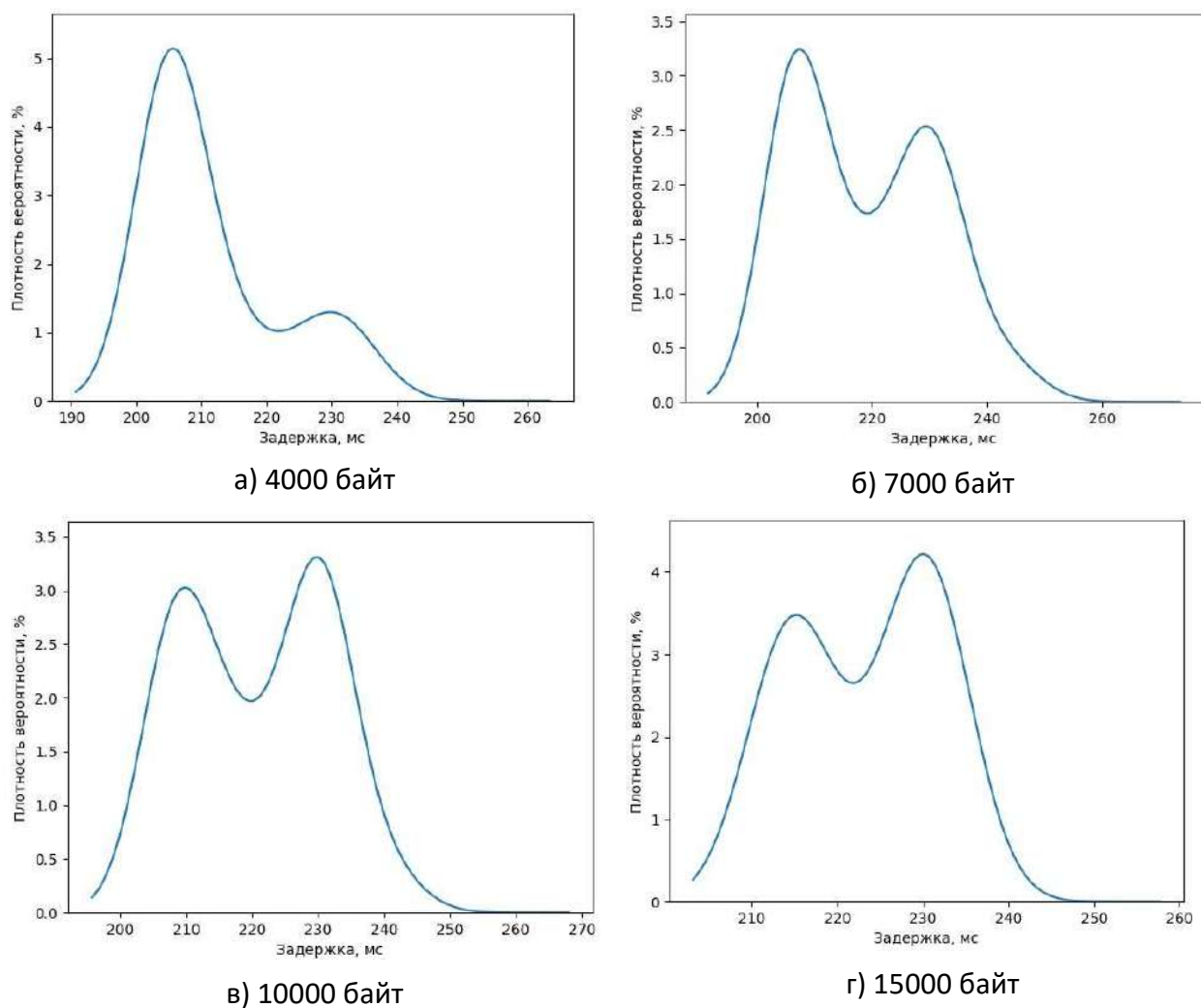


Рисунок 2.16 – Плотности вероятности величины задержки при использовании в качестве КИО «Starlink» при объёме полезной нагрузки от 3000 до 15000 байт

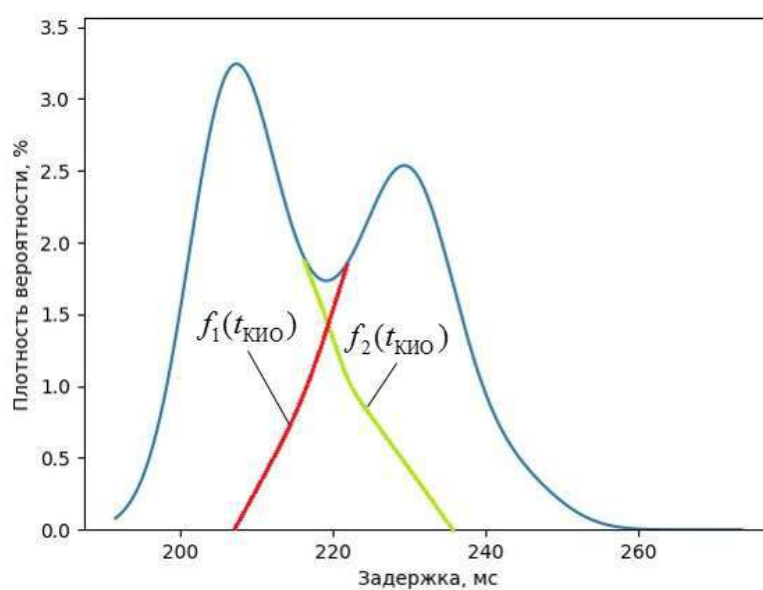


Рисунок 2.17 – Плотности вероятности величины задержки при использовании в качестве КИО ОГ «Starlink» как смесь гауссовых распределений

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

Для оценки весовых коэффициентов a и b был применен метод максимального правдоподобия. Выбор данного метода обоснован его сравнительной простотой и минимальными требованиями к вычислительным ресурсам при оценке параметров смеси распределений, состоящей из двух нормальных распределений с известными параметрами. В качестве альтернативы также могут быть использованы сеточный ЕМ-алгоритм и метод скользящего разделения смесей.

Также следует отметить, что среднее значение потери кадров видеопотока в КИО «Starlink» составляет 5,2% и изменение потери кадров от варьирования полезной нагрузки в диапазоне от 100 до 15000 байт не имеет ярко выраженной зависимости.

Тихоокеанский регион

В Тихоокеанском регионе при передаче через НОО «Starlink» распределения плотности вероятности схожи (рис. 2.18).

Полученные плотности вероятности позволили сделать вывод, что величина задержки на уровне приложения при передаче полезной нагрузки в диапазоне от 100 до 2000 байт также подчиняется усеченному двухпараметрическому закону бета-распределения.

Интервалы изменения параметров формы (α и β) бета-распределения, полученные с использованием выражений (2.44), принимают следующие значения:

$$0,3 \leq \alpha \leq 3,3; 0,9 \leq \beta \leq 3,7. \quad (2.51)$$

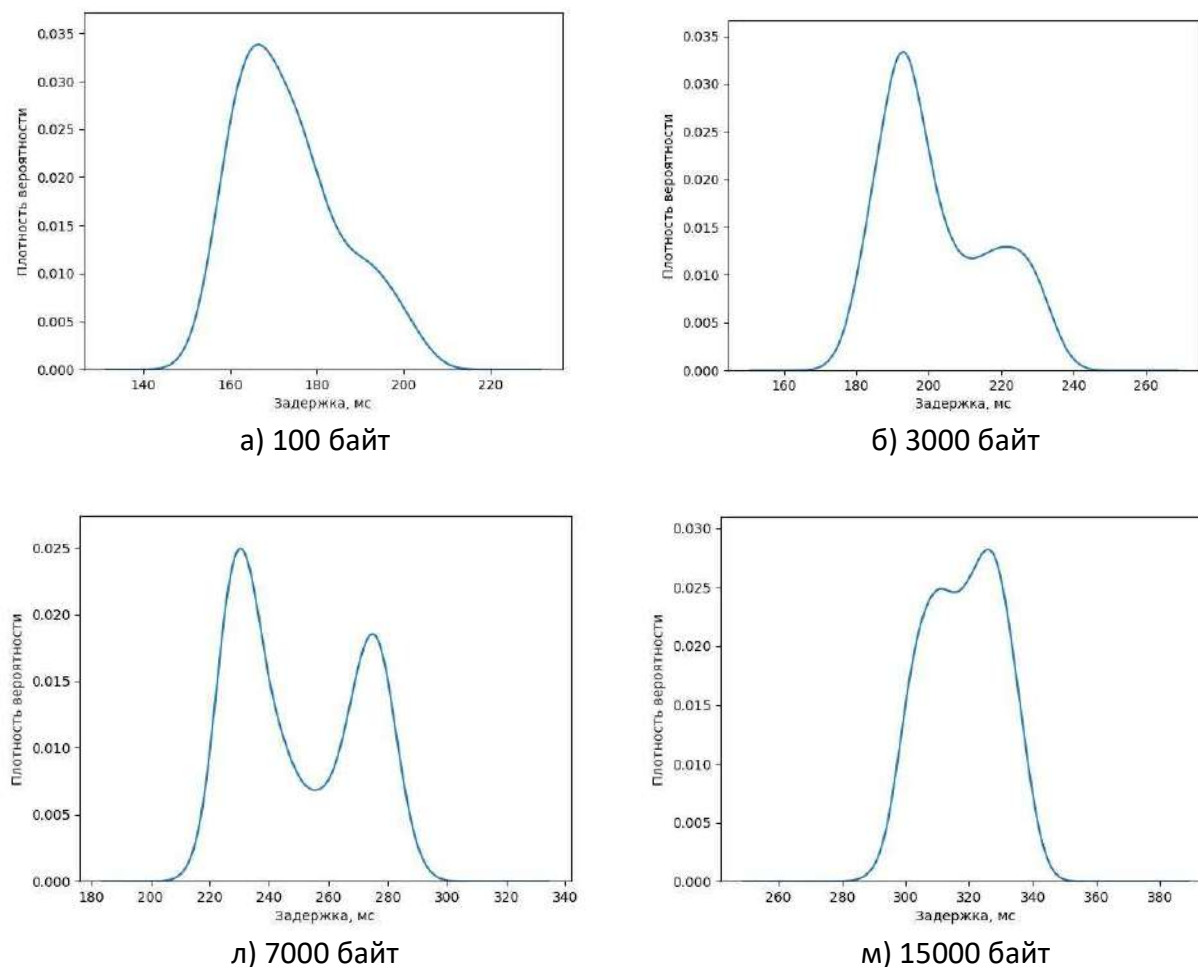


Рисунок 2.18 – Плотности вероятности величины задержки при использовании в качестве КИО ОГ «Starlink» в Тихоокеанском регионе

Следует отметить, что параметры α и β принимают практически равные значения, что позволяет заключить о близости распределения величины задержки к нормальному закону.

Характер изменения параметров формы при использовании в качестве КИО ОГ «Starlink» в Тихоокеанском и Европейском регионах схожи, однако в Тихоокеанском регионе имеется сдвиг наиболее вероятного значения величины задержки в левую сторону (в Тихоокеанском регионе средняя величины наиболее вероятного значения задержки равна 170 мс, в Европейском – 200 мс).

При полезной нагрузке, объем которой лежит в интервале [3000, 15000], величина задержки на уровне приложения также распределена в соответствии с бимодальным законом распределения, представляющим собой смесь двух нормальных распределений.

$$f(t_{\text{кио}}) = af_1(t_{\text{кио}}) + bf_2(t_{\text{кио}}), \quad (2.52)$$

где a и b – это весовые коэффициенты.

Параметры законов распределения (2.52) $f_1(t_{\text{кио}})$ и $f_2(t_{\text{кио}})$ при изменении величины передаваемой полезной нагрузки от 3000 до 4000 байт равны:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 195 \text{ мс}, \sigma_1 = 10 \text{ мс}, \\ \mu_2 &= 225 \text{ мс}, \sigma_2 = 6,7 \text{ мс}. \end{aligned} \quad (2.53)$$

При изменении полезной нагрузки от 5000 до 15000 μ_1 изменяется от 205 мс до 310 мс, а μ_2 изменяется от 225 мс до 330 мс. В свою очередь, изменение величины полезной нагрузки практически не влияет на σ_1, σ_2 ($\sigma_1 = \sigma_2 = 10 \text{ мс}$).

В свою очередь, вес каждого закона распределения при изменении величины полезной нагрузки изменяется. Так при изменении полезной нагрузки от 3000 до 10000 байт наиболее весомым является закон распределения $f_1(t_{\text{кио}})$, а при 15000 байт – $f_2(t_{\text{кио}})$.

Результаты применения в качестве КИО ОГ «Starlink» в Европейском и Тихоокеанском регионах представлены в таблицах 2.1 и 2.2 соответственно.

Таблица 2.1 – Задержки на уровне приложения при использовании ОГ «Starlink» в Европейском регионе

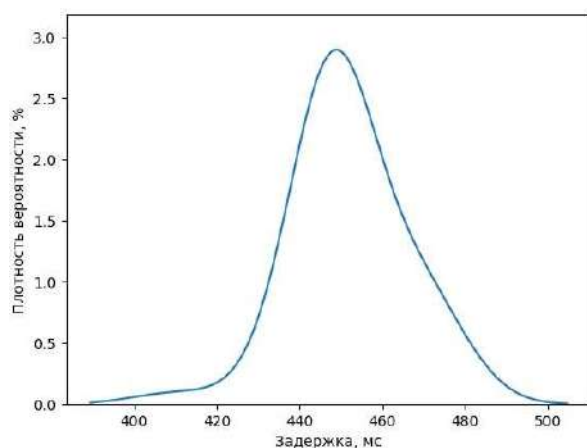
payload, байт	Потери, %	Мат. ожидание	Дисперсия	Наиб. вероятное значение
100	4,60	205,31	208,39	196,20
300	3,80	201,69	138,65	194,01
500	4,70	199,65	11,98	199,55
700	2,10	198,67	11,00	195,41
1 000	0,90	200,17	2,71	199,92
2 000	0,85	201,35	4,55	200,68
3 000	2,20	225,19	229,59	230,42
4 000	3,00	211,50	105,62	204,64
5 000	3,80	215,11	83,64	209,44
7 000	16,03	218,77	150,64	206,26
10 000	13,12	220,79	112,99	230,45
15 000	7,32	223,28	60,37	230,56

Таблица 2.2 – Задержки на уровне приложения при использовании ОГ «Starlink» в Тихоокеанском регионе

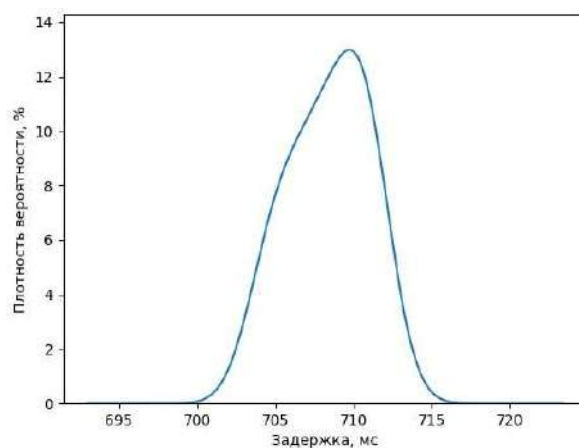
payload, байт	Потери, %	Мат. ожидание	Дисперсия	Наиб. вероятное значение
100	0,40	173,50	135,72	168,24
300	0,70	169,83	116,53	166,09
500	0,20	168,16	81,92	166,18
700	0,90	168,63	70,94	166,95
1 000	1,00	173,79	57,94	172,22
2 000	0,80	182,29	97,97	178,44
3 000	1,40	202,04	213,78	196,96
4 000	1,10	211,24	262,52	206,55
5 000	1,30	220,31	148,48	218,53
7 000	1,90	249,93	440,41	241,92
10 000	2,80	268,58	145,79	264,93
15 000	3,10	318,24	125,13	322,34

2.2.7.2 Геостационарные спутниковые системы связи

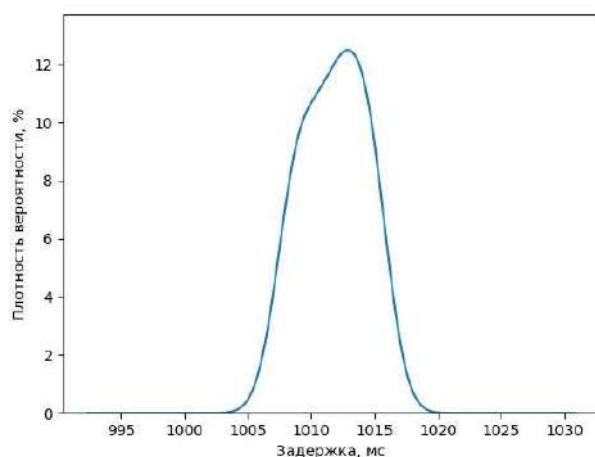
В результате проведенного эксперимента были получены плотности вероятности величины задержки на уровне приложения при использовании в качестве КИО ОГ Ямал-402 (рис. 2.19) Ямал-601 (рис. 2.20) при разной величине полезной нагрузки.



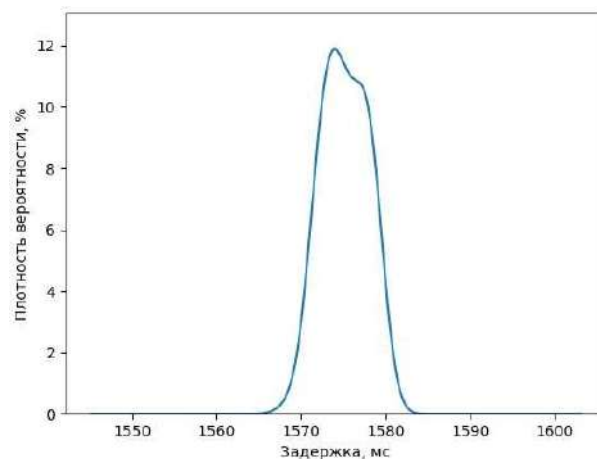
а) 100 байт



б) 500 байт

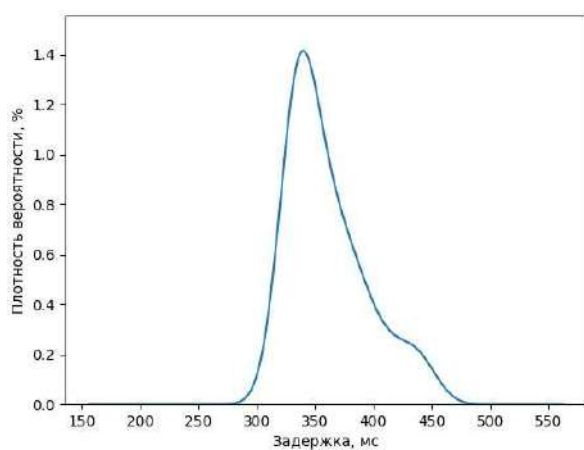


в) 1000 байт

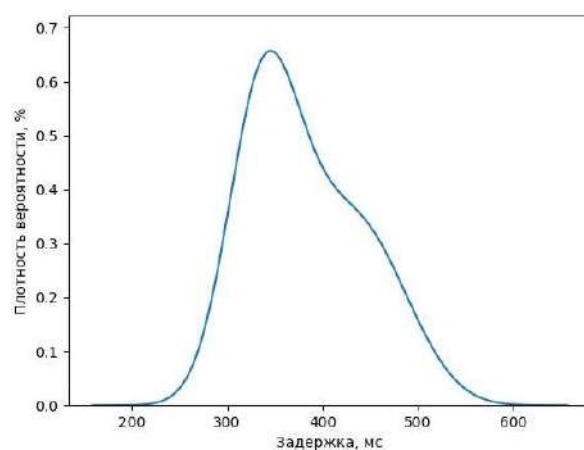


г) 2000 байт

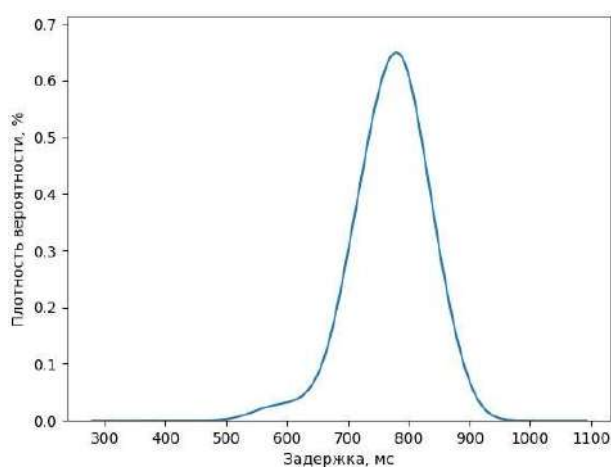
Рисунок 2.19 – Плотности вероятности величины задержки при использовании в качестве КИО ОГ «Ямал-402»



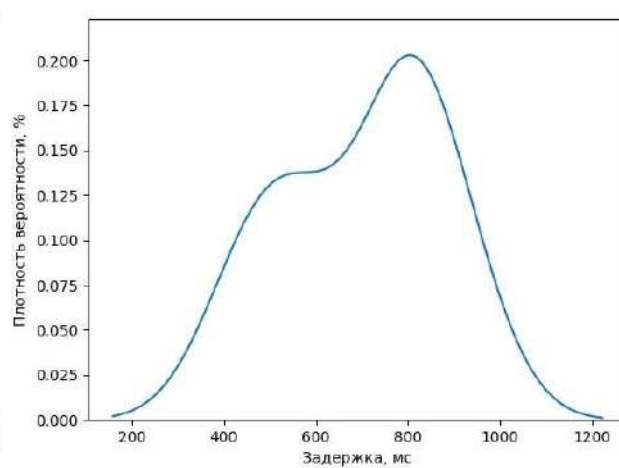
а) 100 байт



б) 500 байт



в) 2000 байт



г) 15000 байт

Рисунок 2.21 – Плотности вероятности величины задержки при использовании в качестве КИО ОГ «Ямал-601»

Полученные плотности вероятности позволили сделать вывод, что вне зависимости от размера полезных нагрузок задержка на уровне приложения

также подчиняется усеченному двухпараметрическому закону бета-распределения, где параметры усечения равны границам области допустимых значений величины такой задержки. Подтверждением этому является тот факт, что полученные на основании $\chi^2 = 3$ и $\lambda = 0,7$ вероятности принимают относительно большие значения и равны соответственно 0,7 и 0,711.

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

$$1 \leq \alpha \leq 4,5; 1 \leq \beta \leq 4. \quad (2.54)$$

Результаты экспериментов по передаче видеопотока через геостационарные системы спутниковой связи «Ямал-402» и «Ямал-601» представлены в таблицах 2.3 и 2.4, соответственно.

Таблица 2.3 – Задержки на уровне приложения при использовании «Ямал-402»

payload	$P_{\text{потерь}}, \%$	μ	σ^2	M_x
100	0,50	451,87	148,05	448,90
300	0,00	578,17	5,30	578,82
500	0,00	708,36	5,90	710,29
700	0,48	794,78	5,85	796,93
1 000	0,48	1011,80	5,56	1012,69
2 000	8,65	1575,16	6,30	1573,76
3 000 - 15000	100,00	—	—	—

Параметры формы бета-распределения для различных гибридных КИО, включающих сегмент Интернет (рис. 2.7 и 2.15), представлены в таблице 2.5.

Информация о распределении задержки при эксплуатации гибридных КИО ОГ Ямал-402, Ямал-601 и «Старлинк» с различными величинами полезной нагрузки может быть использована для определения оптимальной конфигурации нейросетевых кодеков. Дополнительно они служат основой для моделирования КИО^В и КИО^К (рис. 2.4), предназначенных для передачи видеопотока взаимодействия оператора и беспилотной системы и команд взаимодействия оператора через космический сегмент ГОНСС, с целью выявления параметров КИО, обеспечивающих максимальную эффективность

их функционирования.

Таблица 2.4 – Задержки на уровне приложения при использовании «Ямал-601»

payload	$P_{\text{потерь, \%}}$	μ	σ^2	M_x
100	0,08	360,81	1048,87	340,02
300	0,58	372,58	2074,33	341,65
500	1,01	382,46	2978,70	339,89
700	2,11	527,20	9337,96	601,03
1 000	1,01	639,64	7709,08	694,96
2 000	0,67	770,01	3125,68	778,29
3 000	1,75	641,20	33789,23	801,66
4 000	1,23	774,01	8175,04	756,57
5 000	2,88	797,37	2829,54	814,68
7 000	2,48	785,79	2094,09	778,49
10 000	2,14	722,19	21892,99	796,17
15 000	3,28	699,45	28090,19	803,90

Таблица 2.5 – Обобщенные результаты параметров формы бета-распределения для различных КИО

Сегмент ГОНСС	Тип	α	β
Наземный	3G/LTE	$2 \leq \alpha \leq 9$	$2 \leq \beta \leq 14$
Космический	ГСО	$1 \leq \alpha \leq 4,5$	$1 \leq \beta \leq 4$
	НОО (Европейский регион)	$0,3 \leq \alpha \leq 3,6$	$0,8 \leq \beta \leq 4$
	НОО (Тихоокеанский регион)	$0,3 \leq \alpha \leq 3,3$	$0,9 \leq \beta \leq 3,7$

Значения весовых коэффициентов при изменении полезной нагрузки от 3 до 15 килобайт (КБ) представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Изменение весовых коэффициентов смеси распределений

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

2.3 Структура системы информационного обмена

В контексте гибридных орбитально-наземных сетей связи для передачи FPV-видеопотока и команд взаимодействия оператора БПЛА на рисунке 2.21 представлена структурированная архитектура системы информационного обмена, обеспечивающая надёжность, синхронизацию и адаптивность функционирования услуги FPV. Она включает в себя как наземный сегмент, представленный в виде мобильных сотовых сетей связи, так и космический сегмент, включающий в себя спутниковые системы связи как на геостационарной, так и на низкой околоземной орбите.

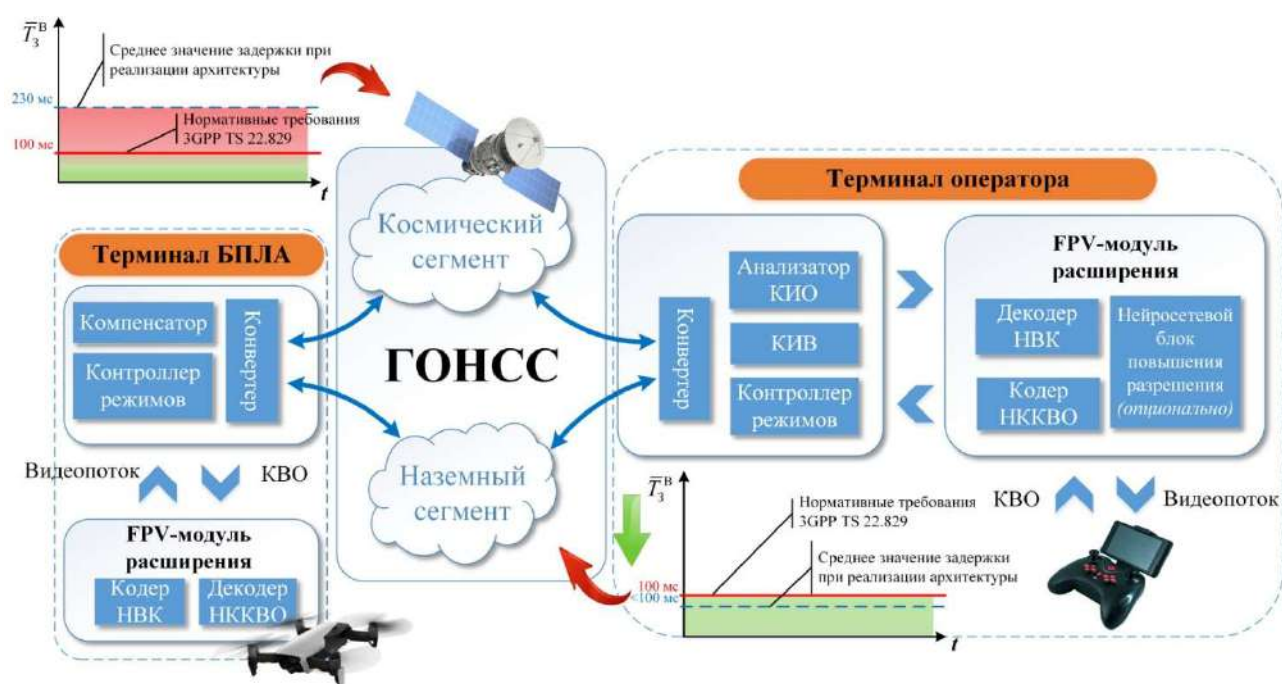


Рисунок 2.21 – Общая схема системы

Основные компоненты системы сведены к специализированным функциональным блокам на стороне БПЛА и ТО, каждый из которых отвечает за обработку видеопотока, управление каналами передачи и оптимизацию параметров нейросетевого кодирования.

Структурное разделение на стороне БПЛА

- 1. Терминал БПЛА.** Терминал БПЛА выполняет ключевую роль в поддержке протокола FPV-CTVP, реализуя маршрутизацию сжатого видеопотока от модуля расширения FPV и обратную отправку команд

взаимодействия оператора со стороны ТО. Функциональные модули терминала включают:

- Конвертер протоколов и сегментов ГОНСС;

Отвечает за формирование и декодирование сообщений FPV-CTVP, а также за адаптацию КИО при прохождении через гетерогенные сегменты ГОНСС.

- Контроллер режимов нейросетевых кодеков;

Обеспечивает динамическое переключение конфигураций нейросетевых видеокодеков и КВО в зависимости от текущей пропускной способности и требований к задержке.

- Компенсатор задержек и сжатия.

Реализует мониторинг задержек сериализации в КИО и адаптивное уменьшение полосы пропускания за счёт выборочного удаления кадров FPV-видеопотока при возникновении перегрузок канала.

2. FPV-модуль расширения на БПЛА. Модуль предназначен для преобразования данных информационного потока в оптически эффективный закодированный формат и обратного восстановления КВО. Его основные компоненты:

- Нейросетевой видеокодер (НВК)

Проводит сжатие исходных кадров FPV-видеопотока с камеры беспилотных аппаратов бинарную последовательность согласно заданной конфигурации кодирования.

- Нейросетевой декодер команд взаимодействия оператора (декодер НККВО)

Восстанавливает двоичные команды взаимодействия оператора, поступающие от терминала оператора, и передаёт их на бортовой полетный контроллер.

Структурное разделение на стороне терминала оператора

1. Терминал оператора. Предназначен для синхронного взаимодействия оператора и беспилотной системы по протоколу FPV-CTVP и адаптивного регулирования интенсивности видеопотока. В состав терминала входят:

- Конвертер протоколов;

Объединяет функции модема и протокольного конвертера: обеспечивает приём и передачу данных через КИО ГОНСС, а также формирование и обработку сообщений FPV-CTVP.

- Контроллер режимов нейросетевых кодеков;

Управляет конфигурациями НВК и НККВО на стороне ТО в зависимости от качества канала связи и требований к задержке.

- Контроллер интенсивности видеопотока (КИВ);

Обеспечивает работу компенсационных механизмов восстановления видеопотока при его деградации на ТО, а также минимизацию рассинхронизации взаимодействия оператора и беспилотной системы.

- Анализатор параметров КИО.

Выполняет мониторинг пропускной способности КИО, частоты кадров и задержек, регулируя параметры компенсации КИВ для поддержания требуемого качества связи.

2. FPV-модуль расширения на ТО. Модуль реализует функции декодирования видеокадров и агрегирования КВО с возможностью повышения качества восстановленного изображения. Компоненты модуля:

- Нейросетевой декодер видеопотока;

Восстанавливает кадры из сжатой бинарной последовательности с применением глубоких нейронных сетей.

- Нейросетевой кодер команд взаимодействия оператора;

Агрегирует команды взаимодействия с беспилотной системы от пульта в латентное пространство нейросетевого автокодировщика и формирует их сжатое бинарное представление для передачи на терминал БПЛА.

- Нейросетевой блок повышения разрешения (SR-модуль).

Применяет механизмы сверхразрешения для устранения артефактов кодирования/декодирования и повышения визуального качества восстановленных кадров.

2.3.1 Модуль контроля интенсивности видеопотока

Модуль контроля интенсивности видеопотока (КИВ) (рис. 2.22) является модулем подсистемы адаптивного контроля задержки и интенсивности видеопотока.



Рисунок 2.22 – Модуль контроля интенсивности видеопотока

КИВ содержит совокупность функциональных модулей, организованных по принципу последовательной обработки информации.

- *Модуль первичной обработки видеок кадров* осуществляет декодирование сжатых бинарных представлений видеок кадров с использованием декодера НВК на основе поступающих метаданных. Восстановленные видеок кадры и соответствующие им параметры интенсивности передаются в

последующий модуль с сохранением порядковой нумерации.

- *Модуль параметрического учёта кадров* реализует адаптивную регуляцию параметров видеопотока на основе поступивших видеок кадров. Система функционирует в трёх режимах: *базовый режим*, при котором видеопоток передаётся с номинальной интенсивностью; *адаптивный режим повышения интенсивности* при снижении пропускной способности канала; *адаптивный режим компенсации задержек* при превышении допустимых временных параметров. Обработанные видеок кадры накапливаются в *буфере кадров* для последующего отображения с заданной интенсивностью.

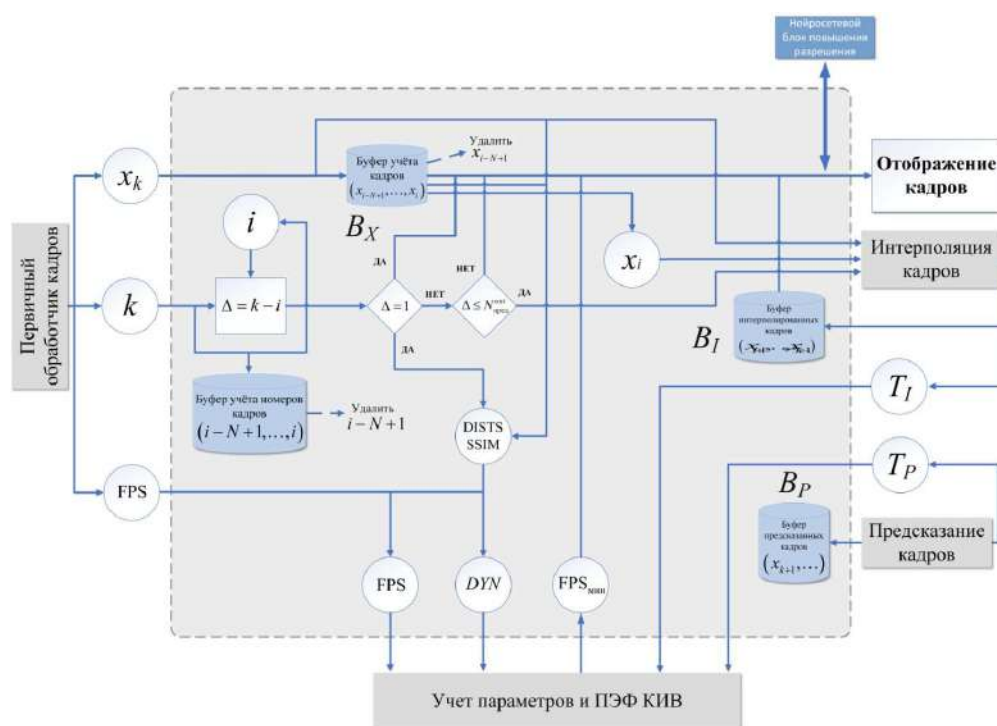


Рисунок 2.23 – Базовая функциональность блока параметрического учета кадров

Базовый режим функционирования реализует следующий алгоритм обработки (рис. 2.23):

- входные данные из блока первичного обработчика кадров включают восстановленный кадр x_k , его порядковый идентификатор k и текущий параметр частоты кадров FPS . Кадр поступает в буфер учета кадров B_X , при этом вытесняется устаревший кадр x_{i-N+1} ;

- вычисляется интервал кадровой задержки как $\Delta = k - i$, после чего выполняется индексная подстановка текущего номера в историю. Параллельно осуществляется управление буфером номеров B_N с удалением индекса $i-N+1$;

- логика маршрутизации кадров регулируется условием интерполяции: при $\Delta=1$ или $\Delta > N_{\text{инт}}^{\text{пред}}$ кадр направляется непосредственно на визуализацию. При условии $\Delta \leq N_{\text{инт}}^{\text{пред}}$, где $N_{\text{инт}}^{\text{пред}}$ обозначает параметр текущей модели интерполяции (максимальное число интерполируемых кадров с приемлемым качеством), осуществляется извлечение опорного кадра x_i из буфера, и пара кадров (x_i, x_k) с разностью Δ направляется в блок интерполяции кадров. На выход поступают как интерполированная последовательность B_I , так и исходный кадр x_k ;

- оценка качества выполняется посредством расчета метрики DISTs между текущим кадром x_k и кадром из истории x_{k-ddyn} . На основе полученной метрики и текущей частоты кадров вычисляется динамика видеопотока DYN , который передается в блок учета параметров КИВ;

- текущие параметры частоты кадров FPS и времени интерполяции T_I агрегируются в блоке учета параметров КИВ для вычисления минимального значения $FPS_{\text{мин}}$, необходимого для взаимодействия оператора и беспилотной системы процессом визуализации. Входящие временные метрики предсказания T_P и интерполяции T_I также регистрируются в блоке учета параметров КИВ, хотя блок предсказания остается неактивным в базовом режиме;

- на заключительном этапе все кадры подвергаются процедуре нормализации разрешения в соответствии с параметрами терминального устройства, с восстановлением разрешения до HD качества (1280×720).

- Подсистема предсказания видеокадров состоит из *буфера предсказания*, накапливающего видеокадры для анализа, и *блока предсказания*, который на основе набора *моделей предсказания* генерирует прогнозируемые видеокадры последующих временных отсчётов.

- Подсистема интерполяции видеокадров включает буфер

интерполяции, содержащий исходные видеокадры, и блок интерполяции видеокадров, реализующий алгоритмы моделей интерполяции для синтеза промежуточных видеокадров между соседними кадрами исходного видеопотока. При этом математически оптический поток описывается формулой [399]:

$$f_x u + f_y v + I_t = 0, \quad (2.55)$$

где $f_x u, f_y v$ – градиенты интенсивности пикселя по горизонтали и вертикали, I_t – изменение интенсивности пикселя кадра видеопотока во времени. Для нового пикселя (x', y') вычисляется взвешенное среднее по горизонтали и вертикали:

$$f(x', y') = (1 - dx)(1 - dy)f(x_1, y_1) + dx(1 - dy)f(x_2, y_2) + dy(1 - dx)f(x_1, y_2) + dx \cdot dy \cdot f(x_2, y_2), \quad (2.56)$$

где $dx = x' - x_1$, $dy = y' - y_1$, а x_1, y_1, x_2, y_2 – это координаты ближайших четырех пикселей.

- Блок учета параметров и ПЭФ КИВ (рис. 2.24) предназначен для накопления, хранения и актуализации комплекса ПЭФ. К числу аккумулируемых показателей относятся: выборочная дисперсия, арифметическое среднее значение, объём выборки, первый начальный момент (математическое ожидание), граничные значения доверительных интервалов при заданных уровнях статистической значимости. Актуализация ПЭФ выполняется при поступлении каждого нового значения параметра.

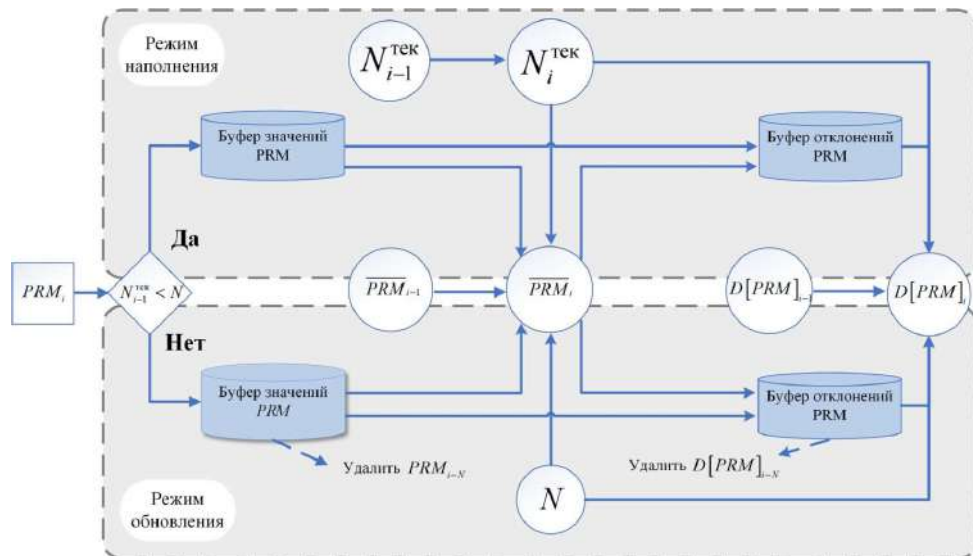


Рисунок 2.24 – Принцип работы блока учета параметров КИВ

При некотором уровне значимости α интервальная оценка некоторого параметра PRM [$PRM_{\min}$; $PRM_{\max}$] вычисляется согласно формуле [400]:

$$PRM = \left[\overline{PRM} - t_a \frac{\sqrt{D(PRМ)}}{\sqrt{N}}; \overline{PRM} + t_a \frac{\sqrt{D(PRМ)}}{\sqrt{N}} \right], \quad (2.57)$$

где $\overline{PRM}$ – среднее значение параметра, $D(PRМ)$ – дисперсия параметра, N – объём выборки значений параметров, t_a – коэффициент доверия при заданном уровне значимости α (по умолчанию 0,05). Коэффициент доверия оценивается через уравнение:

$$\Phi(t_a) = \frac{1-\alpha}{2}, \quad (2.58)$$

где Φ – функция Лапласа.

Режим накопления. На этапе инициализации системы осуществляется постепенное пополнение выборки до достижения установленного размера N . При каждом поступлении нового значения параметра PRM_i производятся инкрементальные пересчеты статистических характеристик. Среднее значение обновляется согласно соотношению [401]:

$$\overline{PRM}_i = \frac{\overline{PRM}_{i-1} \times N_{i-1}^{\text{тек}} + PRM_i}{N_i^{\text{тек}}}, \quad (2.59)$$

где $N_i^{\text{тек}}$ – текущее количество накопленных значений.

Одновременно актуализируется дисперсия:

$$D[PRM]_i = \frac{D[PRM]_{i-1} \times N_{i-1}^{\text{тек}} + (PRM_i - \overline{PRM}_i)^2}{N_i^{\text{тек}}}. \quad (2.60)$$

Режим обновления (скользящее окно). После заполнения буфера на N элементов система переходит в режим с фиксированным объемом выборки. В этом режиме при поступлении нового значения параметра удаляется наиболее старое значение из выборки. Среднее значение рассчитывается по формуле скользящего среднего:

$$\overline{PRM}_i = \overline{PRM}_{i-1} + \frac{PRM_i - PRM_{i-N}}{N}. \quad (2.61)$$

Аналогично обновляется дисперсия посредством вычитания вклада

удаляемого элемента и добавления вклада нового:

$$D[PRM]_i = D[PRM]_{i-1} + \frac{(PRM_i - \overline{PRM}_i)^2 - (PRM_{i-N} - \overline{PRM}_{i-N})}{N}. \quad (2.62)$$

Представленный блок учета параметров КИВ обеспечивает эффективный мониторинг параметров видеопотока посредством инкрементальных алгоритмов вычисления статистик, минимизирующих вычислительную нагрузку и позволяющих осуществлять адаптивный контроль в режиме реального времени.

2.3.2 Модуль анализатора каналов информационного обмена

Другим модулем системы адаптивного контроля задержки и интенсивности видеопотока является анализатор каналов информационного обмена (анализатор КИО) (рис. 2.25).



Рисунок 2.25 – Анализатор КИО

Анализатор КИО состоит из следующих функциональных блоков.

- *Блок учёта параметров и ПЭФ КИО* предназначен для накопления,

хранения и актуализации комплекса ПЭФ КИО. К числу аккумулируемых показателей относятся: выборочная дисперсия, арифметическое среднее значение, объём выборки, первый начальный момент (математическое ожидание), граничные значения доверительных интервалов при заданных уровнях статистической значимости α , точечные оценки параметров генеральной совокупности, интервальные оценки с установленным уровнем значимости α . Аналогично модулю учета параметров и ПЭФ КИВ, актуализация ПЭФ выполняется при поступлении каждого нового значения показателя.

- *Блок измерения задержки уровня приложения (задержка кадров видеопотока и команд взаимодействия оператора) КИО* предназначен для контроля временных характеристик задержки КИО T_3^B и T_3^Y . Через интерфейс «Конвертер» на регулярной основе (с интервалом в несколько секунд) передаются зондирующие пакеты протокола FPV-CTVP для измерения сквозной задержки прикладного уровня. Объём полезной нагрузки зондирующих пакетов соответствует математическому ожиданию среднего размера сжатых бинарных последовательностей видеокадров.

- *Блок контроля ПЭФ КИО* осуществляет непрерывный контроль характеристик КИО с целью выявления аномальных состояний путём применения набора аналитических моделей мониторинга.

- *Методы анализа результатов контроля ПЭФ КИО* предназначены для анализа временных рядов характеристик КИО и обнаружения аномалий – идентификации нарушений статистической устойчивости процессов. Рекомендуемым инструментом для реализации подобного анализа являются *контрольные карты Шухарта*.

2.3.2.1 Методы анализа результатов контроля ПЭФ КИО

В производственной практике широко применяется метод статистического контроля и регулирования параметров промышленной

продукции посредством контрольных карт Шухарта. Данный инструмент был впервые предложен американским инженером и статистиком Уолтером Эндрю Шухартом (*от англ. Walter Andrew Shewhart*) в 1931 году в монографии «Экономический контроль качества произведенного продукта» (*от англ. Economic control of quality of manufactured product*), которая явилась фундаментальным трудом в области производственного менеджмента. Основной областью применения контрольных карт Шухарта является осуществление контроля и взаимодействия оператора и беспилотной системы качественными показателями производственных процессов и выпускаемой продукции. Указанные карты представляют собой эмпирический инструмент, предназначенный для принятия управленческих решений, и не рекомендуются для использования в целях проверки статистических гипотез в строгом статистическом смысле [402].

Применение контрольных карт Шухарта в Российской Федерации регламентировано нормативным документом ГОСТ Р 50779.42-99 «Статистические методы. Контрольные карты Шухарта», представляющим собой авторизованный перевод международного стандарта ИСО 8258-91 «Контрольные карты Шухарта» (*англ. ISO 8258:1991 «Shewhart control charts»*).

В работе [403] проведено исследование контрольных карт Шухарта. Для анализа применимости мониторинга параметров КИО с помощью математического аппарата контрольных карт был проведен эксперимент, включающий в себя моделирование передачи кадров видеопотока взаимодействия оператора и беспилотной системы между двумя ПК с последующей оценкой изменения интенсивности видеопотока в качестве характеристики U [403]. Экспериментальная установка представлена на рисунке 2.26, а примеры кадров видеопотока на рисунке 2.27.

В качестве программного средства, эмулирующего потерю кадров видеопотока, использовалось ПО «NetDisturb», где задавались различные фильтры видеопотока, влияющие на интенсивность видеопотока на приемной стороне.



Рисунок 2.26 – Экспериментальная установка



Рисунок 2.27 – Примеры кадров видеопотока

Программа испытаний состоит из последовательности временных интервалов: 10 минут с 0% потерями кадров видеопотока, 5 минут с 50% потерь, 10 минут с 20% потерь и 10 минут с 0% потерь. В рамках эксперимента формируется набор значений интенсивности видеопотока для каждого поступившего кадра. На основе данного набора предполагается применение метода компенсации интенсивности видеопотока с варьируемыми параметрами:

- размер подгруппы $n \in \{1, 2, \dots, 25\}$;
- границы управляемости процесса UCL и LCL , определяемые либо по среднегрупповой величине размаха, либо по среднегрупповому стандартному отклонению.

Метрики оценки работоспособности метода включают:

- долю ложных определений выхода процесса из управляемого состояния $P_{лп}$;
- долю пропущенных определений выхода процесса из управляемого состояния $P_{ло}$.

Результаты эксперимента демонстрируют зависимость интенсивности видеопотока от времени (рис. 2.28) в зависимости от размера группы агрегации n . Увеличение доли потерь пакетов сопровождается ростом флуктуаций как индивидуальных FPS, так и среднегрупповых FPS. Напротив, увеличение n приводит к снижению флуктуаций значений FPS как на индивидуальном, так и на среднегрупповом уровнях.

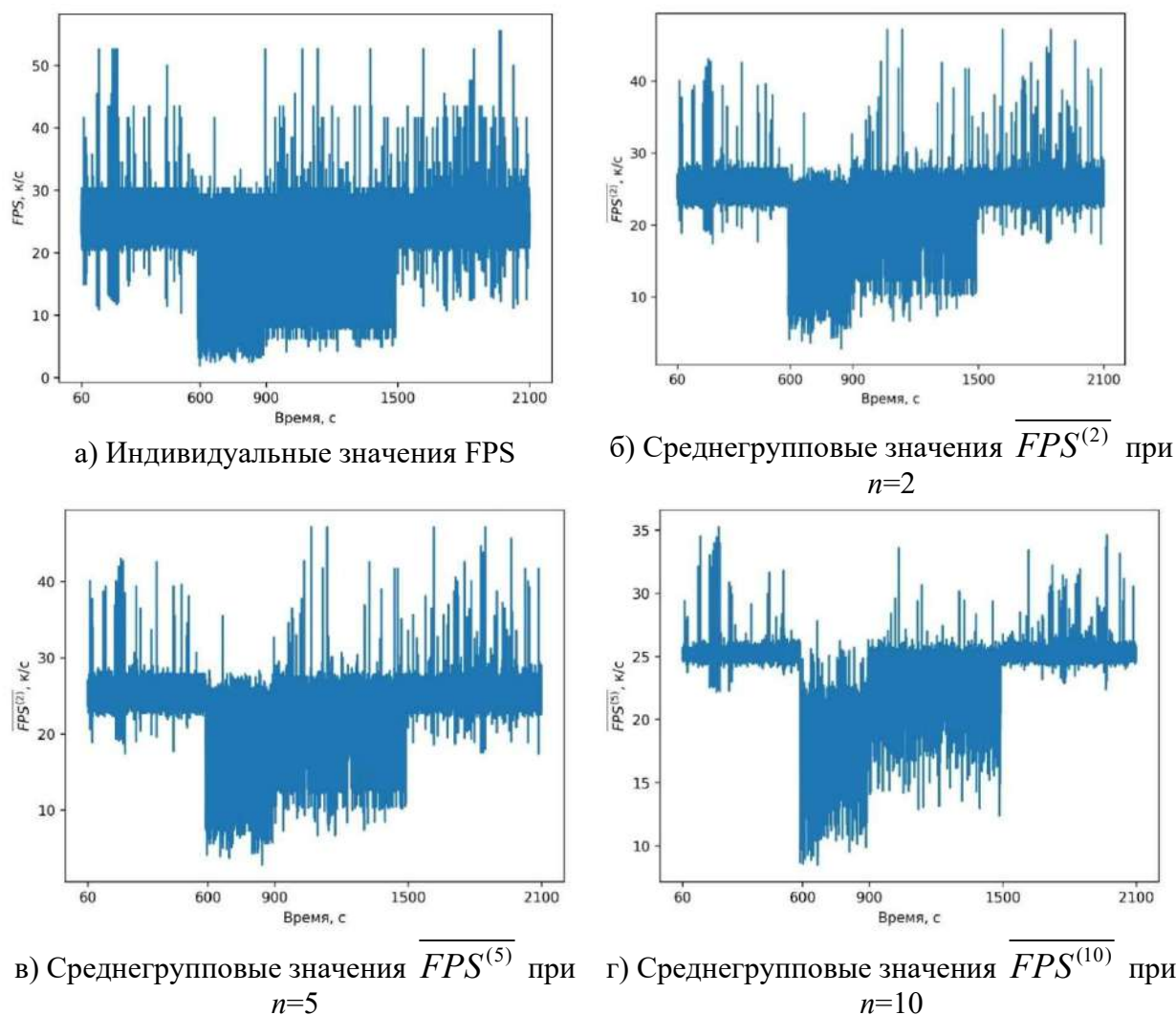


Рисунок 2.28 – Зависимость индивидуальных и среднегрупповых значений от времени

Так для $n = 1$ (индивидуальных значений):

- в период 60-600 сек (0% потерь) $FPS \in [10,23;52,69]$;
- в период 600-900 сек (50% потерь) $FPS \in [1,99;41,68]$;
- в период 900-1500 сек (25% потерь) $FPS \in [4,13;52,62]$;
- в период 1500-2100 сек (0% потерь) $FPS \in [10,78;55,71]$.

Для $n = 25$:

- в период 60-600 сек (0% потерь) $\overline{FPS}^{(25)} \in [24,83;26,96]$;
- в период 600-900 сек (50% потерь) $\overline{FPS}^{(25)} \in [12,75;20,66]$;
- в период 900-1500 сек (25% потерь) $\overline{FPS}^{(25)} \in [18,78;25,57]$;
- в период 1500-2100 сек (0% потерь) $\overline{FPS}^{(25)} \in [24,77;27,07]$.

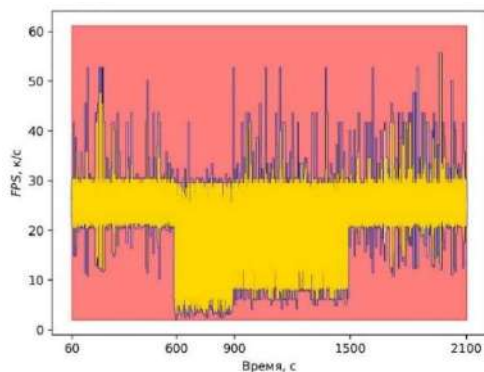
Экспериментальные результаты (табл. 2.7) демонстрируют, что применение метода к индивидуальным значениям ($n=1$) приводит к более быстрому изменению динамики процесса по сравнению с накоплением величин размаха R или стандартного отклонения σ , необходимых для вычисления среднего размаха $\bar{R}$ или среднего стандартного отклонения $\bar{\sigma}$ (рис. 2.29а). В отсутствие дополнительной инициализации данный подход не применим при $n=1$. При больших значениях n наблюдается снижение числа ложных выходов процесса из управляемого состояния (рис. 2.29, 2.30).

Таблица 2.7 – Результаты экспериментов

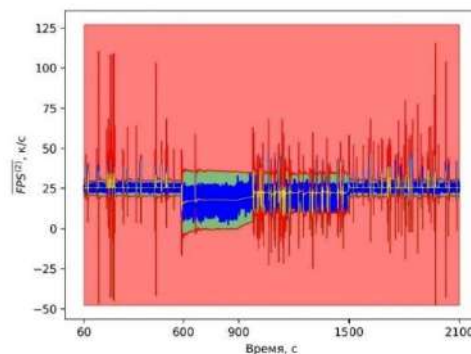
n	Вычисление границ из значений размаха		Вычисление границ из значений стандартного отклонения	
	$P_{\text{лп}}$	$P_{\text{ло}}$	$P_{\text{лп}}$	$P_{\text{ло}}$
1	0,9999	0,0000	—	—
2	0,9884	0,3333	0,9884	0,3333
3	0,9795	0,0000	0,9744	0,3333
4	0,9667	0,3333	0,9634	0,3333
5	0,9620	0,3333	0,9595	0,3333
6	0,9552	0,3333	0,9412	0,3333
7	0,9423	0,6666	0,9318	0,6666
8	0,9474	0,6666	0,9362	0,6666
9	0,9434	0,0000	0,9348	0,0000
10	0,9455	0,3333	0,9302	0,3333
11	0,9286	0,3333	0,9639	0,3333
12	0,9250	0,3333	0,8636	0,3333
13	0,9032	0,3333	0,8929	0,3333
14	0,9032	0,3333	0,9091	0,3333
15	0,8800	0,3333	0,8750	0,3333
16	0,8966	0,3333	0,8571	0,3333
17	0,9032	0,3333	0,8235	0,3333
18	0,9000	0,3333	0,8125	0,3333
19	0,8889	0,0000	0,8235	0,3333
20	0,8929	0,3333	0,7692	0,3333
21	0,8421	0,3333	0,7692	0,3333
22	0,8696	0,3333	0,8235	0,3333
23	0,8696	0,3333	0,7692	0,3333
24	0,8125	0,3333	0,7000	0,3333
25	0,8125	0,3333	0,6250	0,3333

Выход интенсивности видеопотока из управляемого состояния характеризуется резким изменением верхних и нижних границ контроля UCL и LCL . На рисунках 2.29 и 2.30: зеленая область отражает значения, при которых

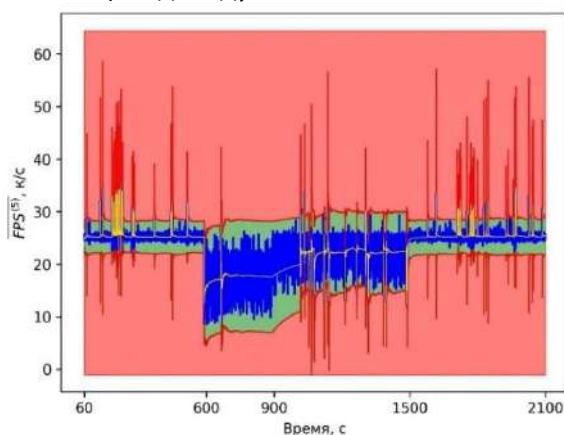
система пребывает в управляемом состоянии; красная область – значения, при попадании в которые процесс выходит из управляемого состояния; синяя линия – индивидуальные или среднегрупповые значения; красные линии – контрольные границы UCL и LCL ; желтая линия – среднее значение процесса интенсивности видеопотока.



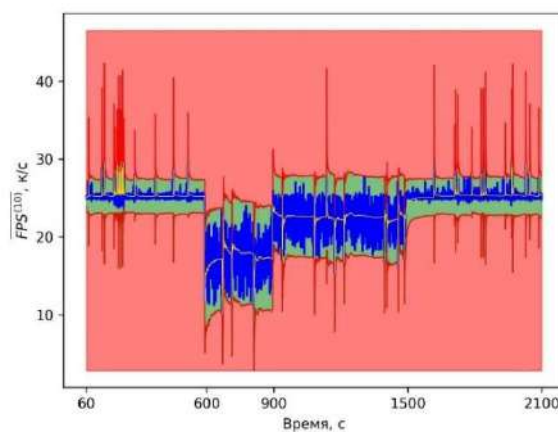
а) Индивидуальные значения FPS



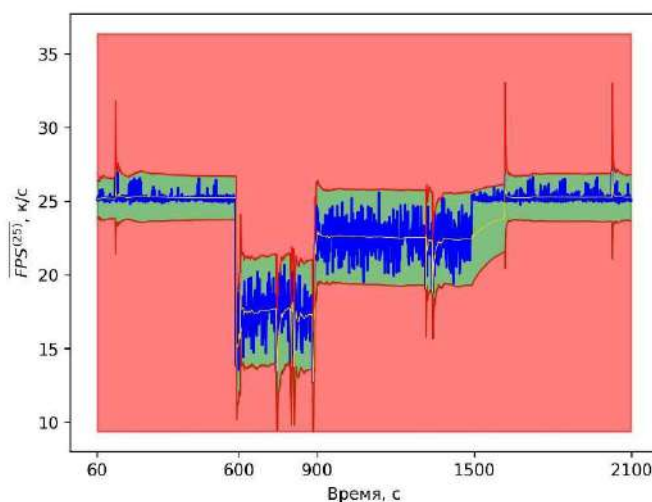
б) $\overline{FPS^{(2)}}$ при $n = 2$



в) $\overline{FPS^{(5)}}$ при $n = 5$



г) $\overline{FPS^{(10)}}$ при $n = 10$



г) $\overline{FPS^{(25)}}$ при $n = 25$

Рисунок 2.29 – Границы управляемости процесса интенсивности видеопотока: метод расчёта с использованием размаха

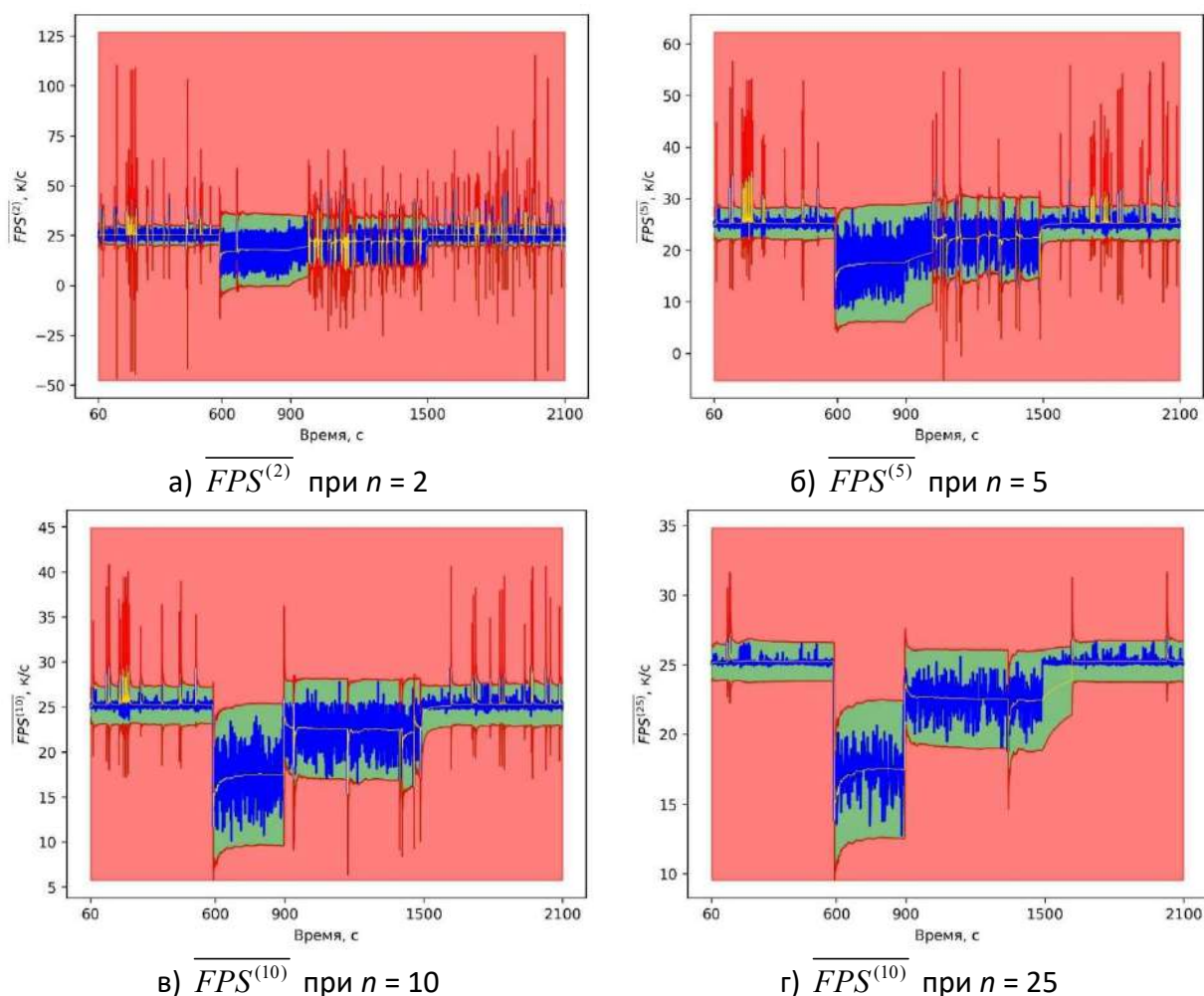


Рисунок 2.30 – Границы управляемости процесса интенсивности видеопотока: метод расчёта с использованием стандартного отклонения

Метод расчета границ контроля, основанный на использовании стандартного отклонения, демонстрирует большую стабильность и меньшую частоту ошибок по сравнению с методом, основанным на размахе. Однако данный подход допускает пропуски изменений процессов (рис. 2.31).

При достаточно малых n в большинстве случаев затруднено корректно определить переход процесса с 25% на 50% потерь. При достаточно больших n в абсолютном большинстве случаев затруднено корректно определить переход процесса с 25% потерь на 0% потерь. Единственными методами, обеспечивающими полное определение всех процессов, являются: вычисление границ из размаха для $n \in \{1; 9; 19\}$ и вычисление границ из стандартного отклонения при $n=9$. Из указанных подходов наименьшая доля ложных выходов достигается при вычислении границ из размаха с $n=19$.

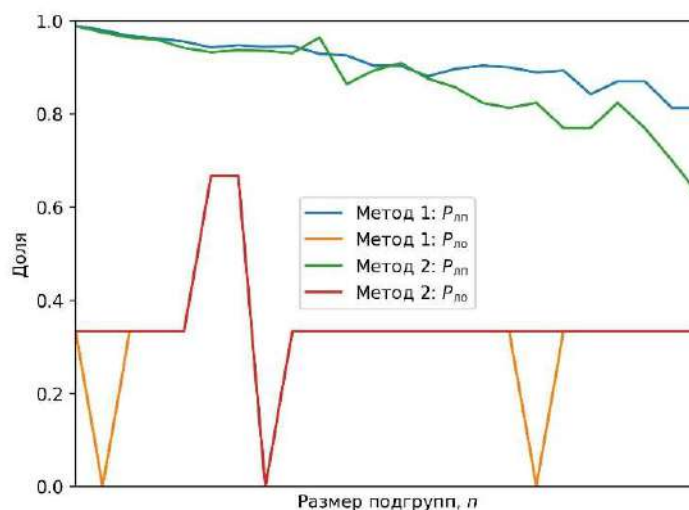
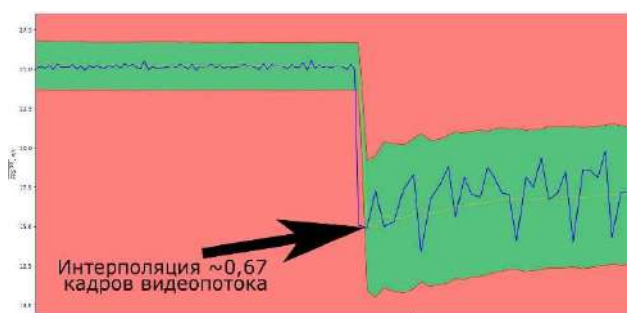
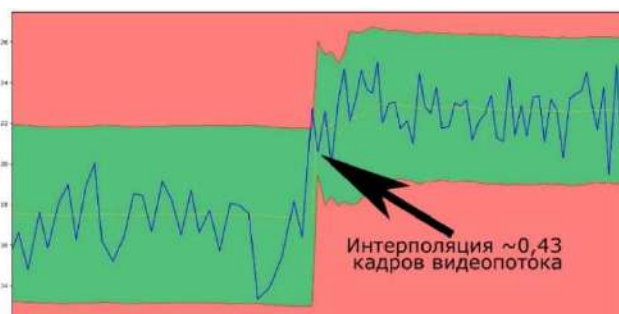


Рисунок 2.31 – Результаты экспериментов в графической форме

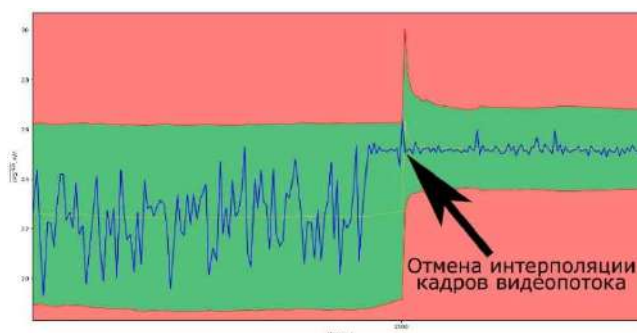
На рис. 2.31 представлены примеры моментов времени для включения механизмов интерполяции кадров видеопотока. Зафиксированы отдельные моментальные значения частоты кадров, превышающие 25 FPS. Вместе с тем, заявленная частота кадров видеокамеры составляет 25 FPS, что теоретически исключает возможность превышения этого значения.



а) Принятие решения об интерполяции кадров при смене с 0% до 50% потерь



б) Принятие решения об интерполяции кадров при смене с 50% до 25% потерь



в) Принятие решения об отмене интерполяции кадров при смене с 25% до 0% потерь

Рисунок 2.32 – Моменты времени для принятия решений об интерполяции кадров

Обнаруженные превышения можно рассматривать как систематическую погрешность измерительной системы, которая более подробно рассмотрена в разделе 2.3.2.2.

Результаты анализа показывают, что оптимальные параметры методики соответствуют размеру подгруппы $n=19$ с вычислением контрольных пределов на основе среднегруппового размаха. При использовании указанных параметров достигается минимальное значение вероятности ошибки первого рода (пропуск истинного выхода процесса из состояния статистической управляемости), приближающееся к нулю. Однако вероятность ошибки второго рода (ложное срабатывание) достигает значения 0,8889. Несмотря на высокую долю ложных тревог, влияние случайных флуктуаций интенсивности видеопотока на её среднее значение остаётся несущественным. При каждом зафиксированном выходе процесса из управляемого состояния инициируется переоценка его характеристик и соответствующий пересчёт необходимого количества интерполируемых кадров для поддержания установленного уровня интенсивности видеопотока. В том случае, когда процесс фактически остаётся в пределах управляемого состояния, а среднегрупповое значение интенсивности остаётся неизменным, интерполяция дополнительных кадров не выполняется.

При ложном определении выхода процесса из управляемого состояния происходит пересчёт контрольных пределов. До достижения объёмом выборки среднегрупповых размахов или стандартных отклонений достаточного размера новые контрольные пределы могут демонстрировать систематическое смещение относительно эталонных контрольных пределов исходного процесса. Вследствие этого при возникновении действительного выхода процесса из управляемого состояния в течение нескольких кадров видеопотока после ложного срабатывания вероятность его обнаружения снижается. Таким образом, высокое значение доли ложных срабатываний (0,8889) не оказывает критического негативного воздействия на эффективность предложенного метода.

Если обнаружена аномалия с показателем интенсивности видеопотока, то

активируется адаптивный режим увеличения интенсивности видеопотока. Данный режим деактивируется при восстановлении интенсивности видеопотока. Если обнаружена аномалия с ПЭФ КИО задержки видеопотока, то контроллер режимов последовательно уменьшает конфигурации. Если в течение пяти секунд с помощью заданной конфигурации не удалось уменьшить задержку видеопотока до прежнего значения, то используется меньшая конфигурация. Если конфигурация 1 не позволила вернуть задержку видеопотока до прежнего значения, активируется адаптивный режим снижения задержки видеопотока. Если задержка видеопотока уменьшилась до прежнего значения, то в блоке контроллер режимов повышаются конфигурации, а адаптивный режим отключается.

Одновременно может быть активирован только один адаптивный режим: либо адаптивный режим увеличения интенсивности видеопотока, либо адаптивный режим сокращения задержки видеопотока.

- *Адаптивный контроллер интенсивности видеопотока.* Данный модуль предназначен для функционирования адаптивного режима увеличения интенсивности видеопотока.
- *Адаптивный контроллер задержек КИО.* Данный модуль предназначен для функционирования адаптивного режима снижения задержки видеопотока.

2.3.2.2 Адаптивный режим увеличения интенсивности видеопотока

Один из ключевых параметров сетевой услуги трансляции видео в режиме реального времени представляет собой частота следования видеокадров, выражаемая в количестве кадров в единицу времени. Для обеспечения восприятия последовательности видеокадров как связного движущегося изображения требуется, чтобы временной интервал между смежными кадрами не превышал приблизительно 100 миллисекунд [404]. Следовательно, при частоте кадров менее 10 FPS воспринимаемое содержание трансформируется из связного видеопотока в дискретный набор статических

изображений.

Согласно результатам исследований [405], частота кадров оказывает существенное влияние на субъективное качество восприятия видеоинформации. В диапазоне низких частот наблюдается заметное улучшение качества восприятия при увеличении частоты кадров. Однако увеличение частоты кадров сверх 30 FPS характеризуется минимальным приростом воспринимаемого качества.

Недостаточная частота кадров представляет особую критичность для приложений FPV. Такое снижение может создать невозможность своевременной идентификации критических ситуаций, способных привести к срыву полетного задания.

Существуют методологические подходы к увеличению частоты кадров, включая алгоритмы прогнозирования и интерполяции промежуточных кадров. Вместе с тем применение указанных методов требует предварительного выявления фактического снижения частоты видеопотока. Таким образом, возникает необходимость в разработке и реализации процедур контроля и измерения частоты кадров.

Для количественной оценки частоты видеокадров применяются два принципиально различных подхода, основанные на временных параметрах поступления видеокадров t_i : интегральный (временной) метод и дифференциальный (моментарный) метод.

Интегральный метод непосредственно соответствует определению единицы измерения частоты видеокадров – количество кадров в единицу времени. При условии отображения N видеокадров в течение временного периода T секунд частота видеокадров определяется согласно выражению:

$$\text{FPS}_b = N/T. \quad (2.63)$$

Данный подход обеспечивает измерение среднего количества кадров в единицу времени за определённый интервал. При совпадении интервала наблюдения T с полной длительностью видеопотока D результаты измерений достигают максимальной точности. С увеличением продолжительности

периода наблюдения T оценка сходится к истинному значению частоты видеокадров источника.

Дифференциальный метод базируется на измерении временных интервалов между последовательными кадрами. При этом частота кадров в каждый момент времени определяется как величина, обратная временной задержке между текущим видеокадром i и предшествующим кадром $i-1$:

$$\text{FPS}_m = \frac{1000}{t_i - t_{i-1}}. \quad (2.64)$$

Этот метод позволяет вычислить среднюю частоту видеокадров при условии равномерного распределения временных интервалов между произвольными кадрами k и l : $\forall k, l \geq 1: (t_k - t_{k-1}) = (t_l - t_{l-1})$.

На практике реальные временные интервалы между соседними видеокадрами демонстрируют значительные флуктуации. Видеопоток, поступающий с источника с номинальной частотой $\text{FPS}_{\text{кам}}$, подвергается многоэтапной обработке: кодированию, передаче по сетевому каналу и декодированию. Поскольку процессы кодирования и декодирования являются стохастическими процессами, они привносят случайные вариации временных задержек. Дополнительный источник неопределённости возникает вследствие потенциального отбрасывания сетевых пакетов в буферных очередях сетевых устройств, а также различной величины сетевых задержек для отдельных видеокадров.

Следовательно, измеренная частота видеокадров FPS представляет собой случайную величину, теоретически не превышающую номинальное значение $\text{FPS}_{\text{кам}}$ в одноканальных системах. Однако практические измерения могут выявить значения, превосходящие $\text{FPS}_{\text{кам}}$, что обусловлено дополнительными задержками, связанными с регистрацией измеренных значений на запоминающих устройствах или их визуализацией. При типичном сценарии задержка между соседними кадрами составляет порядка 20 миллисекунд, однако операции записи данных на диск могут привносить дополнительные

задержки в диапазоне единиц и десятков миллисекунд.

Вследствие указанных факторов моментарные значения частоты видеокадров демонстрируют значительную дисперсию. Для повышения надёжности и точности дифференциального метода применяется процедура агрегирования n последовательных значений FPS_M с последующим вычислением средней арифметической оценки:

$$\overline{FPS_M^{(n)}} = \frac{10^3 \times \sum_{i=1}^n \frac{1}{(t_i - t_{i-1})}}{n}. \quad (2.65)$$

Пусть $n \rightarrow N$. Тогда

$$\lim_{n \rightarrow N} \overline{FPS_M^{(n)}} = \frac{10^3 \times \sum_{i=1}^N \frac{1}{(t_i - t_{i-1})}}{N}. \quad (2.66)$$

Пусть различия между $(t_i - t_{i-1})$ являются флуктуациями, а Δf – среднее значение задержек. Тогда

$$\lim_{n \rightarrow N} \overline{FPS_M^{(n)}} \approx \frac{10^3 \times \sum_{i=1}^N \frac{1}{\Delta f}}{N} = \frac{10^3 \times N}{N \times \Delta f}. \quad (2.67)$$

где $N \times \Delta f = T/10^3$. Подставляя в (2.67) получим

$$\lim_{n \rightarrow N} \overline{FPS_M^{(n)}} \approx \frac{10^3 \times N}{T/10^3} = \frac{N}{T}. \quad (2.68)$$

Соответственно, если флуктуации достаточно малы и компенсирует друг друга, то при $n \rightarrow N$:

$$\lim_{x \rightarrow N} \overline{FPS_M^{(n)}} \approx FPS_B. \quad (2.69)$$

Величина n стремится к N в пределе, когда $N \times \Delta f \rightarrow T$. Следовательно, в случае, когда средняя интенсивность видеопотока, измеренная за временной интервал $T=1$ секунда, составляет 25 FPS, согласно уравнению (2.64), значения моментальной интенсивности асимптотически приближаются к величине $n \rightarrow 25$. Аналогично, если $N \times \Delta t$ стремится к общей длительности D , тогда

$\overline{FPS_M^{(n)}} \rightarrow \overline{FPS_B}$. На практике выбор размера окна усреднения для совокупности значений моментальной интенсивности видеопотока должен осуществляться с учётом амплитуды флуктуаций, присущих измерениям интервалов времени между последовательными кадрами, а также вытекающих из этого вариаций моментальных значений интенсивности.

Верхняя граница относительной погрешности временного метода определения интенсивности видеопотока оценивается величиной 1 (что соответствует 100%), в то время как абсолютная погрешность равна самому измеренному значению FPS_B . Рассмотрим предельный случай $T < \Delta f$, соответствующий вырожденному варианту мгновенного метода с параметром $n < 1$. В этом случае при условии отсутствия существенных флуктуаций измеренное значение FPS_M обращается в нуль, несмотря на то, что действительная интенсивность видеопотока остаётся положительной величиной. Более того, условие $T < \Delta f$ является достаточным, однако не необходимым признаком такого поведения. Предположим, что основной массив кадров видеопотока поступает в течение временного интервала T^* , где $T^* \ll D$, расположенного вблизи конца наблюдаемого периода D , причём дополнительно выполняется условие $T < D - T^*$. Тогда относительная погрешность временного метода асимптотически стремится к 100%, что демонстрирует существенные ограничения методики при неравномерном распределении кадров по времени.

Пусть Δt является погрешностью измерения в каждый момент времени. Абсолютную погрешность моментарного метода интенсивности видеопотока можно оценить как [406]:

$$\Delta \overline{FPS_M^{(n)}} = \frac{\Delta t}{n} \sum_{j=0}^n \left| d \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{(t_i - t_{i-1})} \right) / dt_i \right|. \quad (2.70)$$

При этом

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{(t_i - t_{i-1})} = \frac{1}{t_1 - t_0} + \frac{1}{t_2 - t_1} + \dots + \frac{1}{t_n - t_{n-1}}. \quad (2.71)$$

Из этого следует, что дифференциалы находятся как:

$$\frac{d\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{(t_i - t_{i-1})}\right)}{dt_0} = \frac{1}{(t_1 - t_0)^2}, \quad (2.72)$$

$$\forall j \in [1; n-1]: \frac{d\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{(t_i - t_{i-1})}\right)}{dt_j} = -\frac{1}{(t_j - t_{j-1})^2} + \frac{1}{(t_{j+1} - t_j)^2}, \quad (2.73)$$

$$\frac{d\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{(t_i - t_{i-1})}\right)}{dt_n} = -\frac{1}{(t_n - t_{n-1})^2}. \quad (2.74)$$

Соответственно, абсолютная погрешность

$$\Delta \overline{\text{FPS}}_{\text{м}}^{(n)} = \frac{\Delta t}{n} \left(\frac{1}{(t_1 - t_0)^2} + \sum_{j=1}^{n-1} \left(\frac{1}{(t_j - t_{j-1})^2} + \frac{1}{(t_{j+1} - t_j)^2} \right) + \frac{1}{(t_n - t_{n-1})^2} \right), \quad (2.75)$$

а относительная

$$\partial \overline{\text{FPS}}_{\text{м}}^{(n)} = \frac{\Delta t}{n \times \overline{\text{FPS}}_{\text{м}}^{(n)}} \left(\frac{1}{(t_1 - t_0)^2} + \sum_{j=1}^{n-1} \left(\frac{1}{(t_j - t_{j-1})^2} + \frac{1}{(t_{j+1} - t_j)^2} \right) + \frac{1}{(t_n - t_{n-1})^2} \right) \quad (2.76)$$

Пусть справедлива аппроксимация $(t_j - t_{j-1}) \approx \Delta f$, тогда (2.75) и (2.76)

можно упростить:

$$\Delta \overline{\text{FPS}}_{\text{м}}^{(n)} = \frac{\Delta t}{n} \left(\frac{2 + (n-1) \times 2}{\Delta f^2} \right) = \frac{2\Delta t}{\Delta f^2}, \quad (2.77)$$

$$\partial \overline{\text{FPS}}_{\text{м}}^{(n)} = \frac{2\Delta t}{\Delta f^2 \times \overline{\text{FPS}}_{\text{м}}^{(n)}}. \quad (2.78)$$

Таким образом, погрешность моментарных измерений интенсивности видеопотока детерминирована двумя независимыми источниками: систематическими ошибками самого процесса регистрации видеопотока и статистической вариабельностью временных интервалов между последовательными кадрами. В случае если случайные флуктуации

пренебрежимо малы, мгновенные измерения демонстрируют инвариантность относительно параметра n . Однако в реальных условиях, когда флуктуации достигают значимых амплитуд, погрешность моментарных измерений обратно пропорционально величине n .

Соответственно, с целью ослабления влияния случайных колебаний на результаты измерений, целесообразно осуществлять увеличение объёма выборки мгновенных значений интенсивности видеопотока путём расширения размера групп n . Данный подход позволяет достичь улучшения точности оценок интенсивности за счёт усреднения высокочастотной компоненты шумов, присущих исходным данным.

Адаптивный режим увеличения интенсивности видеопотока предназначен для поддержания стабильных значений интенсивности видеопотока при изменениях условий КИО.

При установленной частоте кадров FPS период поступления последовательных кадров на ТО определяется соотношением:

$$T = \frac{10^3}{\text{FPS}} \text{ мс.} \quad (2.79)$$

Предположим, что в ходе осуществления взаимодействия оператора и БПЛА в реальном времени возникает аварийное событие C_1 с критическим временным интервалом TC_1 , превышение которого приводит к невозможности достижения поставленной цели функционирования системы. Пусть указанное событие произойдёт через промежуток времени Δtc_1 после передачи видеокadra x_i в момент времени t_i на приёмную сторону. В этом случае возникают две составляющие временной задержки: задержка видеопотока T_3^B и задержка передачи команд взаимодействия оператора T_3^Y .

При выполнении условия $TC_1 - \Delta tc_1 < T$ своевременная реакция на событие становится невозможной, поскольку видеокادر x_i не содержит информации о произошедшем событии. Для надлежащей реакции оператора необходимо поступление последующего видеокadra x_{i+1} ; однако при недостаточной интенсивности видеопотока гарантированное поступление такого кадра в

требуемый временной интервал не обеспечивается.

Кроме того, условие $TC_1 - \Delta tc_1 \geq T$ является необходимым, но не достаточным для адекватной реакции на событие C_1 . Последующий видеокادر x_{i+1} , содержащий достаточную информацию об аварийном событии для его корректного распознавания оператором, отправляется с борта БПЛА в момент времени $t_{i+1} = t_i + T$ и поступает на ТО в момент времени

$$\hat{t}_{i+1} = t_i + T + T_3^B. \quad (2.80)$$

Команды взаимодействия оператора с БПЛА, сформированные оператором в ответ на визуальное восприятие ситуации, описываемой кадром x_{i+1} и событием C_1 , поступают на борт БПЛА в момент времени

$$\hat{t}_{i+1} = t_i + T + T_3^B + T_{\text{реакт}} + T_3^Y, \quad (2.81)$$

где $T_{\text{реакт}}$ – время реакции ВП.

Необходимым условием достижения поставленной цели функционирования БПЛА является выполнение неравенства:

$$t_i + T + T_3^B + T_{\text{реакт}} + T_3^Y < t_i + \Delta tc_1 + TC_1 \quad (2.82)$$

или, после упрощения,

$$T + T_3^B + T_{\text{реакт}} + T_3^Y < \Delta tc_1 + TC_1. \quad (2.83)$$

Из указанного соотношения следует, что допустимый интервал времени реакции оператора составляет

$$T_{\text{реакт}} \in [0; \Delta tc_1 + TC_1 - T - T_3^B - T_3^Y] \text{ мс.} \quad (2.84)$$

При невыполнении условия $\Delta tc_1 + TC_1 \leq T + T_3^B + T_3^Y$ указанный интервал вырождается в пустое множество, что делает адекватную реакцию на событие физически невозможной. Таким образом, повышение интенсивности видеопотока расширяет временные рамки для принятия решения оператором, однако это достигается исключительно за счёт сокращения интервала T , определяемого выражением (2.79). Дальнейшее увеличение допустимого времени реакции оператора может быть обеспечено только посредством минимизации временной рассинхронизации системы взаимодействия оператора

и беспилотной системы (2.31).

С учетом (2.27) выражение (2.88) можно представить в виде

$$T_{\text{реакт}} \in [0; \Delta t c_1 + TC_1 - T - T_p] \text{ мс.} \quad (2.85)$$

Пусть интенсивность видеопотока до интерполяции обозначается FPS_{i-1} , а после – как FPS_i . Интерполяция k кадров приводит к тому, что интенсивность видеопотока увеличивается в $(k+1)$ раз. Так при $k=1$ интенсивность увеличивается в 2 раза, при $k=2$ – в 3 раза и так далее. Выбор количества интерполируемых кадров $N_{\text{инт}}$ проводится таким образом, чтобы достигалось математическое ожидание интенсивности видеопотока при предыдущем статистическом процессе. Оно определяется как:

$$(N_{\text{инт}} + 1) \times FPS_i = FPS_{i-1}, \quad (2.86)$$

$$N_{\text{инт}} = \frac{FPS_{i-1}}{FPS_i} - 1. \quad (2.87)$$

Значение k зависит от того, какое максимальное количество интерполируемых кадров, определённое для модели интерполяции:

$$N_{\text{инт}} = \min(N_{\text{инт}}, N_{\text{инт}}^{\text{пред}}), \quad (2.88)$$

где $N_{\text{инт}}^{\text{пред}}$ – количество интерполируемых кадров при FPS_{i-1} .

Включение адаптивного режима увеличения интенсивности видеотока предусматривает расширение функциональных возможностей модуля параметрического учёта кадров посредством добавления адаптивного механизма увеличения интенсивности видеопотока (рис. 2.33). В рамках данного режима данный модуль дополнительно принимает параметр $N_{\text{инт}}$, определяющий количество интерполируемых кадров, и предусматривает функционирование вторичного буфера интерполяции B_{l2} , в то время как первичный буфер интерполяции обозначается как B_{l1} .

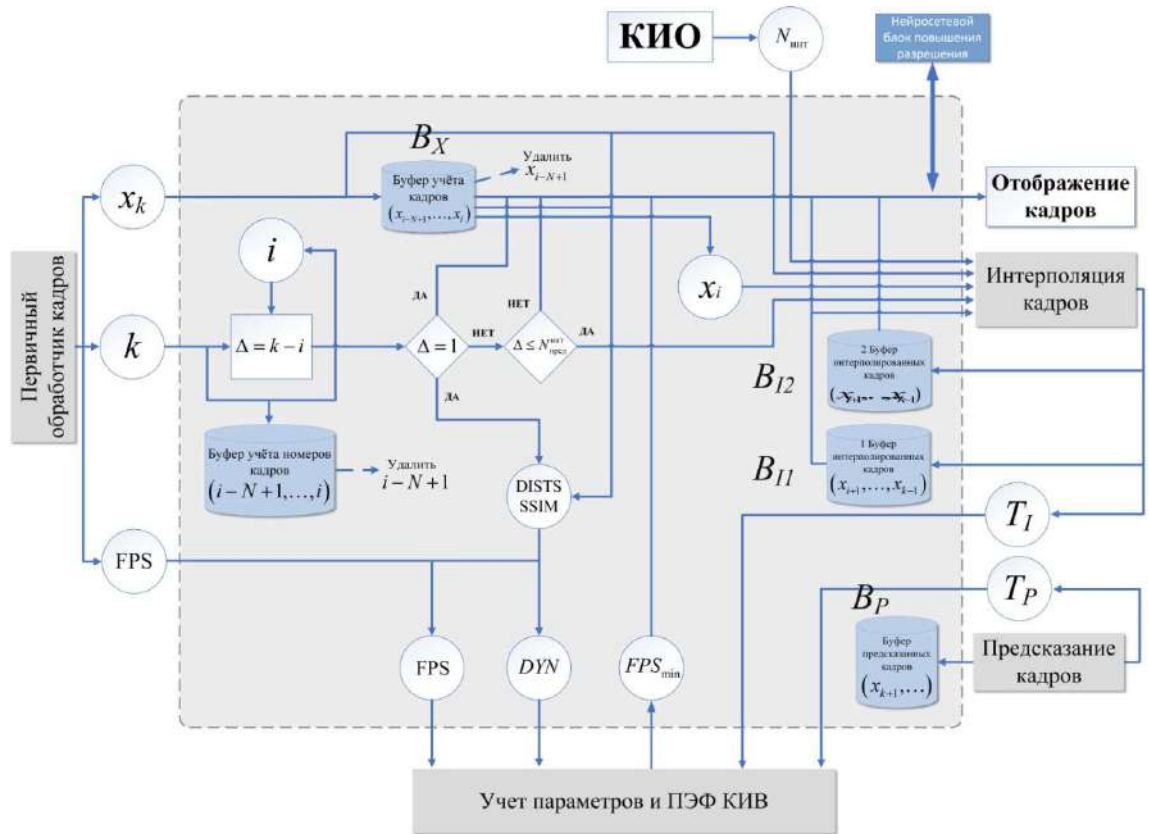


Рисунок 2.33 – Функциональность блока параметрического учета кадров КИБ (режим увеличения интенсивности)

Адаптивную функциональность (рис. 2.33) в части увеличения интенсивности видеопотока можно формализовать посредством следующего алгоритма:

Условие 1: $\Delta = 1$ или $\Delta > N_{\text{инт}}^{\text{пред}}$.

При выполнении указанного условия в адаптивном режиме исходные кадры x_i и x_k поступают в модуль интерполяции один раз. Между ними генерируется $N_{\text{инт}}$ интерполированных кадров (где $N_{\text{инт}} \in \mathbb{N}$), которые направляются во вторичный буфер интерполяции B_{I2} , при этом первичный буфер интерполяции B_{I1} остаётся незаполненным.

Условие 2: $\Delta \neq 1$ и $\Delta \leq N_{\text{инт}}^{\text{пред}}$.

При выполнении данного условия в адаптивном режиме исходные кадры x_i , x_k и интерполированные кадры из первичного буфера B_{I1} повторно обрабатываются модулем интерполяции. Для каждой пары смежных кадров дополнительно интерполируется $N_{\text{инт}}$ кадров ($N_{\text{инт}} \in \mathbb{N}$) (рис. 2.34), полученные

кадры поступают в B_{I2} .

Обработка не целых значений параметра интерполяции.

При условии $N_{\text{инт}} \notin \mathbb{N}$ количество интерполируемых кадров варьируется в диапазоне от $[N_{\text{инт}}]$ до $[N_{\text{инт}}]$. В модуле интерполяции реализуется счётчик $\text{INT\_COUNTER}=0$. Перед каждой новой интерполяцией счётчик инкрементируется на $N_{\text{инт}}$. Актуальное количество интерполируемых кадров $N_{\text{инт}(i)}$ определяется выражением $N_{\text{инт}(i)} = [\text{INT\_COUNTER}]$. По завершении интерполяции счётчик декрементируется на величину $N_{\text{инт}(i)}$.

Постобработка и вывод.

Исходный кадр x_k , а также кадры, полученные из буферов B_{I1} и B_{I2} , упорядочиваются в соответствии с их индексами. Разрешение упорядоченной последовательности восстанавливается нейросетевым блоком повышения разрешения, после чего последовательность направляется в блок отображения кадров (рис. 2.34).

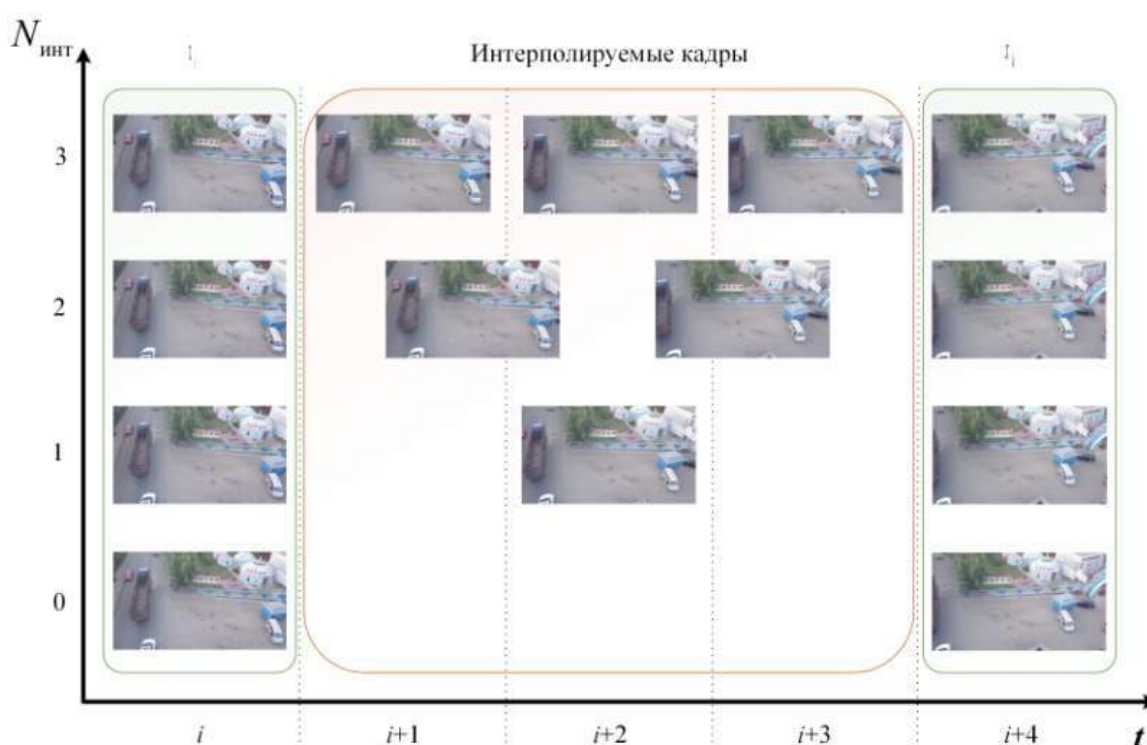


Рисунок 2.34 – Интерполяция кадров видеопотока

Дополнительная временная задержка, вносимая адаптивным режимом повышения интенсивности, аппроксимируется соотношением:

$$\Delta T_{\text{инт}} \approx N_{\text{инт}} \times T_{\text{инт}}, \quad (2.89)$$

где $T_{\text{инт}}$ – это время интерполяции одного кадра.

2.3.2.3 Адаптивный режим сокращения задержки видеопотока

При активации адаптивного режима минимизации задержки видеопотока в модуле КИВ параметрического учёта кадров реализуется встроенная адаптивная функция экстраполяции (предсказания) последующих кадров видеопотока (рис. 2.35).

Адаптивный режим сокращения задержки видеопотока предназначен для поддержания стабильных значений задержки видеопотока при изменениях условий КИО. Его функциональность может быть формализована следующим алгоритмом.

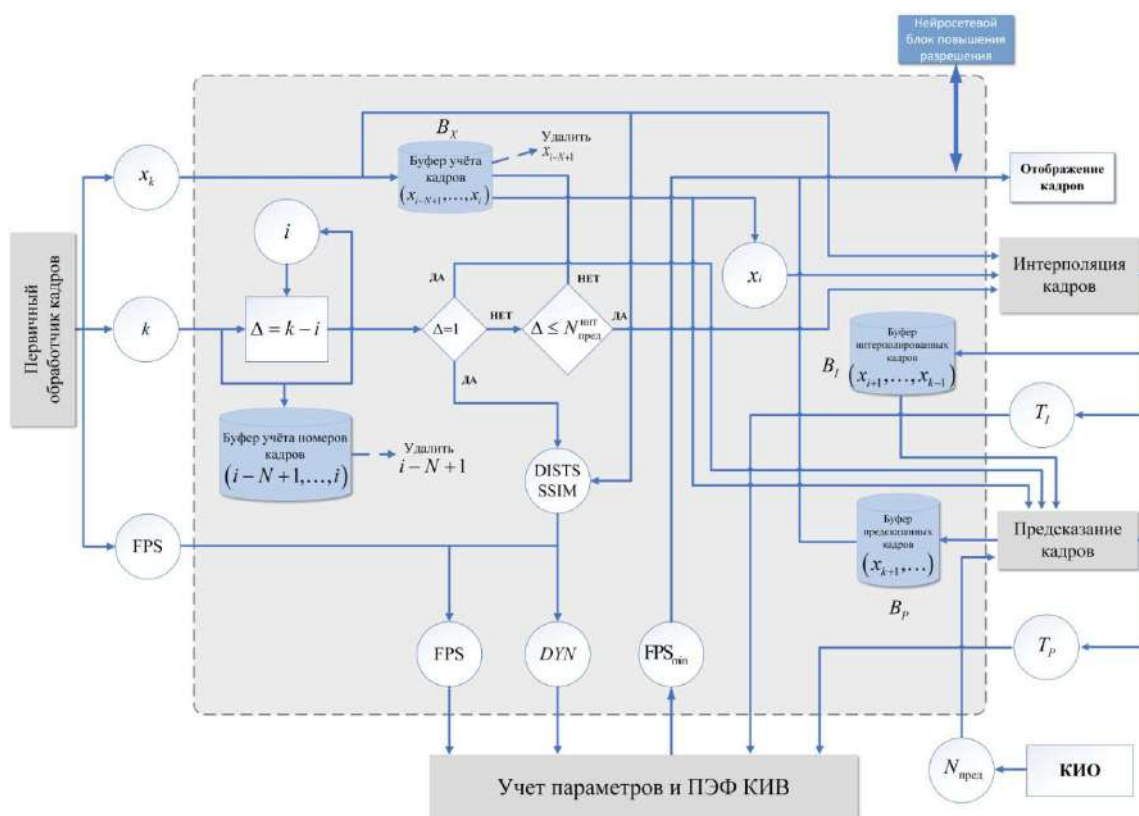


Рисунок 2.35 – Функциональность блока параметрического учета кадров КИВ (режим уменьшения задержки)

В модуль параметрического учета кадров поступает параметр упреждения $N_{\text{пред}}$, определяющий количество кадров для прогностического анализа. При

активации одного из критериев адаптации ($\Delta=1$ или $\Delta > N_{\text{инт}}^{\text{пред}}$) система извлекает из буфера видеопотока B_X опорный кадр $x_{k-N_{\text{пред}}}$ и формирует пару $(x_k, x_{k-N_{\text{пред}}})$, передаваемую в блок предсказания для получения прогнозного кадра $\hat{x}_{k+N_{\text{пред}}}$, который записывается в буфер предсказания B_P .

В альтернативном режиме ($\Delta \neq 1$ и $\Delta \leq N_{\text{инт}}^{\text{пред}}$) система реализует множественную экстраполяцию путём формирования массива пар кадров $((x_k, x_{k-N_{\text{пред}}}), (x_{i+1}, x_{i+1-N_{\text{пред}}}), (x_{i+2}, x_{i+2-N_{\text{пред}}}), \dots, (x_{i+\Delta}, x_{i+\Delta-N_{\text{пред}}}))$ из буферов B_X и интерполяции B_I . Из каждой пары генерируется соответствующий прогнозный кадр, поступающий в буфер B_P .

Завершающий этап предусматривает масштабирование разрешения экстраполированных кадров с 512×512 до стандартного разрешения видеопотока терминала (рис. 2.36), последующую визуализацию и синхронизацию с использованием соотношения

$$\hat{t}_i = t_i + T_3^B + T_P, \quad (2.90)$$

Уменьшение задержки адаптивным режимом уменьшения задержки видеопотока оценивается как:

$$\Delta T_{\text{пред}} = \left\lceil \frac{\Delta T_3^B}{\text{FPS}_{\text{мин}}} \right\rceil \times \text{FPS}_{\text{мин}} - T_{\text{пред}}, \quad (2.91)$$

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

Эффективность режима сокращения задержки количественно оценивается сокращением временем рассинхронизации видеопотока, приблизительно составляющим:

$$\Delta T_P \approx N_{\text{пред}} \times \text{FPS}_{\text{мин}} - T_P. \quad (2.92)$$

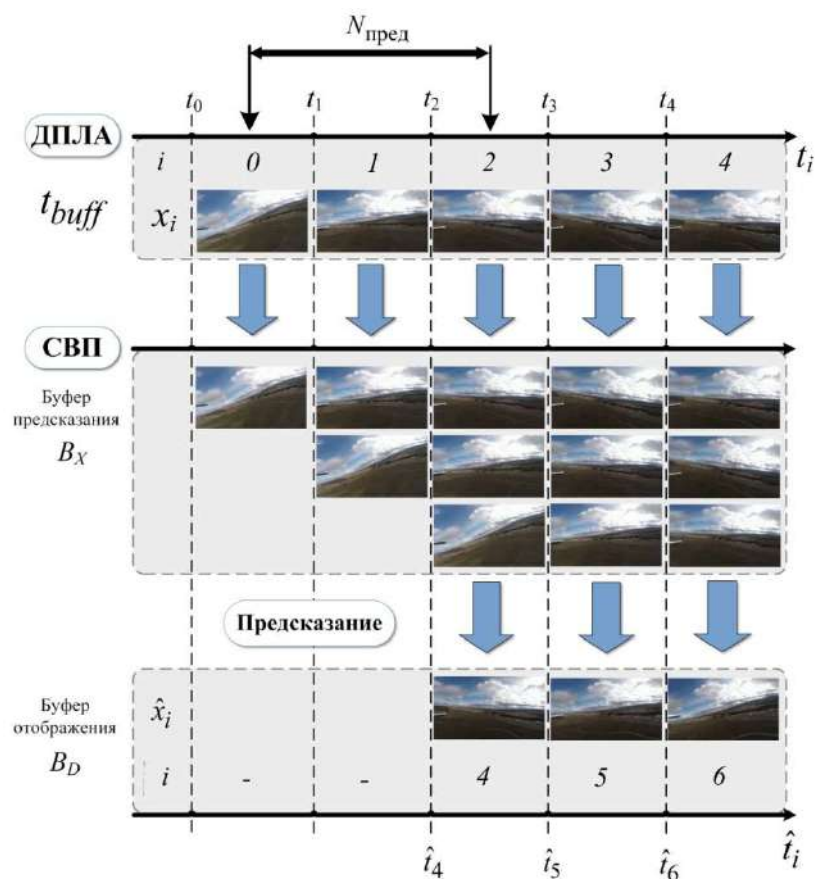


Рисунок 2.36 – Предсказание кадров видеопотока

2.3.3 Нейросетевые методы повышения перцептивного качества восстановленного видеопотока

Блок повышения разрешения предназначен для увеличения разрешения кадров видеопотока после их декодирования. Данный блок исследован в работах [407, 408]. В качестве перспективных моделей повышения разрешения рассматривались: модель скрытой диффузии (*от англ.* Latent Diffusion Models, LDM) [409]; трансформе SwinIR [410]; генеративно-сопоставительную нейронную сеть ESRGAN (*аббр. от англ.* Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Network) [411].

В результате экспериментов показано, что ESRGAN выделяется исключительно быстрым временем выполнения, которое составляло менее 10 секунд, благодаря своей эффективной архитектуре GAN. LDM, напротив, демонстрировал почти в 100 раз меньшую скорость из-за своих сложных диффузионных процессов. В свою очередь SwinIR работал в 2-4 раза

медленнее, чем ESRGAN. Эти результаты показывают компромисс между сложностью модели и задержкой. Для приложений, требующих наименьших временных затрат, таких как взаимодействие оператора с беспилотной системой от первого лица, ESRGAN является наиболее оптимальным выбором.

SwinIR добилась наивысших показателей SSIM и PSNR в отношении качества восстановления. LDM приблизился к визуальной точности SwinIR, но с гораздо более медленной обработкой. ESRGAN хуже выполняет восстановление мелких деталей из-за ограничений GAN. Это показывает преимущество SwinIR при необходимости в максимальном визуальном улучшении в условиях отсутствия ограничений по времени ожидания. Тем не менее, по времени выполнения LDM и SwinIR не подходят для задачи взаимодействия оператора и беспилотной системы.

2.4 Прикладной протокол управления информационными потоками FPV-CTVP

2.4.1 Современные протоколы управления передачей видеопотока в сетях связи

Современная передача видеопотока через пакетные сети связи в настоящее время осуществляется посредством нескольких стандартизированных протоколов, включающих RTSP, WebRTC, DASH, HLS, SRT и RTMP, каждый из которых характеризуется специфическими архитектурными решениями и областями применения.

Протокол RTSP предназначен для трансляции аудиовизуального контента и обеспечивает функциональность управления потоков (запуск, остановка, пауза). Реализация передачи данных может быть выполнена как по TCP, так и по UDP на транспортном уровне, что обусловило широкое распространение протокола в устройствах видеонаблюдения.

WebRTC ориентирован на обеспечение двусторонней прямой аудиовизуальной коммуникации между браузерами с использованием HTTP в

качестве транспортного носителя и JavaScript для обработки медиаданных. Данный протокол находит применение в системах видеоконференцсвязи [412].

DASH и HLS представляют собой протоколы адаптивной потоковой передачи видеоконтента поверх HTTP, реализующие сегментированную передачу данных. DASH является открытым стандартом, активно используемым платформой Netflix, и поддерживает AES128 шифрование. HLS, внедрённый компанией Apple, также осуществляет сегментированную передачу с поддержкой AES-шифрования, однако предполагает буферизацию перед воспроизведением, что обуславливает увеличение задержки передачи.

Протокол SRT базируется на UDP и обеспечивает сжатие видеоданных кодеком HEVC/H.265 с криптографической защитой посредством AES (128/256 бит). Механизм обратной связи через NACK-подтверждения обеспечивает надёжность доставки.

RTMP, являясь проприетарным протоколом Adobe, передаёт мультимедийные данные поверх TCP с использованием TLS-шифрования и широко применялся для трансляции в сети интернет.

Анализ функциональных характеристик указанных протоколов выявляет ограничения их применения для систем взаимодействия операторов и беспилотными летательными аппаратами в режиме от первого лица. Протоколы WebRTC, DASH и HLS, требующие HTTP и TCP, характеризуются повышенными задержками, критичными для прямого взаимодействия оператора и беспилотной системы. RTMP, являясь проприетарной разработкой иностранного происхождения и использующий протокол TCP, также непригоден для данного применения. SRT, несмотря на UDP-основу, обуславливает задержки вследствие механизма подтверждения доставки кадров. Хотя RTSP при использовании UDP обладает потенциалом для передачи видеопотока БПЛА, отсутствие поддержки криптографических алгоритмов согласно ГОСТ Р 34.12-2015 исключает возможность сертификации подобных систем на территории Российской Федерации.

2.4.2 Спецификация протокола FPV-CTVP

Разрабатываемый протокол FPV-CTVP реализует многоуровневую архитектуру передачи данных, базирующуюся на UDP в качестве основного транспортного протокола с опциональной поддержкой TCP и QUIC (режим DATAGRAM), при этом сетевой уровень функционирует преимущественно на базе IPv4 с возможностью использования IPv6.

Фрагментация полезной нагрузки осуществляется сегментами размером 1400 байт (настраиваемый параметр), что предусмотрено для предотвращения фрагментации на уровне IPv4. Данное решение обусловлено рядом факторов: избежание неэффективного использования сетевых ресурсов, минимизация деградации производительности при потере фрагментов и устранение потенциальных уязвимостей безопасности. Следует отметить, что IPv6 не подвергается фрагментации на уровне промежуточных маршрутизаторов.

Величина 1400 байт рассчитана на основе следующих параметров: MTU Ethernet (1500 байт), заголовки сетевого уровня (IPv4 – 20 байт, IPv6 – 40 байт), заголовок UDP (8 байт), заголовок TCP (20 байт), основной заголовок FPV-CTVP (15 байт) и заголовок сообщения VSTR FPV-CTVP (10 байт), с применением 15%-го резервирования для обеспечения совместимости при потенциальных модификациях протокольных структур.

Для протокола TCP сегментация полезной нагрузки не требуется ввиду встроенных механизмов фрагментации на уровне самого протокола. При использовании QUIC размеры сегментов уменьшаются до 1350 байт (IPv4) и 1330 байт (IPv6), обуславливая итоговый размер сегментов видеопотока в 1270 байт с учётом протокольных заголовков и резервирования.

Восстановление целостности видеокадра требует полного получения всех его сегментов на приёмной стороне. Каждый источник видеопотока идентифицируется уникальной парой параметров «IP-адрес:идентификатор потока», при этом идентификатор потока принимает значения в диапазоне от 0 до 65536.

Сообщения данного протокола состоит из основной и опциональной частей. Состав основной части неизменен для всех типов сообщений, в то время как зависит от конкретного вида сообщения. Спецификация протокола FPV-STVP представлена в Приложении А.

Перед началом передачи видеопотока и команд взаимодействия оператора инициируется согласование параметров соединения при помощи сообщений *HANDSHAKE_INIT* и *HANDSHAKE_ACK*. В этих сообщениях стороны обмениваются информацией о потоках, приоритетах и флагах безопасности.

Потоки, не требующие шифрования и авторизации, могут начинать передачу сразу после получения *HANDSHAKE_INIT*, без дополнительных подтверждений (рис. 2.37а).

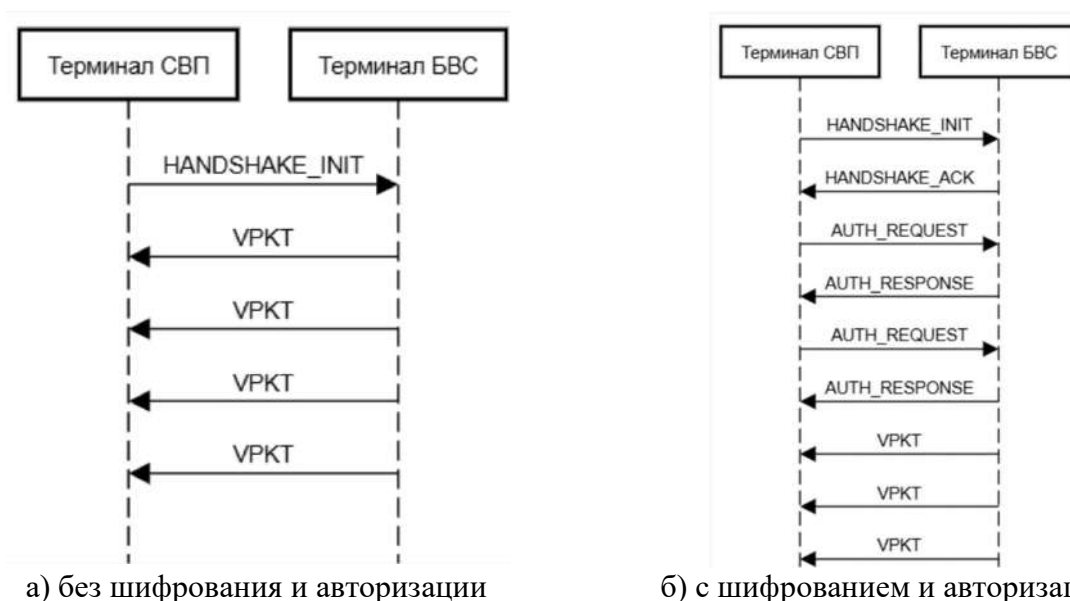


Рисунок 2.37 – Пример установления соединения и передачи видеопотока

Если один или несколько потоков требуют защиты, для них дополнительно выполняется процедура установления шифрования и авторизации, основанная на сообщениях *AUTH_REQUEST* и *AUTH_RESPONSE*. Каждому потоку может соответствовать собственная криптографическая и авторизационная политика (рис. 2.37б).

После инициализации соединения возможна настройка параметров потоков с использованием сообщений *CONFIG_UPDATE* и *CONFIG_ACK*. Эти

сообщения позволяют динамически изменять параметры кодирования и других характеристик потока, включая адаптацию к состоянию канала (рис. 2.38).

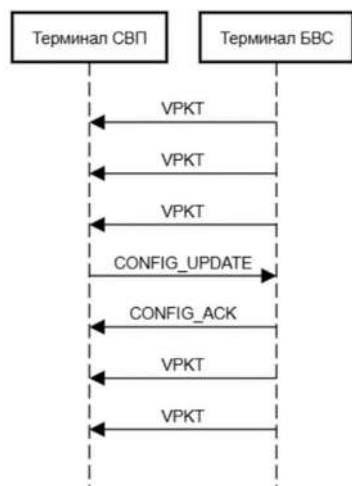


Рисунок 2.38 – Изменение конфигурации потока (БПЛА – BBC)

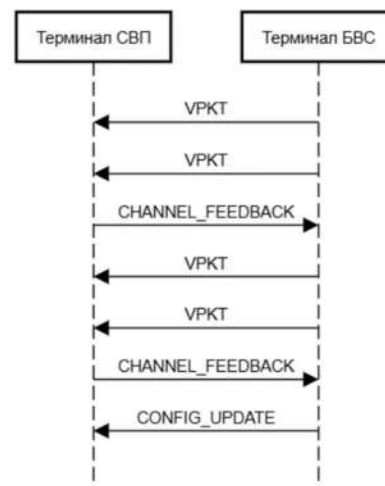


Рисунок 2.39 – Изменение конфигурации потока из информации CHANNEL_FEEDBACK сообщений (БПЛА – BBC)

Передача видеоданных осуществляется сообщениями *VPKT*, содержащими фрагментированный поток.

В процессе соединения приёмная сторона может передавать сообщения *CHANNEL_FEEDBACK*, содержащие информацию о пропускной способности, джиттере, задержке и других характеристиках канала. Эти данные могут использоваться для динамической настройки параметров передачи, включая режимы компрессии, частоту кадров и отключение потоков с низким приоритетом в критических ситуациях (рисунок 2.39).

2.5 Выводы по главе 2

1. Оригинальный вклад настоящего исследования состоит в разработке интегрированной архитектуры *системы информационного обмена* для взаимодействия оператора с беспилотной системой на фрагменте гибридных орбитально-наземных сетей связи, ориентированной на работу в условиях жестких ограничений по задержке и пропускной способности каналов связи. Ее базовым понятием является *канал информационного обмена* прикладного уровня, обеспечивающий совместную передачу информационных потоков

(FPV-видеопоток, телеметрия и КВО) по единому протоколу прикладного уровня FPV-CTVP. Показано, что суммарная задержка в КИО прямо определяет рассинхронизацию между наблюдаемой оператором полетной обстановкой и фактическим откликом БПЛА. Разработанная архитектура объединяет три класса моделей: модели функционирования КИО (наземного и космического сегментов ГОНСС), модели видеокодеков (включая нейросетевые видеокодеки) и моделей кодеков команд взаимодействия оператора. Такая интеграция позволяет переходить от анализа отдельных компонентов к оценке эффективности всей системы FPV.

2. Ключевыми показателями эффективности СИО являются: задержка видеопотока и КВО, параметры перцептивного качества восстановленного видеопотока на стороне оператора (DISTS, SSIM), вероятность потери кадров FPV-видеопотока. Показано, что именно сочетание задержки и перцептивного качества видео определяет пригодность канала для использования в режиме FPV в реальном времени.

3. Центральным компонентом СИО, является модуль контроля интенсивности видеопотока, который осуществляет мониторинг кадровой воспроизводимости и реализует адаптивные механизмы компенсации временной рассинхронизации и контроля частоты кадров. Модуль КИВ функционирует в трёх дискретных режимах: базовом (без адаптации) и двух адаптивных режимах специализированного назначения (контроля интенсивности и сокращения задержки). В режиме контроля интенсивности кадров КИВ выполняет интерполяцию промежуточных кадров, компенсируя джиттер кадров на устройстве отображения, что повышает субъективное качество визуального восприятия оператором. В режиме минимизации задержки модуль реализует предсказание последующих кадров, что обеспечивает сокращение задержки в СИО. Разработана детальная архитектура модуля КИВ, включающая процедуры накопления и извлечения точечных оценок и интервальных доверительных интервалов ключевых параметров:

частоты кадров видеопотока, динамических характеристик видеопотока, временных метрик интерполяции и предсказания.

4. Вторым ключевым компонентом СИО является модуль анализа показателей эффективности КИО, который выполняет функции непрерывного мониторинга задержки передачи видеопотока в СИО, детектирования аномальных колебаний частоты кадров и задержки прикладного уровня, активацией адаптивных режимов КИВ и вычисления оптимальных параметров режимов функционирования. Представлена полная архитектурная спецификация и функциональное содержание модуля, а также методология расчёта параметров адаптивных режимов.

5. В рамках предложенной архитектуры реализован замкнутый контур статистического мониторинга показателей функционирования СИО, где блоки учёта параметров (для КИВ и КИО) считаются инкрементально средние, дисперсии и доверительные интервалы для ключевых показателей, а анализатор КИО применяет методы статистического контроля (контрольные карты Шухарта) для выявления аномалий в задержках и потерях. Это превращает архитектуру в самоадаптирующуюся систему, автоматически подстраивающую настройки кодеков и интенсивность видеопотока под текущее состояние КИО. Впервые обосновано применение контрольных карт Шухарта для высокодинамичного процесса изменения FPS. При этом показано, что наименьшая доля ложных выходов процесса из статистически устойчивого состояния достигается при вычислении границ в соответствии с ГОСТ Р ИСО 7870-2-2015 и размером подгрупп $n=19$.

6. Необходим переход от детерминированного к вероятностному моделированию СИО, так как задержки и потери в КИО носят стохастический характер. Для показателей эффективности восстанавливаются плотности вероятности методом Парзена–Розенблатта, что позволяет оценивать не только средние значения, но и вероятность достижения комплекса целей функционирования системы при заданной структуре СИО.

7. На основе экспериментальных данных получены законы распределения задержки кадров FPV-видеопотока, сжатых нейросетевыми видеокодеками, в КИО наземного и космического сегментов фрагмента ГОНСС. Установлено, что задержка КИО подчиняется усеченному двухпараметрическому бета-распределению, что подтверждено критериями Пирсона и Колмогорова-Смирнова. Данное распределение учитывает наличие нижней и верхней границ задержки и является непрерывным, а также допускает произвольное положение моды внутри допустимого интервала. Выявленные законы распределения (с параметрами в найденных диапазонах) и зависимости математического ожидания задержки от размера полезной нагрузки (кадров видеопотока) легли в основу имитационных моделей наземного и космического КИО.

8. Разработанная архитектура СИО и предложенные вероятностные модели КИО в совокупности обеспечивают количественно обоснованный выбор параметров нейросетевых видеокодеков и кодеков команд взаимодействия оператора под реальные характеристики наземных и спутниковых КИО, возможность проектирования гибридных каналов FPV с учётом распределений задержек и потерь, а не только их средних значений, а также реализацию замкнутого адаптивного контура, минимизирующего рассинхронизацию FPV и поддерживающего работоспособность БАС в условиях вариативных и стохастически изменяющихся сетевых условий.

ГЛАВА 3. МЕТОДЫ НЕЙРОСЕТЕВОГО КОДИРОВАНИЯ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ

3.1 Архитектура нейросетевого видеокодека

В данной главе будет представлено детальное описание и анализ НВК, которые формируют ядро подсистемы сжатия и передачи видеопотока. Как было показано на общей архитектурной схеме в главе 2 (рис. 2.4), эти кодеки являются ключевыми компонентами FPV-модулей расширения. В рамках представленной архитектуры они обозначены как:

- «Кодер НВК»: интегрирован в FPV-модуль беспилотной системы и отвечает за сжатие исходящего видеопотока перед его передачей по каналам информационного обмена.
- «Декодер НВК»: интегрирован в FPV-модуль терминала оператора и выполняет обратную операцию – восстановление (декодирование) видеопотока для его отображения.

Далее будет подробно рассмотрена архитектура, принципы работы и математические основы функционирования разработанных нейросетевых видеокодеков.

Одним из ключевых подходов к снижению задержек в системе взаимодействия оператора и беспилотной системы является сжатие видеопотока. Уменьшая размер данных, передаваемых по сети, можно сократить время передачи и, следовательно, уменьшить общую задержку. Таким образом, актуализируется научно-техническая задача обоснования и разработки такой системы информационного обмена, которая обеспечивала бы возможность эффективного сжатия передаваемого видеопотока. Решение этой задачи заключается в выборе или разработке модели сжатия, которая будет обеспечивать минимум величины задержки при сохранении требуемого для выполнения задачи перцептивного качества восстановленных видеокадров.

В настоящее время данная проблематика исследуется очень активно. В научно-экспертных публикациях рассматриваются как классические

алгоритмические подходы, такие как кластеризация К-средних, генетические алгоритмы и дискретное косинусное преобразование, так и нейросетевые методы. Среди последних можно выделить подходы на базе сверточных автоэнкодеров [413-416], а также сетей Кохонена [417, 418] и Хопфилда [419, 420]. Особое внимание в последние годы привлекли диффузионные вероятностные модели [409, 421-423], которые продемонстрировали хорошие результаты в задачах генерации реалистичных изображений высокого качества.

3.1.1 Диффузионный нейросетевой видеокодек

В данном разделе рассматривается метод сжатия (кодирования) и восстановления (декодирования) видеопотока с потерями, в основе которого лежит оригинальный кодек, построенный на базе латентной диффузионной нейросетевой модели. Расширенные исследования по теме диффузионного нейросетевого видеокодека представлены в работах [424, 425].

Теоретические основы диффузионных моделей

Основой предлагаемого метода является диффузионный процесс, концепция которого заимствована из области неравновесной статистической физики. Диффузионные модели представляют собой класс вероятностных генеративных моделей, преобразующих случайный шум в репрезентативную выборку данных. Метод базируется на двух процессах: прямом и обратном.

Прямой процесс диффузии

Процесс прямой диффузии заключается в систематическом и медленном преобразовании структуры входных данных (оригинального изображения x_0) посредством итеративного добавления гауссовского шума. Выберем точку данных x_0 из реального распределения $q(x)$. Процесс прямой диффузии определяется как марковская цепь, где на каждом из T шагов к выборке x_{t-1} добавляется небольшое количество шума. Размеры шагов (дисперсии) регулируются заранее заданным расписанием $\{\beta_t \in (0,1)\}_{t=1}^T$. Этот переход описывается условной вероятностью, которая является нормальным

распределением:

$$q(x_t|x_{t-1}) = N(x_t; \sqrt{1 - \beta_t}x_{t-1}, \beta_t I); \quad q(x_{1:T}|x_0) = \prod_{t=1}^T q(x_t|x_{t-1}), \quad (3.1)$$

где N — многомерное нормальное распределение, а I — единичная матрица, что подразумевает отсутствие корреляции между компонентами шума.

По мере увеличения шага t , выборка x_0 постепенно теряет свои отличительные черты. При $T \rightarrow \infty$ зашумленная выборка x_T становится эквивалентной изотропному распределению Гаусса $N(0, I)$. Этот процесс (прямое добавление шума) и обратный процесс (удаление шума) представлены на рисунке 3.1.

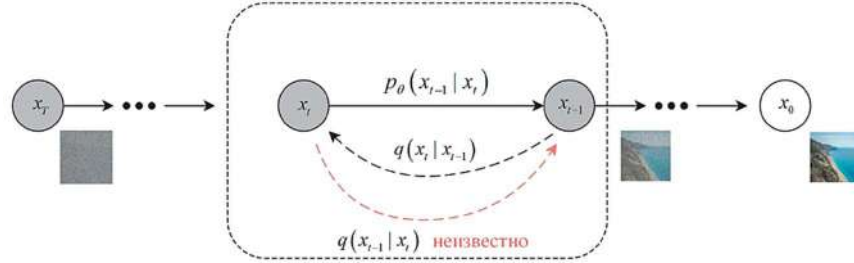


Рисунок 3.1 – Марковская цепь прямого/обратного диффузионного процесса генерации выборки путем медленного добавления/удаления шума

Важным свойством описанного процесса является возможность получить зашумленное изображение x_t на любом произвольном шаге t в аналитической (закрытой) форме, минуя итерации. Для этого введем обозначения: $\alpha_t = 1 - \beta_t$ и $\bar{\alpha}_t = \prod_{i=1}^t \alpha_i$. Тогда, используя прием репараметризации, x_t можно выразить напрямую через x_0 и стандартный гауссовский шум $\epsilon \sim N(0, I)$:

$$x_t = \sqrt{\bar{\alpha}_t}x_0 + \sqrt{1 - \bar{\alpha}_t}\epsilon \quad (3.2)$$

Эта формула является фундаментальной, так как позволяет на этапе обучения мгновенно генерировать зашумленные выборки x_t для любого шага t , что необходимо для обучения модели обратного процесса.

Переход в латентное пространство

Выполнение диффузионных процессов непосредственно в пространстве пикселей (например, $512 \times 512 \times 3$) является вычислительно крайне затратным и медленным. Это продиктовано тем, что большинство битов изображения вносят

свой вклад в детали восприятия, в то время как семантическая и концептуальная композиция сохраняется даже после существенного сжатия.

Для решения этой проблемы исследовательской группой CompVis Мюнхенского университета Людвига-Максимилиана была разработана модель стабильной диффузии SD (аббр. от англ. Stable Diffusion – стабильная диффузия) [426]. Ее ключевое отличие заключается в том, что процессы прямой и обратной диффузии происходят не в пространстве пикселей, а в сжатой внутренней латентной области признаков.

Базовым элементом для перехода между пространствами является вариационный автоэнкодер VAE (аббр. от англ. Variational Autoencoder – вариационный автоэнкодер) (рис. 3.2).

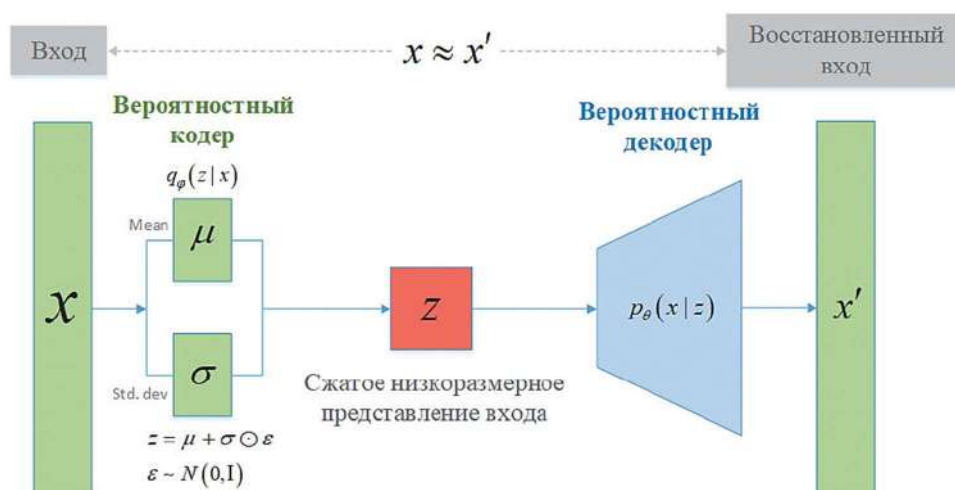


Рисунок 3.2 – Модель вариационного автоэнкодера

Как свидетельствует рисунок 3.2, VAE состоит из двух нейронных сетей:

1. Вероятностный кодировщик $q_\phi(z|x)$: преобразует входное изображение x в латентное представление z .
2. Вероятностный декодер $p_\theta(x|z)$: восстанавливает изображение x (обозначено как x') из латентного представления z .

В отличие от классического автоэнкодера, VAE отображает вход x не в фиксированный вектор z , а в параметры (среднее μ и дисперсию σ) изотропного распределения Гаусса. Латентный код z затем сэмплируется из этого распределения.

Обучение VAE заключается в одновременной максимизации вероятности генерации реальных выборок данных и минимизации расхождения между апостериорным распределением $q_\varphi(z|x)$ и априорным $p_\theta(z)$ (обычно $N(0, I)$). Это расхождение измеряется дивергенцией Кульбака-Лейблера (KL -дивергенция). Целью обучения является поиск оптимальных параметров θ^*, φ^* , минимизирующих функцию потерь L_{VAE} :

$$\theta^*, \varphi^* = \arg \min_{\theta, \varphi} L_{VAE} \quad (3.3)$$

Функция потерь L_{VAE} (известная как вариационная нижняя граница, VLB) имеет вид:

$$L_{VAE}(\theta, \varphi) = -E_{z \sim q_\varphi(z|x)} \log p_\theta(x|z) + D_{KL}(q_\varphi(z|x) || p_\theta(z)) \quad (3.4)$$

Первый член (математическое ожидание логарифма правдоподобия) отвечает за точность восстановления x' из z . Второй член (KL -дивергенция) действует как регуляризатор, заставляя латентное пространство быть гладким и структурированным.

Поскольку процесс выборки z из $q_\varphi(z|x)$ является стохастическим и не позволяет распространять градиент, используется прием репараметризации. Случайная величина z выражается как детерминированная функция $z = \mu + \sigma \odot \epsilon$, где $\epsilon \sim N(0, I)$ – вспомогательная случайная величина, а $\odot$ – поэлементное произведение. Это позволяет градиенту проходить через μ и σ , делая модель обучаемой.

Обратный процесс диффузии

Обратный процесс (декодирование) заключается в воссоздании истинной выборки x_0 (в рассматриваемом случае – латентного кода z_0) из входного гауссовского шума x_T (или z_T). Для этого необходимо научиться делать выборку из $q(x_{t-1}|x_t)$. Если шаги β_t достаточно малы, $q(x_{t-1}|x_t)$ также будет гауссовым. Однако оценить $q(x_{t-1}|x_t)$ аналитически весьма проблематично, так как для этого требуется доступ ко всему набору данных. Поэтому обучается нейронная сеть p_θ (в рассматриваемом случае это U-Net) для аппроксимации этих условных вероятностей:

$$p_{\theta}(x_{t-1}|x_t) = N(x_{t-1}; \mu_{\theta}(x_t, t), \Sigma_{\theta}(x_t, t)) \quad (3.5)$$

где μ_{θ} и Σ_{θ} — выходы нейронной сети

Ученые показали [427], что обратная условная вероятность, при условии знания поддается вычислению. Используя теорему Байеса [428] и свойства нормальных распределений, можно вывести параметры этого распределения (среднее и дисперсию):

$$\tilde{\beta}_t = \frac{1 - \bar{\alpha}_{t-1}}{1 - \bar{\alpha}_t} \beta_t \quad (3.6)$$

$$\tilde{\mu}_t(x_t, x_0) = \frac{\sqrt{\alpha_t}(1 - \bar{\alpha}_{t-1})}{1 - \bar{\alpha}_t} x_t + \frac{\sqrt{\alpha_{t-1}}\beta_t}{1 - \bar{\alpha}_t} x_0 \quad (3.7)$$

Поскольку на этапе обучения исходное (чистое) изображение x_0 известно, его можно использовать в дальнейших расчетах. Ранее было приведено выражение для среднего значения обратного процесса $\tilde{\mu}_t$, которое зависит и от зашумленного x_t , и от исходного x_0 . В то же время, из уравнения прямого процесса можно алгебраически выразить x_0 через x_t и добавленный шум ϵ_t , а именно:

$$x_0 = \frac{1}{\sqrt{\bar{\alpha}_t}} (x_t - \sqrt{1 - \bar{\alpha}_t} \epsilon_t) \quad (3.8)$$

Подставив это выражение для x_0 в (3.7), после преобразований, получаем новое выражение для $\tilde{\mu}_t$, которое теперь зависит только от x_t и ϵ_t :

$$\tilde{\mu}_t = \frac{1}{\sqrt{\bar{\alpha}_t}} \left(x_t - \frac{1 - \bar{\alpha}_t}{\sqrt{1 - \bar{\alpha}_t}} \epsilon_t \right) \quad (3.9)$$

Таким образом, задача нейронной сети $\mu_0(x_t, t)$ сводится к предсказанию $\tilde{\mu}_t$, x_t подается на вход сети, а α_t и $\bar{\alpha}_t$ — известные константы. Следовательно, единственный неизвестный член — это шум ϵ_t .

На практике оказалось эффективнее обучать нейронную сеть $\epsilon_0(x_t, t)$ предсказывать не $\tilde{\mu}_t$, а непосредственно добавленный шум ϵ_t . Тогда μ_0 вычисляется по формуле:

$$\mu_0(x_t, t) = \frac{1}{\sqrt{\bar{\alpha}_t}} \left(x_t - \frac{1 - \bar{\alpha}_t}{\sqrt{1 - \bar{\alpha}_t}} \epsilon_0(x_t, t) \right) \quad (3.10)$$

Целью обучения является минимизация вариационной нижней границы L VLB, которую можно представить в виде суммы членов KL-дивергенции для

каждого шага t [429]:

$$L_{VLB} = L_T + L_{T-1} + \dots + L_0 \quad (3.11)$$

где $L_T = D_{KL}(q(x_T|x_0)||p_\theta(x_T))$, $L_{T-1} = D_{KL}(q(x_{t-1}|x_t, x_0)||p_\theta(x_{t-1}|x_t))$ и $L_0 = -\log p_\theta(x_0|x_1)$.

Член L_T является константой и может быть проигнорирован. Члены L_{T-1} сравнивают два гауссовых распределения (истинное q и аппроксимирующее p_θ). Минимизация L_{T-1} сводится к минимизации разницы между их средними $\tilde{\mu}_t$ и μ_0 . После упрощений это приводит к минимизации L_2 -нормы (MSE) между истинным шумом ϵ и предсказанным шумом $\epsilon_0(x_t, t)$ [427].

Архитектура диффузионного нейросетевого кодера

На основе изложенных теоретических принципов латентной диффузии был разработан кодек, состоящий из нейросетевого кодировщика (на стороне БПЛА) и диффузионного нейросетевого декодера (на стороне ТО).

Нейросетевой кодировщик

Кодировщик (рис. 3.3 [424]) выполняет сжатие кадра видеопотока.

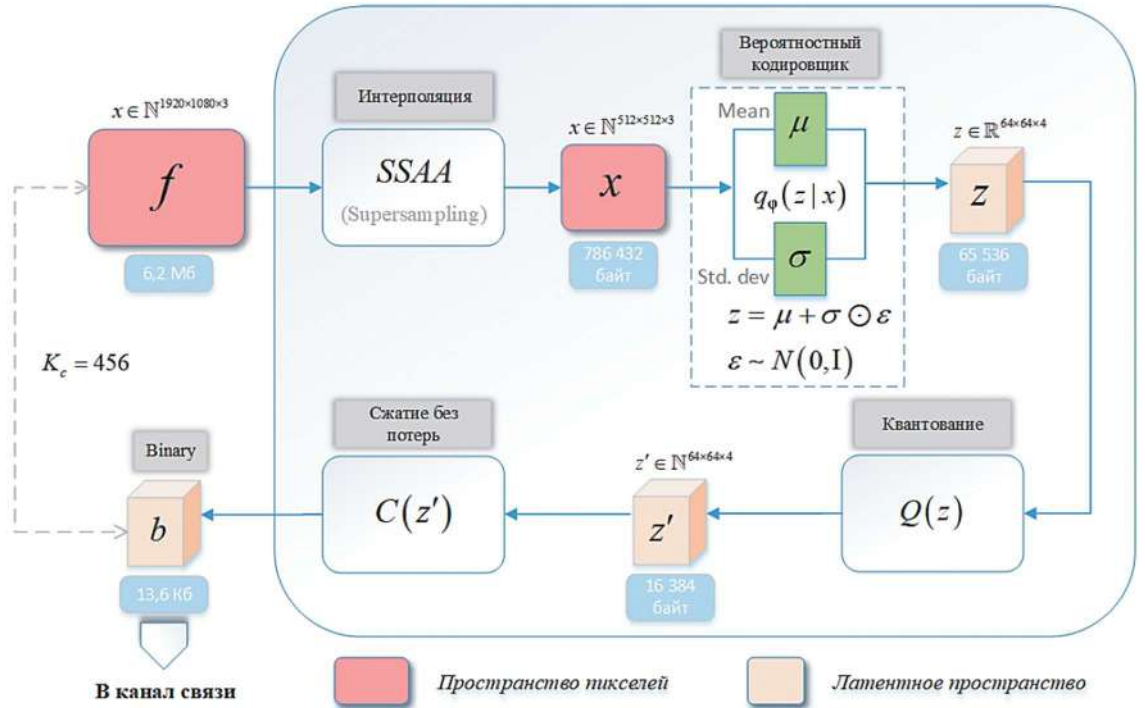


Рисунок 3.3 – Структурная схема нейросетевого кодера в системе сжатия видеопотока

Нейросетевой кодер состоит из следующих блоков:

1. Блок интерполяции (*SSAA*): входной кадр f разрешения Full HD ($1920 \times 1080 \times 3$) преобразуется к входному размеру VAE $x \in \mathbb{N}^{512 \times 512 \times 3}$. Для этого используется метод передискретизации *SSAA* (supersampling anti-aliasing), усредняющий цвета пикселей.
2. Вероятностный кодировщик (VAE): Блок $q_\phi(z|x)$ преобразует изображение x в сжатое латентное представление $z \in \mathbb{N}^{1 \times 4 \times 64 \times 64}$. Этот тензор передает фундаментальный семантический смысл изображения в пространстве меньшей размерности.
3. Блок квантования $Q(z)$ – это ключевой этап для сжатия. Латентный тензор z , состоящий из вещественных чисел (*float32*), кодируется в квантованное пространство $z' \in \mathbb{N}^{64 \times 64 \times 4}$. Это достигается путем округления вещественных чисел до 8-битных беззнаковых целых чисел (0-255), что в свою очередь приводит к 4-кратному уменьшению размера тензора на данном этапе.
4. Блок сжатия без потерь $C(z')$: квантованный тензор z' сжимается с использованием стандартного алгоритма сжатия без потерь DEFLATE²⁸, который использует комбинацию алгоритмов LZ77 и Хаффмана.

Применение этой схемы к кадру Full HD (исходный размер $\approx 6,2$ МБ) позволяет получить сжатый видеокادر размером около ≈ 14 КБ, достигая коэффициента сжатия $K_c \approx 456$. Весь процесс работы кодировщика формализован в виде алгоритма на рисунке 3.4.

²⁸ Deutsch, P. DEFLATE Compressed Data Format Specification version 1.3 / P. Deutsch. IETF RFC 1951, 1996.

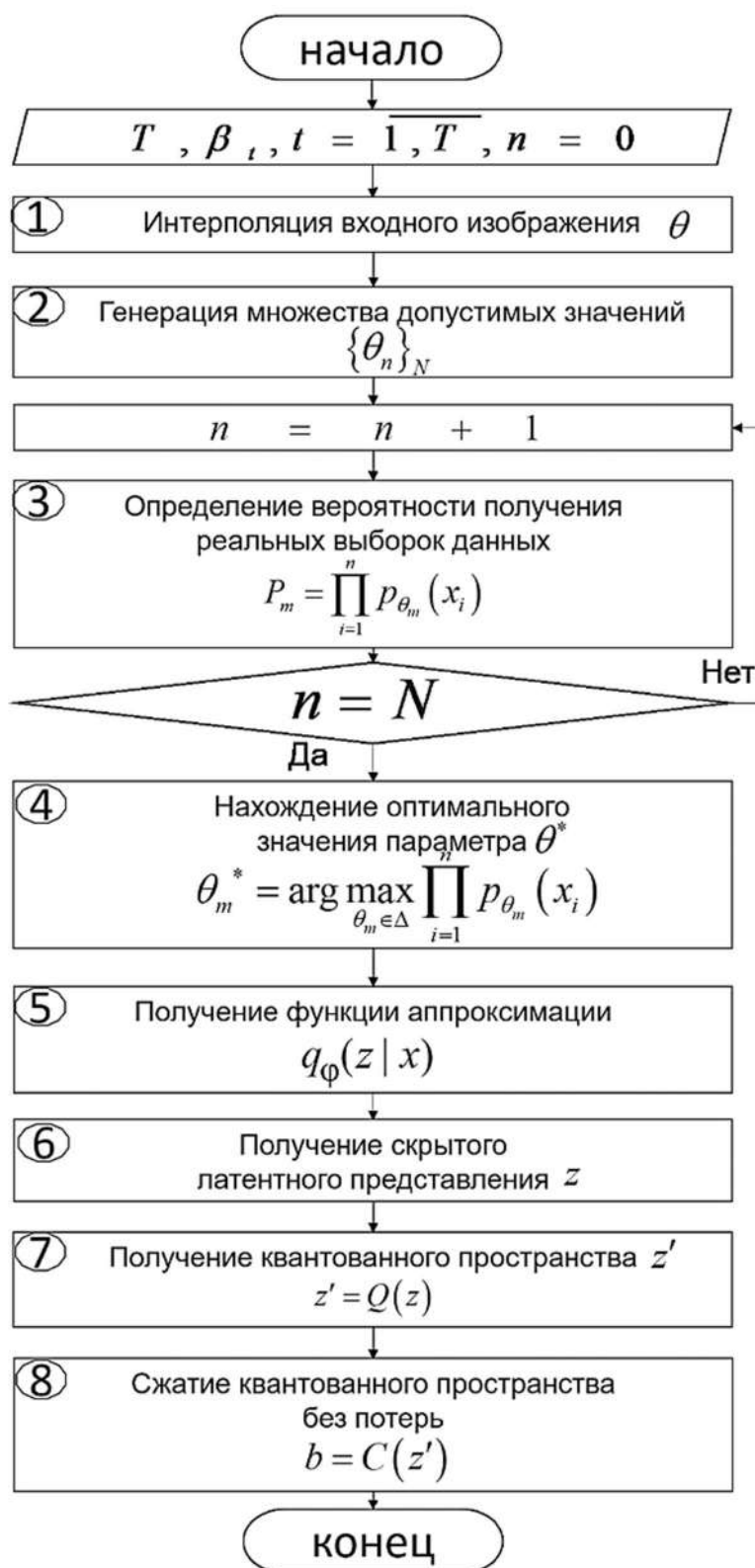


Рисунок 3.4 – Схема алгоритма метода кодирования видеопотока
Диффузионный нейросетевой декодер (ДНД)

Декодер (рис. 3.5 [425]) выполняет обратную задачу – восстановление кадра Full HD из бинарного потока b .

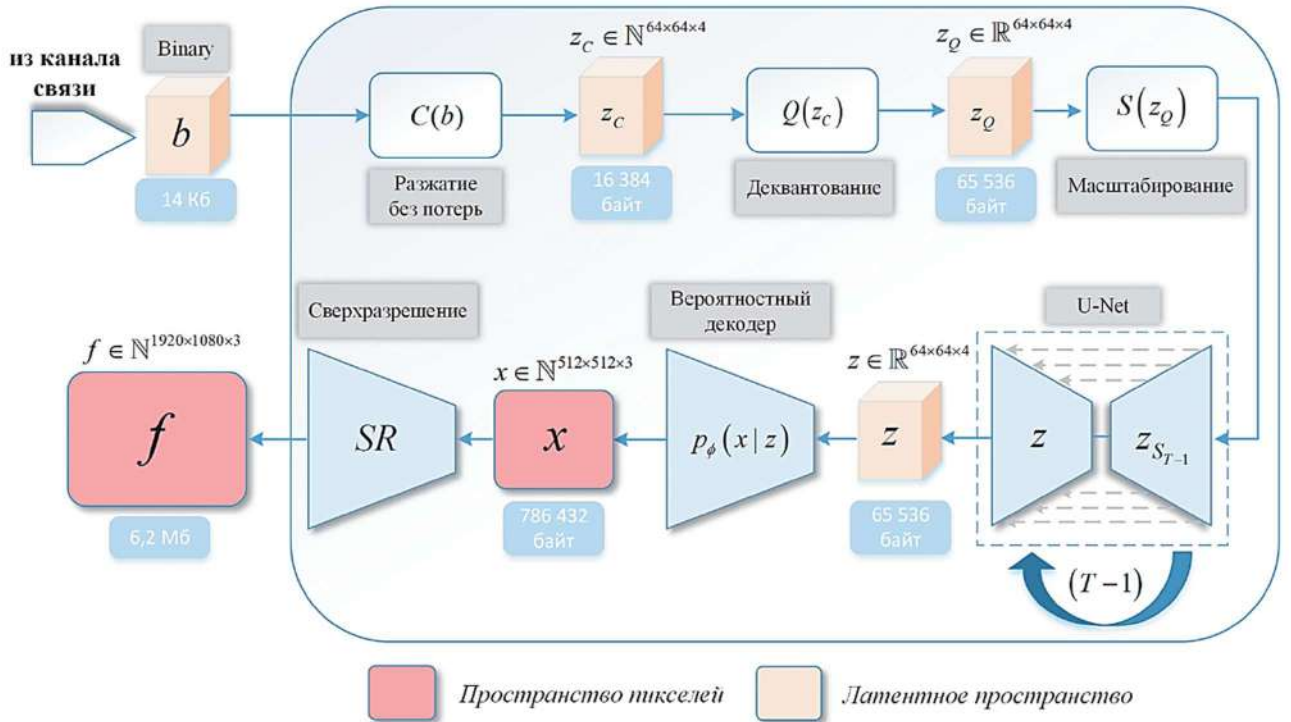


Рисунок 3.5 – Диффузионный нейросетевой декодер

1. Блок разжатия без потерь $C(b)$: поток b (14 КБ) разжимается (алгоритмом DEFLATE или LZW [430], восстанавливая квантованный тензор $z_c \in \mathbb{N}^{64 \times 64 \times 4}$ (384 байт).
2. Блок деквантования $Q(z_c)$: целочисленные значения z_c (0-255) преобразуются обратно в пространство вещественных чисел $z_Q \in \mathbb{R}^{64 \times 64 \times 4}$.
3. Модуль масштабирования $S(z_Q)$: латентный тензор z_Q масштабируется с использованием коэффициента $S(z_Q) = 0,18215$. Этот коэффициент получен эмпирически [431] и необходим, чтобы гарантировать, что латентное пространство, в котором будет работать диффузионная модель, имеет приблизительно единичную дисперсию.
4. Блок U-Net (обратная диффузия): это основной и наиболее вычислительно затратный блок. Он реализует итеративный процесс обратной диффузии. Модель U-Net (на базе ResNet) T раз (например, $T-1$ раз) предсказывает и удаляет шум ϵ_0 из латентного тензора z_t , выполняя переход $z_T \rightarrow \dots \rightarrow z_0$. Алгоритм этого итеративного процесса

представлен на рисунке 3.6.

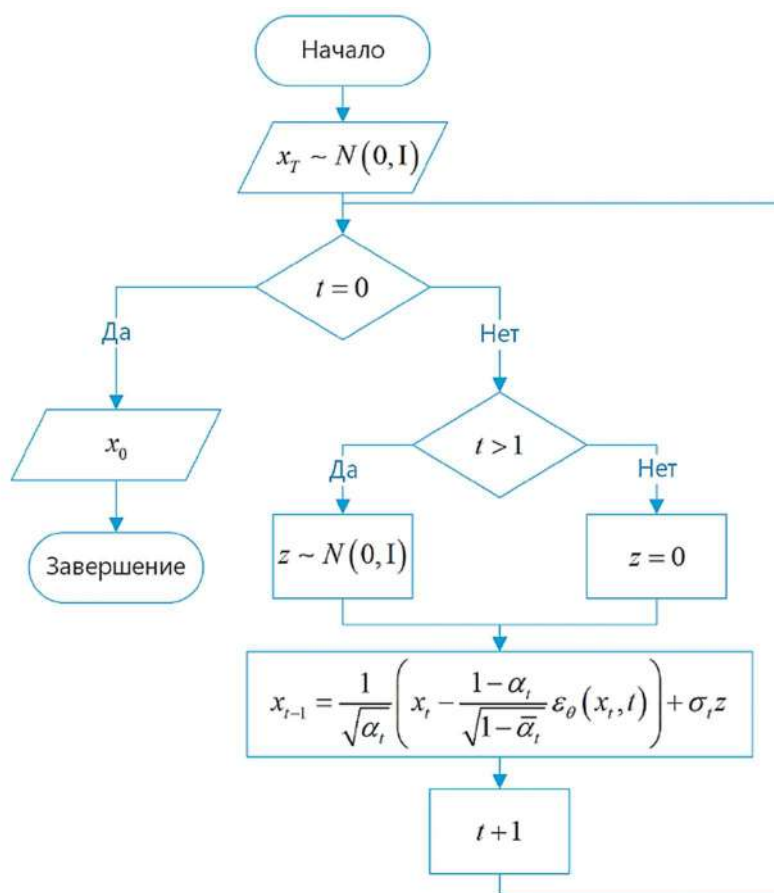


Рисунок 3.6 – Алгоритм удаления шума

5. Вероятностный декодер (VAE): «очищенное» латентное представление $z \in \mathbb{N}^{64 \times 64 \times 4}$. (т.е. z_0) подается на вход вероятностного декодера $p_\theta(x|z)$. Он преобразует латентный код обратно в пространство пикселей $x \in \mathbb{N}^{512 \times 512 \times 3}$.
6. Нейросетевая модель сверхразрешения (SR): полученное изображение x (512×512 пикселей) масштабируется до оригинального разрешения Full HD $f \in \mathbb{N}^{1920 \times 1080 \times 3}$ с помощью специализированной нейросети Super-Resolution.

Экспериментальное исследование параметров кодека

Для обеспечения минимальной задержки при сохранении перцептивного качества необходимо исследовать влияние ключевых параметров кодека. С этой целью реализованы два основных эксперимента.

Эксперимент 1: оценка влияния квантования

На этапе кодирования был введен блок квантования $Q(z_C)$. Квантизация 32-битных вещественных чисел в 8-битные целые является операцией с потерями и может приводить к погрешности воссоздания. Необходимо было оценить, насколько существенна эта потеря качества.

Для этого использовались данные, собранные из открытых источников, представлявшие собой 12 видеофайлов, записанных с летающих дронов («видео с дронов»). Для каждого кадра было получено два восстановленных изображения (с использованием стандартного декодера): с использованием квантования и без него. Качество оценивалось по метрике SSIM. На основе этих выборок были построены эмпирические законы распределения значений SSIM (рис. 3.7).

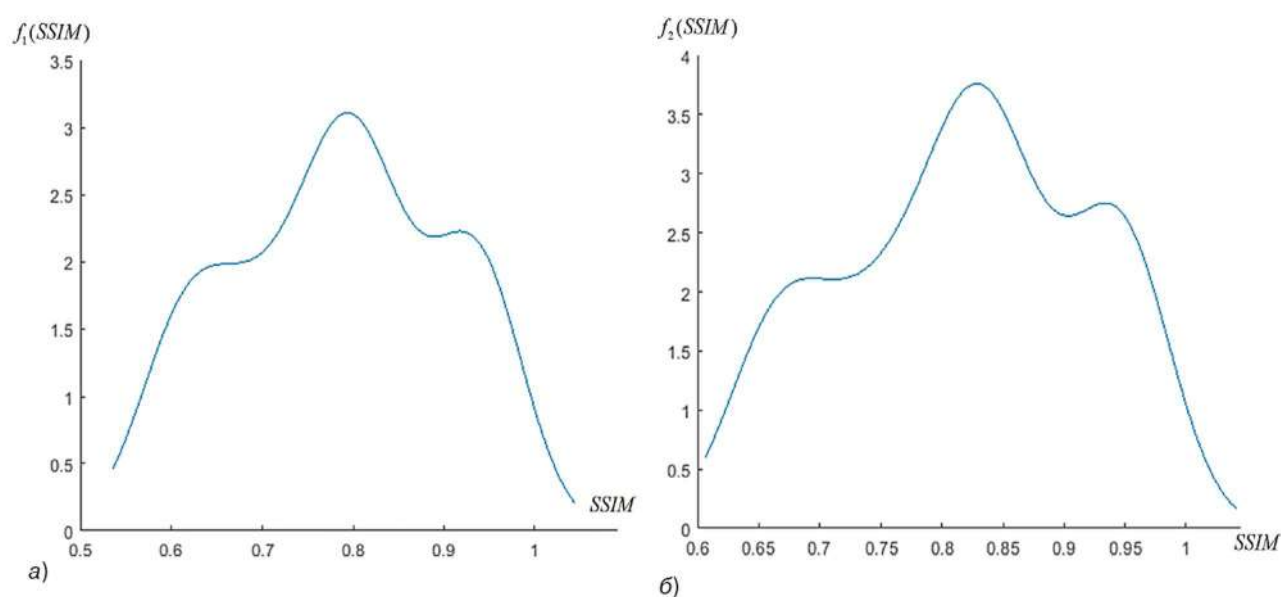


Рисунок 3.7 – Законы распределения значений SSIM

(а) с квантованием, (б) без квантования

Для проверки гипотезы о сходимости этих двух законов распределения (f_1 и f_2) использовался статистический критерий Пирсона χ^2 , который оценивает меру расхождения между наблюдаемыми частотами [432]:

$$\chi^2 = n \sum_{i=1}^k \frac{(p_i^* - p_i)^2}{p_i} \quad (3.12)$$

$$\chi^2 = n \sum_{i=1}^k \frac{(p_i^* - p_i)^2}{p_i} \quad (3.12)$$

В результате проверки была вычислена мера расхождения $\chi^2 = 3,94$. Для данного значения χ^2 и соответствующего числа степеней свободы, найденная по таблицам [432] вероятность p (p-value) приблизительно равна 0,56.

Поскольку эта вероятность p не является малой (т.е. $p > 0,05$), расхождения можно трактовать как несущественные, а гипотеза о том, что законы распределения SSIM при использовании квантования и без него сходятся, является правдоподобной.

Вывод: использование квантования не приводит к статистически значимому ухудшению качества сжимаемого видеопотока. Однако оно существенно уменьшает (в 4 раза) итоговый размер латентного пространства.

Эксперимент 2: оценка влияния параметров декодера

Наибольший вклад в задержку декодирования вносит итеративный этап удаления шума в блоке U-Net. Количество итераций S (шагов) напрямую влияет на время декодирования и на качество итогового кадра.

Было проведено исследование для определения влияния двух факторов:

1. Наличие квантования (Q): (дихотомическая переменная: 0 или 1).
2. Число итераций U-Net (S): (количественная переменная).

В качестве зависимых переменных ПЭФ использовались метрики SSIM и PSNR (дополнительно).

На первом этапе был проведен корреляционный анализ (рис. 3.8).

Как видно из корреляционной матрицы (рис. 3.8, а), оба предиктора имеют сильную отрицательную корреляцию с PSNR ($Q \rightarrow PSNR = -0,812$; $S \rightarrow PSNR = -0,792$). Это означает, что и включение квантования, и увеличение числа шагов S приводят к снижению PSNR. При этом связь с SSIM оказалась значительно слабее.

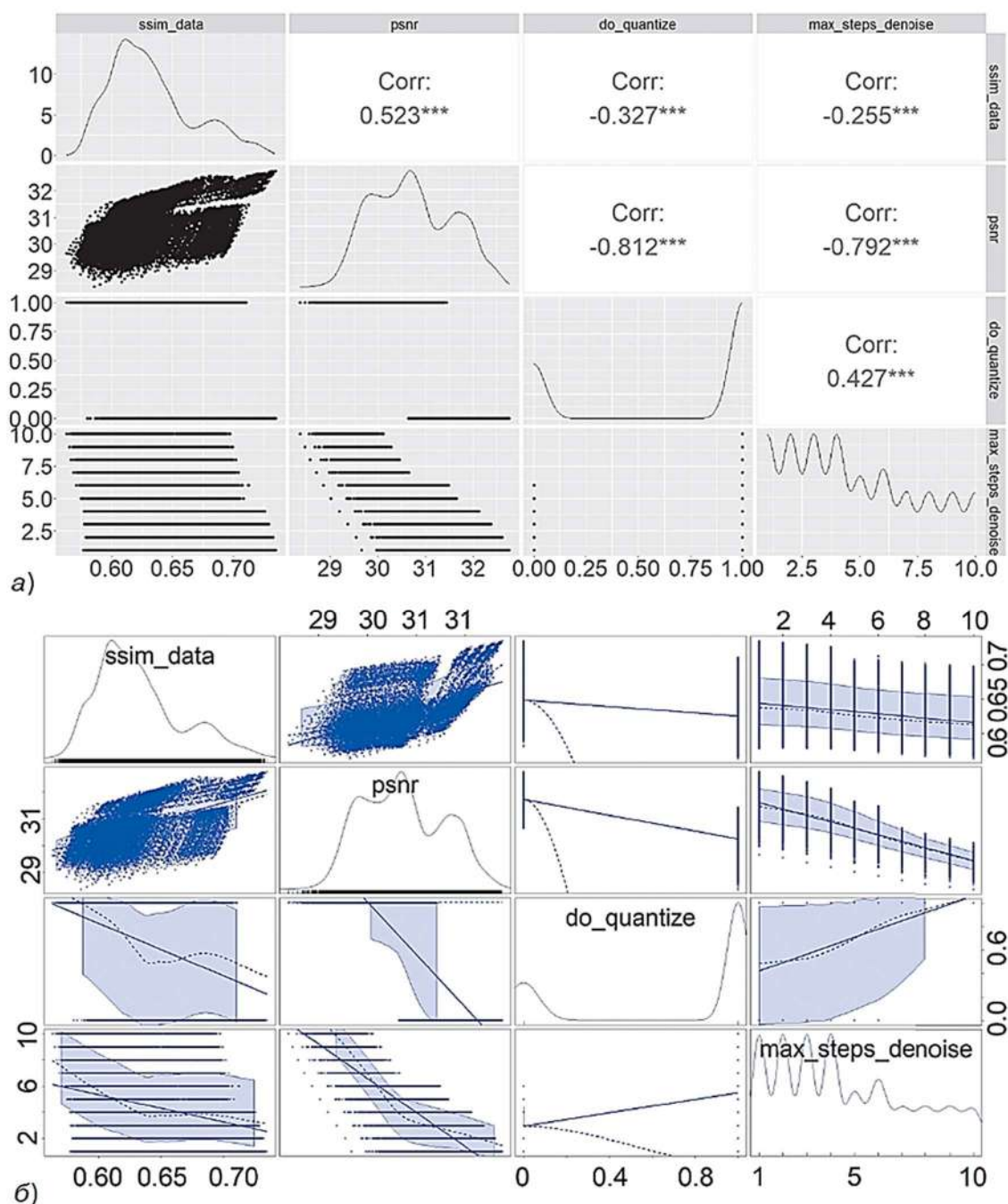


Рисунок 3.8 – Графическое представление отношения независимых переменных и ПЭФ: диаграммы рассеивания (а), точно-бисериальная корреляция (б)

Далее был проведен множественный регрессионный анализ. Результаты для коэффициентов регрессии представлены в таблице 3.1.

Как видно из таблицы 3.1, значения *p-value* для всех коэффициентов, связанных с наличием квантования и числом итераций (для обеих метрик PSNR и SSIM), имеют значение $2 \cdot 10^{-16}$. Это существенно ниже уровня значимости $\alpha=0,05$, что позволяет сделать вывод о том, что квантование сети и количество

ее шагов статистически значимо влияют на ПЭФ.

Таблица 3.1 – Множественный регрессионный анализ

Параметры	Response psnr (KP*)	Response psnr (p-value)	Response ssim (KP)	Response ssim (p-value)
do_quantize	-1,0487	$< 2 \cdot 10^{-16}$	-0.0195	$< 2 \cdot 10^{-16}$
max_steps_denoise	-0,1647	$< 2 \cdot 10^{-16}$	-0,0017	$< 2 \cdot 10^{-16}$
Примечание: *KP – коэффициент регрессии				

Оценки адекватности моделей представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Оценки адекватности регрессионного анализа

Параметры	PSNR	SSIM
Свободный KP	32,211	0,6536
R	0,9026	0,1235
R ²	0,8147	0,0153
RSE	0,263	0.0319

Модель для *PSNR* показывает высокую адекватность: $R^2 = 0,8147$, это означает, что 81,47% дисперсии *PSNR* объясняется этими двумя предикторами. Модель для *SSIM*, напротив, имеет $R^2 = 0,0153$, подтверждая слабую линейную связь. Проверки остатков (рис. 3.9) и их распределения (рис. 3.10) подтвердили адекватность регрессионной модели для *PSNR*.

На основе коэффициентов из таблиц 3.3 и 3.4 были получены уравнения множественной линейной регрессии:

$$\text{PSNR} = 32,211 - 1,0487 \times Q - 0,1647 \times S \quad (3.13)$$

$$\text{SSIM} = 0,6536 - 0,0195 \times Q - 0,0017 \times S \quad (3.14)$$

1. При выборе квантованного варианта сети ($Q=1$) *PSNR* снижается на 1,0487 единиц, а *SSIM* – на 0,0195, по сравнению с неквантованным ($Q=0$).
2. При увеличении числа шагов S на 1, *PSNR* уменьшается на 0,1647 единиц, а *SSIM* – на 0,0017.

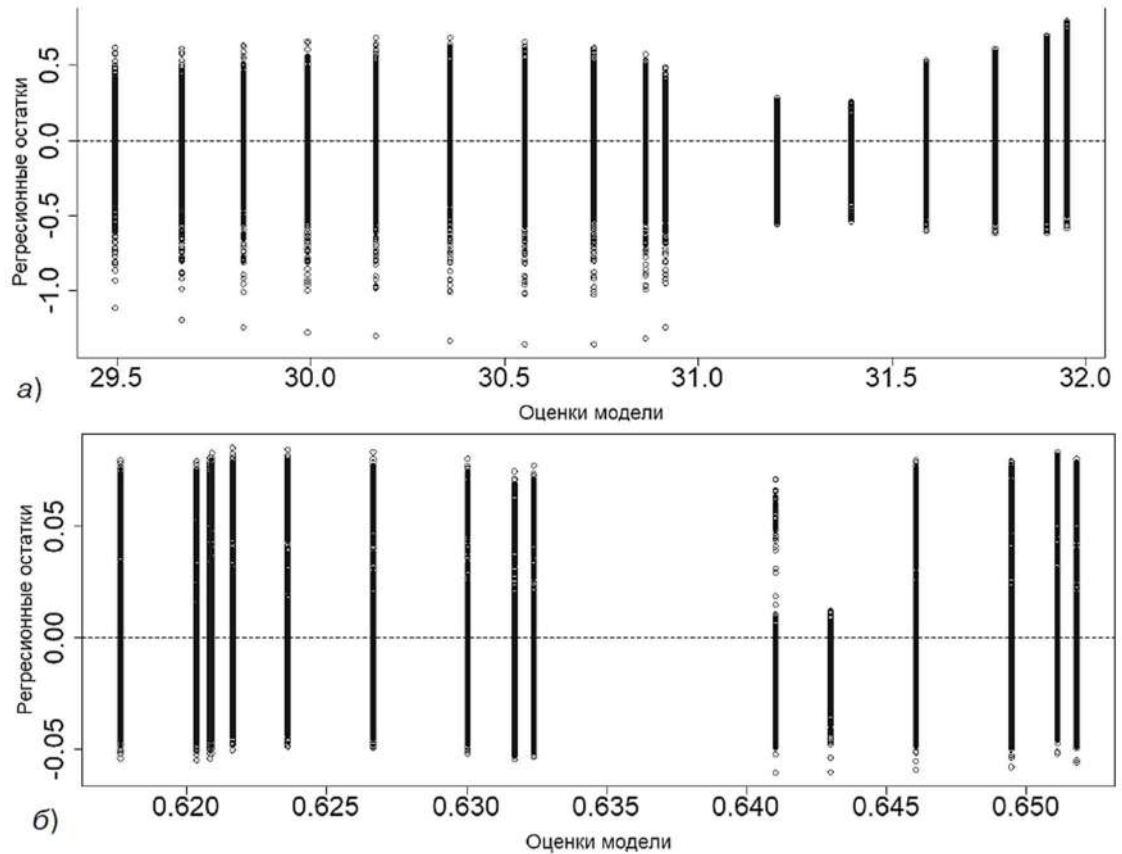


Рисунок 3.9 – Графики регрессионных остатков: PSNR (а), SSIM (б)

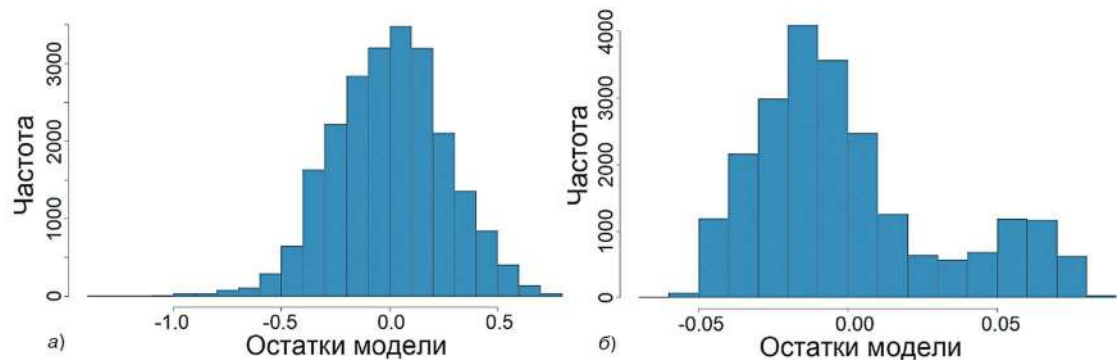


Рисунок 3.10 – Гистограммы регрессионных остатков: PSNR (а), SSIM (б)

Таблица 3.3 – Результаты полиномиальной регрессии

Параметры	Response PSNR (KP)	Response PSNR (p-value)	Response SSIM (KP)	Response ssim (p-value)
do_quantize	-1,0358	$< 2 \cdot 10^{-16}$	-0,0194	$< 2 \cdot 10^{-16}$
max_steps_denoise (1-ая степень)	-69,4644	$< 2 \cdot 10^{-16}$	-0,7278	$< 2 \cdot 10^{-16}$
max_steps_denoise (2-ая степень)	-4,1128	$< 2 \cdot 10^{-16}$	0,093	0,0035
max_steps_denoise (3-я степень)	4,7081	$< 2 \cdot 10^{-16}$	0,0856	0,0078
max_steps_denoise (4-ая степень)	-2,3026	$< 2 \cdot 10^{-16}$	-0,1562	$< 2 \cdot 10^{-16}$

Для выбора оптимальных значений (минимизации задержки S при сохранении качества) целесообразно выбирать наименьший шаг S при

фиксированном варианте сети.

Дополнительно была рассмотрена полиномиальная регрессия (табл. 3.3 и 3.4).

Таблица 3.4 – Оценка адекватности

Параметры	PSNR	SSIM
Свободный КР	31,4304	0,6454
R	0,9053	0,125
R^2	0,8196	0.0156
RSE	0,2594	0,0318

Модель полиномиальной регрессии (например, 4-й степени) показала незначительное улучшение R^2 для PSNR (с 0,8147 до 0,8196). Было сделано заключение, что использование полиномиальной регрессии не вносит существенных улучшений в построение модели зависимости, и для практических оценок наиболее целесообразно использовать более простую модель множественной линейной регрессии.

Таким образом, в результате проведённых исследований был разработан и верифицирован оригинальный метод сжатия и восстановления видеопотока взаимодействия оператора и беспилотной системы на основе латентной диффузионной нейросетевой модели. Новизна метода заключается в том, что лежащий в его основе диффузионный нейросетевой декодер, разработанный путем преобразования элементов предобученной генеративной модели, позволяет не только восстанавливать сжатый видеопоток, но и сохранять требуемое перцептивное качество изображения.

Проведенные эксперименты позволяют утверждать следующее:

- квантование латентного пространства ($\text{float32} \rightarrow \text{int8}$) в кодере не приводит к статистически значимому ухудшению качества (по метрике SSIM), но существенно уменьшает объем передаваемых данных;
- параметры декодера (наличие квантования Q и число итераций U-Net S) статистически значимо влияют на итоговое качество изображения PSNR и SSIM;

- для минимизации задержки декодирования (которая зависит от S) целесообразно выбирать наименьший возможный шаг S , обеспечивающий приемлемое качество.
- наибольшее процентное изменение ПЭФ (качества) происходит при изменении типа сети (включении квантования Q), а не при изменении числа шагов S .

Таким образом, предложенный кодек позволяет достичь высокого коэффициента сжатия (≈ 456) за счет переноса диффузии в латентное пространство и применения квантования, что в конечном итоге является решением поставленной задачи по снижению задержек при взаимодействии оператора и беспилотной системы.

3.1.2 Нейросетевой видеокодек на основе вариационных автокодировщиков

Взаимодействие оператора с беспилотной системой в режиме от первого лица через спутниковый сегмент ГОНСС сопряжено со значительными техническими трудностями, обусловленными спецификой каналов передачи данных. Как было отмечено в разделе 2.2.5, ключевой проблемой при реализации такого взаимодействия является рассинхронизация FPV-видеопотока, поступающего от БПЛА к оператору, и КВО, передаваемых в обратном направлении. Подобная рассинхронизация вызвана, в первую очередь, большими задержками распространения сигнала, характерными для спутниковых каналов связи. Для задач FPV ПЭФ T_3^B является критически важным и первостепенным при проектировании систем связи.

Как было отмечено в главе 1, применение ГОНСС становится безальтернативным решением для обеспечения контроля и взаимодействия оператора и беспилотной системы на территориях, где отсутствует или нестабильно покрытие наземных сетей мобильной связи, например, в труднодоступных или удаленных районах. Однако пропускная способность спутниковых каналов в таких сетях зачастую жестко ограничена и может

составлять порядка десятков или сотен Кбит/с. Традиционные стандарты кодирования видеoinформации, такие как AVC/H.264 и HEVC/H.265, широко применяемые в настоящее время, ориентированы на устранение пространственной и временной избыточности на уровне пикселей изображения. Экспериментальные данные показывают, что для передачи видеопотока с приемлемым качеством данные кодеки требуют полосы пропускания порядка единиц Мбит/с. В условиях низкоскоростных каналов (менее 1 Мбит/с) эффективность этих стандартов резко падает, что приводит к появлению артефактов, потере детализации и недопустимому увеличению задержек при попытке буферизации. Следовательно, стандартные методы сжатия не позволяют в полной мере реализовать потенциал ГОНСС для задач FPV взаимодействия.

В связи с этим возникает необходимость разработки и внедрения перспективных технологий сжатия, способных обеспечить высокую степень компрессии при сохранении информативности видеопотока. Использование нейросетевого видеокодека на базе латентной диффузионной модели, описанный в предыдущем разделе, позволяет сжимать видеокадры в среднем до 11,5 килобайт/видеокадр, что является недостаточным для использования в низкоскоростных каналах ГОНСС. Одним из наиболее перспективных направлений является использование нейросетевых видеокодеков, в частности, основанных на применении вариационных автокодировщиков VAE.

Суть такого подхода также заключается в переходе от кодирования пиксельного пространства высокой размерности к кодированию компактного латентного пространства признаков (ЛПП) нейронной сети. Вариационные автокодировщики преобразуют входной кадр видеопотока во внутреннее представление меньшей размерности, выделяя семантически значимые признаки сцены. Это позволяет применять к полученному ЛПП методы квантования и дополнительного сжатия (как без потерь, так и с потерями), достигая степеней компрессии, недоступных для классических алгоритмов, и тем самым существенно снижая требования к пропускной способности канала

связи и уменьшая задержку передачи видеопотока.

В основе разработанного видеокодека лежит архитектура вариационного автокодировщика (рис. 3.2), который, в отличие от детерминированных автокодировщиков, моделирует вероятностное распределение латентных переменных.

Архитектура нейросетевого кодера и декодера

Разработанный нейросетевой кодек реализует конвейерную обработку кадров, включающую предварительную обработку, нейросетевое преобразование, квантование и итоговое сжатие ЛПП. Кодер размещается на борту БПЛА и выполняет функцию формирования сжатого битового информационного потока для передачи по КИО. Его структура представлена на рисунке 3.11. Расширенные исследования данного нейросетевого видеокодека представлены в [390, 391, 433–439].

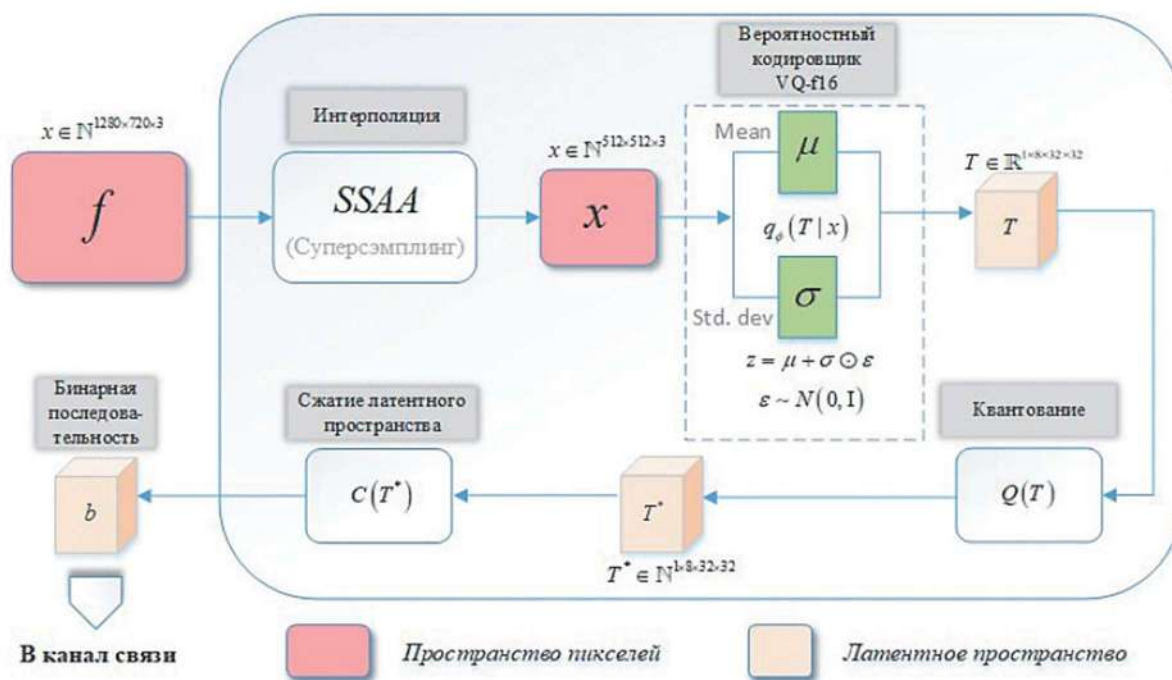


Рисунок 3.11 – Нейросетевой кодер

Обработка кадра $f \in \mathbb{N}^{1280 \times 720 \times 3}$ (в формате HD) происходит в несколько этапов:

1. Блок интерполяции (SSAA): для согласования размерности входных данных с архитектурой нейронной сети и снижения вычислительной нагрузки

исходный кадр уменьшается до разрешения 512×512 пикселей методом суперсэмплинга (реализация `INTER_AREA` в библиотеке `OpenCV`). Полученный тензор обозначается как x .

2. Вероятностный кодировщик (Encoder): тензор x поступает на вход предобученного вариационного автокодировщика (например, VQ-f16 или KL-f4 из семейства SD). Кодировщик предсказывает параметры распределения латентных признаков μ и σ , на основе которых формируется тензор ЛПП T (*float16*). Размерность T зависит от коэффициента пространственного сжатия f модели; например, для VQ-f16 размерность составляет $1 \times 8 \times 32 \times 32$.

3. Блок квантования $Q(T)$: данный блок выполняет дискретизацию непрерывных значений ЛПП, переводя их из формата с плавающей точкой (*float16*) в целочисленный формат (*uint8*). Это ключевой этап для снижения энтропии данных. Квантование может быть двухступенчатым: предварительное квантование для уменьшения количества уникальных значений и основное квантование для изменения типа данных.

4. Блок сжатия $C(T^*)$: квантованный тензор T^* подвергается сжатию. В зависимости от режима работы, может применяться сжатие без потерь (линеаризация и энтропийное кодирование, например, LZMA) или сжатие с потерями (интерпретация тензора как псевдо-изображения и применение кодеков типа AVIF или HEIC). Результатом является бинарная последовательность *bin* (или *b*), готовая к передаче.

5. Блок маскирования (опционально): для работы на сверхнизких битрейтах может применяться маскирование, при котором часть значений бинарной последовательности удаляется согласно определенному паттерну, что дополнительно снижает объем передаваемых данных (см. раздел 3.1.3).

Нейросетевой декодер

Декодер функционирует на стороне терминала оператора и выполняет обратные преобразования для реконструкции видеопотока (рис. 3.12).

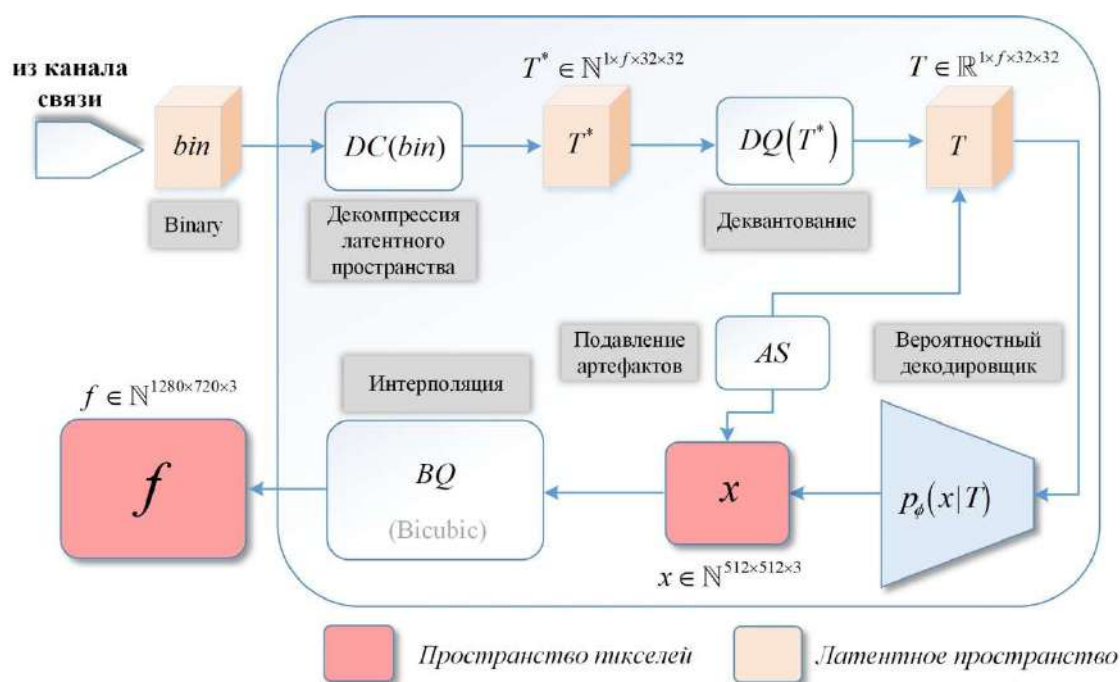


Рисунок 3.12 – Нейросетевой декодер

Процесс декодирования включает:

1. Блок декомпрессии $DC(bin)$: восстановление квантованного тензора T^* из принятой бинарной последовательности.
2. Блок деквантования $DQ(T^*)$: преобразование целочисленных значений обратно в вещественное пространство признаков T (float16).
3. Вероятностный декодировщик: реконструкция изображения x размера 512×512 из латентного представления T с использованием генеративной сети VAE.
4. Блок интерполяции: восстановление исходного разрешения 1280×720 методом бикубической интерполяции (INTER_CUBIC).
5. Блок подавления артефактов (AS): Опциональный модуль постобработки, предназначенный для устранения визуальных дефектов (артефактов блочности или шума), возникающих в процессе квантования и нейросетевой генерации.

Сравнительный анализ моделей вариационных автокодировщиков

В рамках разработки кодека был проведен сравнительный анализ различных архитектур вариационных автокодировщиков типов VQ (аббр. от англ. Vector Quantized) и KL (с регуляризацией Кульбака-Лейблера), входящих

в состав библиотеки моделей SD. Исследовались модели с различными коэффициентами пространственного сжатия $f \in \{4, 8, 16, 32\}$. Основными критериями сравнения выступали размерность ЛПП (определяющая потенциал сжатия), перцептивное качество восстановленного изображения (метрики DISTS, SSIM, PSNR) и вычислительная сложность (время кодирования/декодирования). Результаты исследования характеристик моделей представлены в таблице 3.5 [390, 391].

Таблица 3.5 – Характеристики вариационных автокодировщиков

Модель	Размерность T	$LSize$, байт	$SSIM_{ср}$	$DISTS_{ср}$	$PSNR_{ср}$, дБ	$T_{код}$, мс	$T_{декод}$, мс
VQ-f4	(1,3,128,128)	49152	0,95	0,063	33,05	131,29	44,27
VQ-f8	(1,4,64,64)	16384	0,89	0,127	32,48	60,51	55,63
VQ-f16	(1,8,32,32)	8192	0,84	0,177	31,61	21,76	26,93
KL-f4	(1,3,128,128)	49152	0,95	0,063	37,57	27,34	45,17
KL-f8	(1,4,64,64)	16384	0,90	0,117	32,79	20,68	39,29
KL-f16	(1,16,32,32)	16384	0,86	0,157	32,4	16,96	29,56
KL-f32	(1,64,16,16)	16384	0,86	0,157	30,48	17,55	32,29

Анализ данных показывает следующее [390, 391]:

1. Качество восстановления: модели типа KL демонстрируют более высокие показатели перцептивного качества (DISTS, SSIM, PSNR) по сравнению с VQ моделями при аналогичных или близких размерах латентного пространства. Например, KL-f4 обеспечивает $PSNR \approx 37,57$ дБ против 33.05 дБ у VQ-f4.

2. Размер латентного пространства $LSize$: минимальный размер «сырого» латентного пространства имеет модель VQ-f16 (8192 байта), что делает ее наиболее перспективной для задач экстремального сжатия. Модели KL-f8, KL-f16 и KL-f32 имеют одинаковый размер $LSize$ (16384 байта), несмотря на различия в структуре тензоров (рис. 3.13).

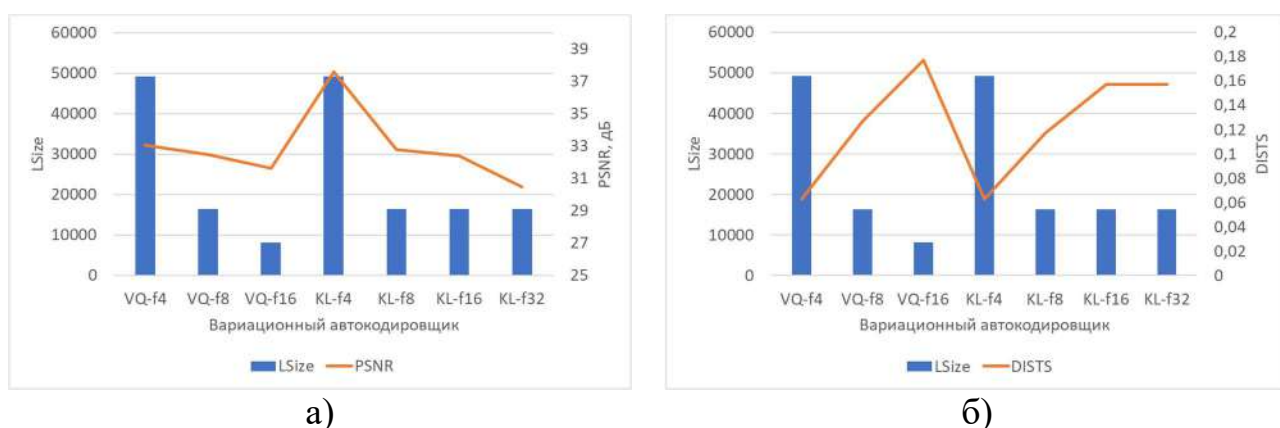


Рисунок 3.13 – Соотношение качества реконструкции (PSNR (а); DISTS (б)) и размера ЛПП ($LSize$) для исследуемых моделей

Преимущество KL-моделей, в особенности KL-f4, проявляется при совместном их использовании с алгоритмами сжатия с потерями и квантования. Подробнее это показано в работах [390, 391].

3. Вычислительная сложность: время кодирования $T_{код}$ для моделей KL существенно ниже, чем для VQ (например, 27,34 мс для KL-f4 против 131,29 мс для VQ-f4), что критично для работы в режиме реального времени на борту БПЛА (см. рис. 3.14). Модели выполнялись на графическом процессоре Nvidia A100.

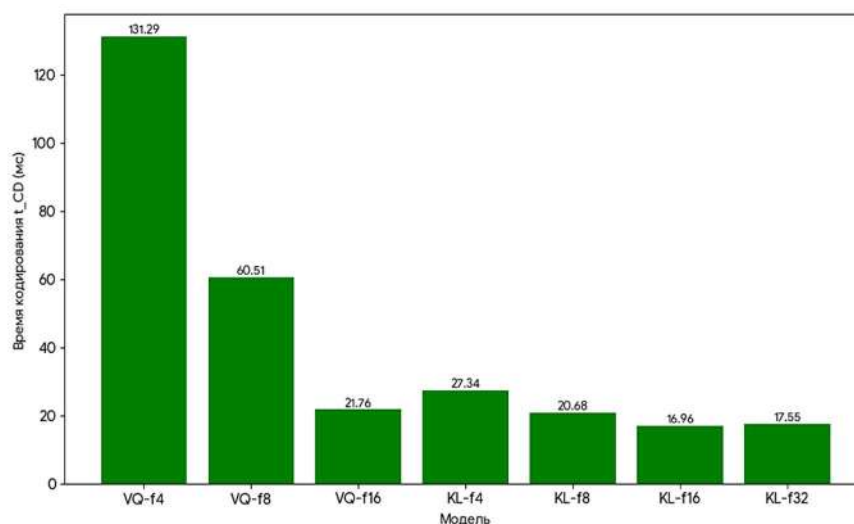


Рисунок 3.14 – Сравнительный анализ времени кодирования $T_{код}$ различных моделей автокодировщиков

Анализ распределений значений в ЛПП показал, что для всех

рассмотренных моделей значения распределены по закону, близкому к нормальному, однако параметры распределения (μ и σ) различаются. Это требует адаптации параметров алгоритмов квантования для каждой конкретной модели автокодировщика.

На основании проведенного анализа для дальнейшей разработки нейросетевого кодека были выбраны модели VQ-f16 (как обеспечивающая минимальный размер сжатых данных) и KL-f4/KL-f16 (как обеспечивающие лучший баланс между перцептивным качеством и скоростью обработки).

В рамках задачи минимизации информационной энтропии при передаче данных через КИО ГОНСС, ЛПП рассматривается как тензор T размерности (l, c, h, w) , элементы которого $t_i \in \mathbb{R}$ представлены в формате с плавающей точкой (*float16/float32*). Целью математического преобразования является построение сюръективного отображения $Q: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{Z}_q$, переводящего непрерывные значения в дискретное множество $T^* \in \{0, 1, \dots, 255\}$ формата *uint8*.

В исследовании [433] представлено несколько алгоритмов квантования: линейное квантование (ЛИН); логистическое (ЛОГ) и модифицированное логистическое квантование (мЛОГ); гиперболическо-тангенциальное (и модифицированное) квантование (ГТ и мГТ); степенное квантование (СТ); нечётно-степенное квантование (НС); двойное логистическое квантование (2ЛОГ); гиперболическо-синусоидальное квантование (ГС). Как показано, наиболее оптимальными является ЛИН.

Для снижения энтропии данных до смены типа применяется предварительное квантование, целью которого является уменьшение мощности множества уникальных значений N_{uniq} . В работе исследованы методы *BitGroom* (обнуление младших бит мантиссы), *BitRound* (стохастическое округление мантиссы) и *Scale* (масштабирование с округлением до *nsd* знаков). Экспериментальные данные показывают, что оптимальным параметром является $nsd=0$ (округление до целых). Увеличение количества значащих цифр $nsd>1$ ведет к экспоненциальному росту объема данных без значимого

улучшения метрик перцептивного качества восстановления.

Для верификации разработанных математических моделей и получения конкретных численных значений параметров сюръективного отображения $Q: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{Z}_q$ был проведен натурный вычислительный эксперимент. В качестве эмпирической базы использовалась выборка объемом $K=1000$ кадров видеопотока взаимодействия оператора и беспилотной системы. Кадры были отобраны методом равномерной временной дискретизации из непрерывной видеопоследовательности длительностью 1800 кадров, полученной с борта БПЛА в реальных условиях полета. Для обеспечения совместимости с входным интерфейсом нейросетевого видеокодека изображения проходили предварительную обработку: бикубическую интерполяцию до разрешения HD (1280×720) с последующим масштабированием (downsampling) до размера 512×512 пикселей. Обработка выборки производилась энкодером вариационного автокодировщика VQ-f16, генерирующим тензоры ЛПП T_k размерности (1, 8, 32, 32).

Алгоритм расчета параметров: учитывая стохастическую природу видеопотока, параметры квантования (сдвиг m и масштаб s) рассчитывались как статистически усредненные величины по всему ансамблю кадров. Это необходимо для обеспечения стационарности процесса кодирования/декодирования.

1. Расчет сдвига ($\bar{m}$): определяется как среднее арифметическое минимальных значений тензоров по выборке.
2. Расчет масштаба (s): определяется исходя из условия проецирования динамического диапазона сигнала на диапазон целых чисел $[0, 255]$ с учетом уже вычисленного среднего сдвига.

Формализованный вид расчета:

$$\bar{m} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \min(T_k); \quad \bar{s} = \frac{255}{\left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \max(T_k)\right) - \bar{m}} \quad (3.15)$$

Полученные результаты для различных функциональных преобразований

систематизированы в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Экспериментально установленные параметры квантования для модели VQ-f16

Алгоритм	Функция преобразования	Сдвиг (m)	Масштаб (s)	Примечание к физическому смыслу параметров
ЛИН	Аффинная ($y=ax+b$)	-2,55	47,55	Отражает абсолютные границы значений «сырого» тензора VQ-f16.
СТ	Степенная ($y=x^s$)	-2,40	3,30	Масштаб s здесь является показателем степени, линеаризующим восприятие.
ЛОГ	Сигмоида	0,06	271,32	Сдвиг $m \approx 0$ указывает на центрирование данных относительно матожидания.
ГТ	$Tanh$	0,06	127,50	Фиксированный масштаб (255/2) для симметричного отображения $[-1,1] \rightarrow [0,255]$.
НСЗ	Полином 3 ст.	0,06	7,91	Высокая крутизна полинома требует малого коэффициента масштабирования.

Полученные данные выявляют фундаментальное различие в структуре преобразований:

- для линейных и степенных методов характерен значительный отрицательный сдвиг ($m \approx -2,55$). Это свидетельствует о том, что исходное распределение значений ЛПП VQ-f16 смещено в отрицательную область относительно нуля;

- для нелинейных методов (ЛОГ, ГТ, НС) параметр сдвига близок к нулю ($m \approx 0,06$). Это объясняется тем, что данные функции (сигмоида, гиперболический тангенс) конструктивно предназначены для работы с центрированными нормальными распределениями. Значение 0,06 фактически представляет собой эмпирическую оценку математического ожидания μ ЛПП исследуемой модели.

Разработанный математический аппарат и расчетные параметры квантования формируют теоретический базис функционирования кодека. Однако переход от теоретической модели к практической реализации требует верификации эксплуатационных характеристик. Целью данного этапа является установление функциональных связей между параметрами квантования,

информационной энтропией и метриками перцептивного качества восстановленного видеопотока.

Методика эксперимента и формализация метрического базиса.

В качестве эмпирической основы использовался авторский набор данных, содержащий кадры FPV-видеопотока. Из генеральной совокупности в 1800 кадров методом равномерной дискретизации (шаг $k=1,8$) была сформирована выборка $K=1000$ кадров. Перед подачей на вход кодера VQ-f16 изображения подвергались бикубической интерполяции до разрешения 1280×720 и масштабированию до 512×512 пикселей. Для объективизации результатов введен расширенный метрический базис, включающий информационно-теоретические и квалиметрические показатели.

А. Информационная энтропия (H)

Поскольку гипотеза исследования базируется на уменьшении энтропии, ключевой метрикой состояния тензора является энтропия Шеннона. Для квантованного тензора T^* , состоящего из дискретных символов алфавита мощностью N_{uniq} , энтропия вычисляется следующим образом:

$$H(T^*) = - \sum_{i=1}^{N_{uniq}} p(t_i) \cdot \log_2 p(t_i) \quad (3.16)$$

где $p(t_i)$ – вероятность появления i -го уникального значения (уровня квантования) в тензоре. Данная формула обосновывает теоретический предел сжатия без потерь.

Б. Метрики качества восстановления (MSE, SSIM). Для оценки искажений, вносимых цепочкой «кодирование – квантование – декодирование», используются стандартные метрики оценки качества изображений MSE (2.1) и SSIM (2.2).

В. Статистические метрики

Для оценки монотонности зависимости размера бинарной последовательности от сложности данных используется коэффициент ранговой корреляции Спирмена ρ :

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (3.17)$$

где d_i – разность рангов между количеством уникальных значений N_{uniq} и размером сжатой бинарной последовательности для i -го наблюдения. Значение $\rho \rightarrow 1$ подтверждает гипотезу о детерминированной связи энтропии и сжатия.

Вероятность успешного декодирования P характеризует робастность алгоритма. Рассчитывается как доля кадров, успешно восстановленных генеративной сетью декодера без возникновения критических сбоев (выхода значений за пределы области определения функции активации):

$$P = \frac{N_{success}}{K} \times 100\% \quad (3.18)$$

С учетом вышеизложенного, выполнено исследование эффективности алгоритмов энтропийного кодирования (LZMA, Brotli, DEFLATE) и графических форматов сжатия (PNG, WebP) применительно к задаче сжатия квантованных тензоров ЛПП. Анализ экспериментальных данных подтвердил наличие сильной корреляционной связи между мощностью алфавита уникальных значений N_{uniq} и коэффициентом сжатия CR . Диаграмма разброса, визуализирующая характер данной функциональной зависимости, представлена на рисунке 3.15.

Графический анализ позволяет выделить две характерные области пространства состояний кодека.

1. Область линейного квантования ($N_{uniq} \rightarrow 256$): соответствует правой части графика. Высокая энтропия распределения, близкого к равномерному, фундаментально ограничивает эффективность алгоритмов сжатия на уровне $CR \approx 27\%$.

2. Область уменьшения энтропии ($N_{uniq} < 50$): соответствует левой части графика (применение методов *Scale*). Наблюдается гиперболический рост коэффициента сжатия до 75%, что подтверждает определяющую роль предварительной обработки данных в минимизации информационной емкости сигнала.

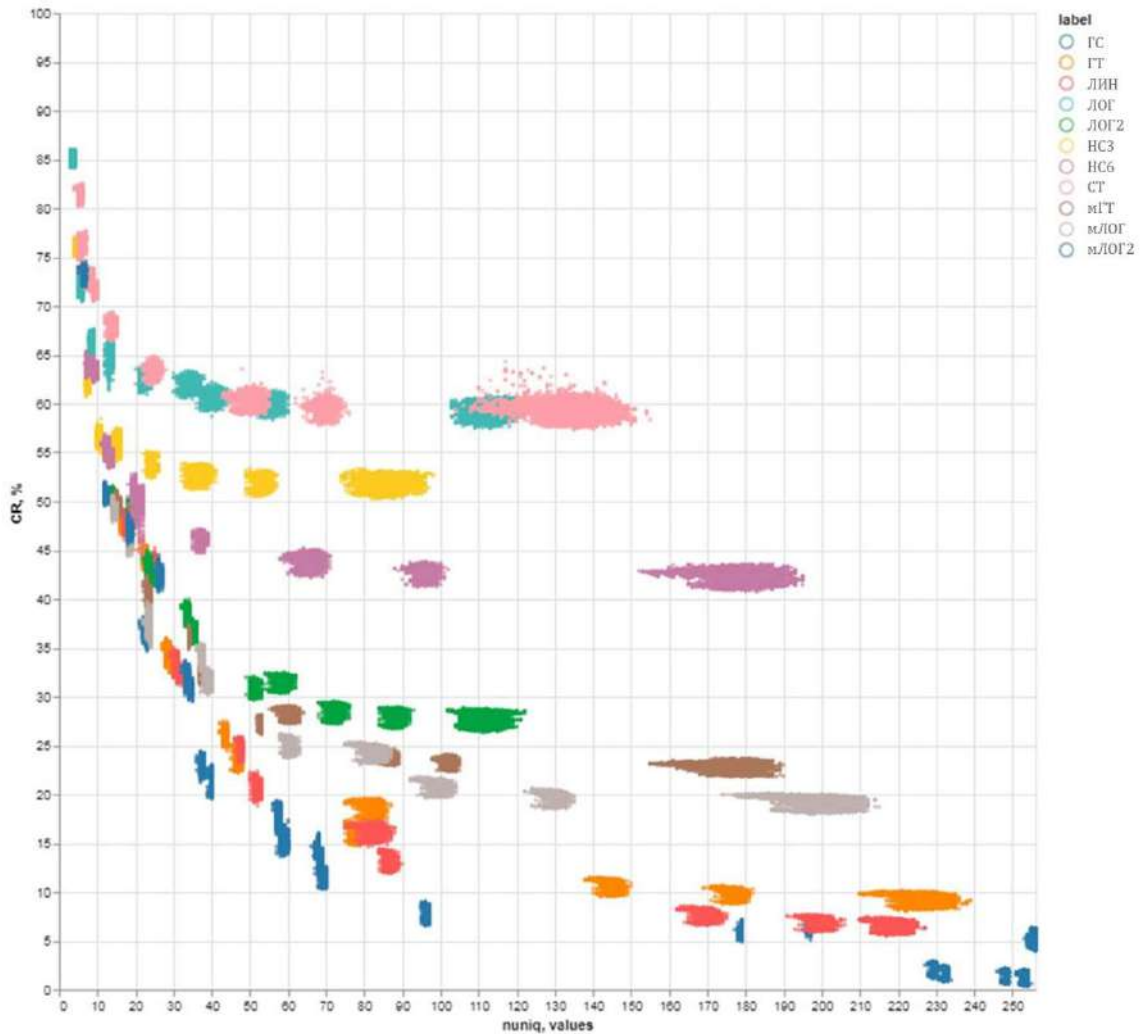


Рисунок 3.15 – Диаграмма разброса зависимости коэффициента сжатия CR от количества уникальных значений N_{uniq} и аппроксимирующие кривые для различных алгоритмов

В таблице 3.7 приведены усредненные ПЭ алгоритмов при обработке тензоров, предварительно квантованных методом гиперболического тангенса (ГТ).

Таблица 3.7 – Параметры эффективности алгоритмов энтропийного кодирования

Алгоритм	Средний CR , %	Корреляция ρ	Удельная емкость α (байт/символ)
LZMA	52,3	0,999	0,51
Brotli	50,2	0,998	0,54
Deflate	48,1	0,995	0,58
WebP	31,6	0,850	0,72
PNG	24,3	0,780	0,85

Более подробные результаты применения алгоритмов сжатия тензоров латентных пространств представлены в работе [435].

Анализ результатов:

1. LZMA продемонстрировал наивысшую эффективность, обеспечивая удельную плотность кодирования $\alpha \approx 0,51$ байт/символ. Высокое значение коэффициента ранговой корреляции Спирмена ($\rho = 0,999$) указывает на строгую детерминированность процесса: алгоритм эффективно использует словарное моделирование и цепи Маркова для сжатия низкоэнтропийных последовательностей.

2. Графические форматы (PNG, WebP): показали неудовлетворительные результаты ($CR < 32\%$). Это объясняется тем, что тензор ЛПП, являясь абстрактным математическим представлением признаков, не обладает свойством локальной пространственной корреляции (градиентной гладкости), на эксплуатацию которой ориентированы дельта-предикторы традиционных графических кодеков.

Для интерпретации физической природы полученных результатов была построена диаграмма разброса степени сжатия CR от N_{uniq} для различных методов предварительного квантования (рис. 3.15). Результаты показывают, что чем меньше уникальных значений ЛПП N_{uniq} , тем выше степень сжатия. Таким образом, применение алгоритмов предварительного квантования обусловлено уменьшением количества уникальных значений (рис. 3.16: примеры для алгоритма предварительного квантования *Scale*).

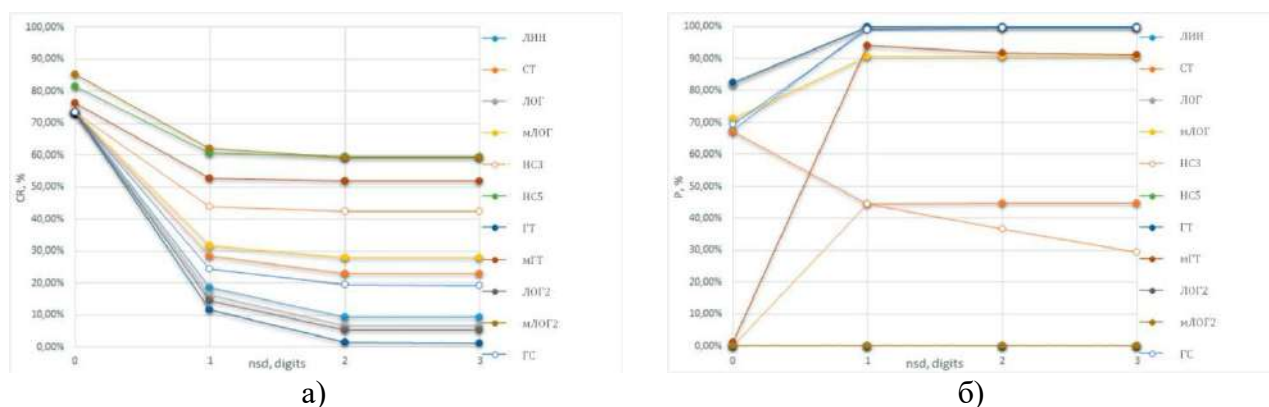


Рисунок 3.16 – Зависимость CR от nsd (а) и P от nsd (б) при алгоритме предварительного квантования *Scale*

Для каналов связи с экстремально низкой пропускной способностью (<50 Кбит/с) исследовалась возможность применения алгоритмов сжатия с потерями (AVIF, HEIC, JPEG XL). Результаты зависимости качества восстановления SSIM от степени сжатия представлены на рисунке 3.17.



Рисунок 3.17 – Зависимость качества реконструкции SSIM от размера сжатого файла для кодека JPEG

Эксперимент выявил значительное преимущество формата AVIF (на базе кодека AV1). Благодаря механизму адаптивного разбиения блоков, данный формат сохраняет индекс структурного подобия $SSIM \approx 0,85$ при размере бинарной последовательности 4 Кбайт/видеокадр ($CR \approx 75\%$), в то время как устаревшие форматы JPEG вносят критические блочные артефакты, неприемлемые для дальнейшей обработки декодером.

Важнейшим научным результатом эксперимента стало выявление границы устойчивости метода. При агрессивном квантовании (*Scale*) или сжатии с потерями (AVIF) в тензор вносятся стохастические возмущения ϵ , которые могут сместить вектор признаков за пределы статистического многообразия (manifold), усвоенного декодером в процессе обучения. Это приводит к критическому сбою генерации. Сводные данные по надежности

представлены в таблице 3.8.

Комплексный анализ полученных эмпирических данных позволяет сформулировать ряд научно обоснованных положений, верифицирующих теоретические модели квантования и определяющих предельные возможности нейросетевого видеокодека.

Таблица 3.8 – Сводные показатели эффективности и надежности конфигураций

Конфигурация	CR, %	P, %	Характеристика устойчивости
ЛИН + LZMA	27,50	100,0	Абсолютная. Детерминированное восстановление гарантирует отсутствие сбоев и целостность потока.
МГТ + LZMA	51,91	91,2	Высокая. Возможны редкие ошибки на асимптотических границах функции $\tanh(x)$.
ГТ+Scale + LZMA	73,32	82,4	Низкая. Потеря 17.6% кадров обусловлена огрублением малых значений при снижении разрядности.
ЛИН + AVIF	76,50	76,5	Критическая. Артефакты сжатия с потерями разрушают семантическую структуру ЛПП.
НС5 / 2ЛОГ	–	0,0	Нулевая. Расходимость итеративных алгоритмов восстановления при наличии ошибок округления.

Завершающим этапом исследования является синтез архитектурного облика нейросетевого видеокодека, обеспечивающего адаптацию системы передачи видеоинформации к стохастическим параметрам КИО фрагмента ГОНСС. На основании эмпирических данных, полученных в ходе экспериментального анализа эффективности квантования и устойчивости декодирования, производится выбор базовой нейросетевой модели. Задача оптимизации в данном контексте сводится к поиску экстремума целевой функции эффективности pre_rank , учитывающего степень сжатия CR и метрики перцептивного качества SSIM и DISTS [436]:

$$a = \frac{CR \times SSIM}{100}, \quad a' = \frac{a - a_{\max}}{a_{\min} - a_{\max}} \quad (3.19)$$

$$b = \frac{CR \times DISTS}{100}, \quad b' = \frac{b - b_{\max}}{b_{\min} - b_{\max}} \quad (3.20)$$

$$pre\_rank = \frac{(a' + b') \times P}{100} \quad (3.21)$$

где P – вероятность удовлетворения требований к перцептивному качеству восстановленного видеопотока (см. главу 6).

Основой разрабатываемого кодека выступает вариационный автокодировщик, параметры ЛПП которого определяют предельные возможности всей системы сжатия. В ходе исследования был проведен сравнительный анализ двух архитектурных семейств моделей из библиотеки Stable Diffusion: моделей с векторным квантованием (VQ) и моделей с регуляризацией на основе дивергенции Кульбака-Лейблера (KL). Результаты сопоставления характеристик, полученные в ходе экспериментов, систематизированы в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Сравнительные характеристики моделей вариационных автокодировщиков

Модель	Размерность тензора $(1, c, h, w)$	Объем «сырых» данных (V_{raw}) , байт	SSIM	DISTS	PSNR, дБ
KL-f4	(1,3,128,128)	49152	0.95	0,06	37.57
KL-f8	(1,4,64,64)	16384	0.90	0,12	32.79
KL-f16	(1,16,32,32)	16384	0.86	0,16	32.40
VQ-f16	(1,8,32,32)	8192	0.84	0,18	31.61

Анализ представленных данных выявляет фундаментальное разделение между качеством восстановления и энтропийной емкостью модели. Архитектуры семейства KL (в частности, KL-f4), благодаря непрерывной природе ЛПП, демонстрируют преимущество в сохранении высокочастотных деталей изображения. Однако платой за высокую точность является избыточная размерность тензора признаков, достигающая 49 Кбайт на кадр. Объем «сырых» данных латентного пространства V_{raw} для тензора размерности $(1, c, h, w)$ при разрядности B бит определяется выражением:

$$V_{raw} = c \cdot h \cdot w \cdot \frac{B}{8} \text{ [байт]} \quad (3.22)$$

Для модели KL-f4 ($c=3$, $h=128$, $w=128$, $B=16$) расчетное значение составляет $V_{KL} = 98304$ байта (в несжатом виде), что в условиях узкополосных каналов создает неприемлемую нагрузку на сеть. В противовес этому, модель VQ-f16, базирующаяся на дискретной кодовой книге (*codebook*), характеризуется минимальным объемом исходного ЛПП (8192 байта).

Несмотря на незначительное снижение метрики $SSIM \approx 0,84$, дискретная топология ЛПП VQ-f16 оказывается значительно более комплементарной алгоритмам словарного сжатия (LZMA), что позволяет минимизировать условную энтропию $H(Z|codebook)$. Исходя из приоритета минимизации трафика для каналов с пропускной способностью менее 100 Кбит/с, выбор модели VQ-f16 в качестве базовой архитектуры является научно обоснованным решением.

Для работы в условиях сверхнизкоскоростных каналов (менее 50 Кбит/с) разработанная архитектура может быть преобразована в видеокодек глубокого сжатия контекста NMCC (*аббр. от англ. Neural Multi-Context Coding*) или НВК_{DMCI}. При этом квантованный тензор T_t рассматривается как разностный сигнал r_t относительно предсказанного нейросетью состояния $\hat{T}_t$:

$$r_t = T_t - \mathcal{F}_\theta(T_{t-1}, T_{t-2}, \dots) \quad (3.23)$$

Применение технологии DMCI (*аббр. от англ. Deep Multi-Context Intra*) позволяет передавать только остаточную энтропию $H(r_t) \ll H(T_t)$, что снижает объем трафика на порядок, обеспечивая теоретическую возможность передачи видео в полосе от 5 Кбит/с. Разработанная архитектура кодека на основе модели DMCI описана далее в разделе 3.1.4.

Подводя итоги, отметим, что в процессе исследования экспериментально обоснована оптимальность архитектуры VQ-f16 (двукратный выигрыш в объеме при $SSIM > 0,8$) и доказана необходимость метода *Scale* для преодоления 50-процентного барьера сжатия за счет уменьшения энтропии $\lim_{N_{uniq} \rightarrow \min} H(T^*)$.

При этом важно отметить, что преимущество VQ моделей проявляется главным образом в задачах генерации статических изображений (четкость границ, отсутствие размытия). Однако, как показали дальнейшие исследования, направленные на сжатие видеопотока, использование VQ в составе комплексного кодека накладывает ограничения на эффективность энтропийного кодирования из-за дискретной природы латентного пространства.

В условиях ограничений пропускной способности канала (битрейта)

модель с KL-регуляризацией (KL-f4) показала более высокую эффективность сжатия за счет более плотного распределения латентных признаков, что достаточно важно для работы модуля энтропийного кодирования. Поэтому, несмотря на визуальные преимущества VQ на отдельных кадрах, для финальной конфигурации видеокодека, представляется целесообразным выбрать архитектуру на основе KL-f4, являющуюся наиболее сбалансированной по критерию «качество/степень сжатия».

В результате исследований [390, 391] получены конфигурации нейросетевого видеокодека. Данные конфигурации получены следующим образом (табл. 3.10):

1. отобраны лучшие сочетания алгоритмов сжатия, квантования и модели кодирования по критерию соотношения степени сжатия ЛПП и перцептивного качества восстановленных кадров видеопотока;
2. для каждого размера сжатого ЛПП отобран метод по лучшему значению соотношения степени сжатия ЛПП и перцептивного качества восстановленных кадров видеопотока.

Таблица 3.10 – Конфигурации нейросетевого видеокодека

№ п/п	Модель VAE	Сжатие ЛПП	qual.	Алгоритм квантования	SSIM _{ср}	DISTS _{ср}	PSNR _{ср} , дБ	Кбит/с
1	KL-f4	JPEG XR	55	ЛИН scale 1	0,84	0,177	30,20	223
2	KL-f4	JPEG XR	60	ЛИН scale 1	0,85	0,167	30,29	293
3	KL-f4	JPEG XR	65	ЛИН scale 1	0,86	0,158	30,54	386
4	KL-f4	JPEG XR	70	ЛИН scale 1	0,86	0,156	30,59	490
5	KL-f4	JPEG XR	75	ЛИН scale 1	0,87	0,147	30,80	612
6	KL-f4	JPEG XR	80	ЛИН scale 1	0,88	0,137	31,03	780
7	KL-f4	JPEG XR	85	ЛИН scale 1	0,90	0,117	31,46	1219
8	KL-f16	AVIF	75	ЛИН scale 1	0,87	0,151	31,93	1505
9	KL-f16	AVIF	80	ЛИН	0,87	0,147	32,13	1639
10	KL-f16	JPEG XR	70	ЛИН	0,87	0,143	32,21	1665
11	KL-f16	JPEG XR	70	CT scale 1	0,87	0,142	32,38	1790
12	KL-f16	JPEG XR	75	CT scale 1	0,87	0,140	32,51	1896

3.1.3 Маскированный видеокодек

Ключевым недостатком VAE-методов является длительное время выполнения, что снижает интенсивность видеопотока на стороне оператора.

Для компенсации этого недостатка может быть рассмотрен подход маскирования данных ЛПП на стороне кодера БПЛА для дальнейшего увеличения степени сжатия и последующее их восстановление на ТО. Более подробно исследование маскированного видеокодека описано в [434, 439].

Разработанный в рамках данного исследования подход к сжатию видеопотока взаимодействия оператора и беспилотной системы основан на методологии маскирования данных непосредственно в латентном пространстве признаков. Этот подход принципиально отличается от стандартных маскирующих автокодировщиков (MAE), которые, как правило, базируются на архитектурах типа "Трансформер" (например, ViT или BERT). Такие архитектуры, хотя и показывают высокую эффективность в задачах восстановления, требуют значительных вычислительных ресурсов и вносят недопустимо высокую задержку, что делает их непригодными для использования в задаче взаимодействия оператора и беспилотной системы в реальном времени.

Предложенный метод проектировался с учетом трех жестких ограничений систем взаимодействия оператора и беспилотной системы от первого лица:

1. Высокая скорость выполнения: модели восстановления должны быть «легковесными».
2. Детерминированная синхронизация: декодер (на ТО) должен однозначно восстанавливать позиции маскированных значений без получения дополнительной служебной информации (карты маски) от кодера (на БПЛА).
3. Неизменность немаскируемых значений: В процессе восстановления не должны изменяться значения, которые не были маскированы.

Для решения задачи синхронизации был разработан детерминированный алгоритм вычисления индексов маскирования (*mindex*), который обеспечивает идентичную генерацию маски на сторонах кодера и декодера. Алгоритм использует два входных параметра: *len* (общая длина бинарной

последовательности ЛПП) и p (степень маски, или доля маскируемых значений) [434].

В результате применения данного алгоритма, исходная последовательность bin (длиной len) разделяется на две составляющие:

– немаскированная последовательность bin^* (предназначенная для передачи по каналу связи) длиной $dest_l$:

$$dest_l = \lfloor len \times (1 - p) \rfloor \quad (3.24)$$

– маскированная (удаленная) последовательность $mask^*$ (которую необходимо восстановить) длиной $dest_m$:

$$dest_m = \lfloor len \times p \rfloor \quad (3.25)$$

На стороне декодера, после получения bin^* и предсказания $\widehat{mask^*}$, запускается обратный алгоритм сборки, который восстанавливает полную последовательность $\widehat{bin}$, корректно размещая немаскированные и восстановленные значения на их исходных позициях [434].

Для реализации функции восстановления было предложено и исследовано пять «легковесных» моделей.

Регрессионные модели (ЛГРПМ и ЛНРПМ). Обе регрессионные модели основаны на общем принципе: предсказание каждого i -го маскированного значения $mask_i^*$ происходит на основе $bandwidth$ (пропускной способности) — некоторого количества j соседних немаскированных значений bin_i^* . Границы этого «окна» (lwr_i и upr_i) для каждого i рассчитываются согласно алгоритму, представленному в [434].

– ЛГРПМ (логистическая регрессионная модель): так как стандартная логистическая регрессия возвращает значения в интервале $[0; 1]$, а значения bin представлены типом `uint8`, была применена модифицированная функция:

$$mask_i^* = \frac{255}{1 + e^{-z_i}}, \quad (3.26)$$

где z_i является линейной комбинацией $\beta_0 + \sum \beta_j bin_j^*$. Обучение такой модели проводилось нелинейным методом наименьших квадратов, а не методом максимального правдоподобия.

– ЛНРПМ (линейная регрессионная модель): данная модель использует стандартную линейную регрессию для предсказания промежуточного значения $pre\_mask_i^*$:

$$pre\_mask_i^* = k_0 + \sum_{j=lwr_i}^{upr_i} k_j \times bin_j^* \quad (3.27)$$

Так как $pre\_mask_i^*$ может выходить за требуемый интервал $[0;255]$, результат «отсекается»:

$$mask_i^* = \begin{cases} 0 & \text{если } pre\_mask_i^* < 0 \\ pre\_mask_i^* & \text{если } 0 \leq pre\_mask_i^* \leq 255 \\ 255 & \text{если } pre\_mask_i^* > 255 \end{cases} \quad (3.28)$$

Коэффициенты K для этой модели находятся аналитически через линейный метод наименьших квадратов в матричной форме:

$$K = (BN_D^T \times BN_D^*)^{-1} \times BN_D^{*T} \times PMSK_D^* \quad (3.29)$$

Нейросетевые модели

Было исследовано 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 (len), игнорируя требование о неизменности немаскируемых значений (рис. 3.18);

– НСВБП (нейронная сеть восстановления): наиболее сложная из предложенных моделей, использующая 1D-свёрточные слои (Conv1d) для анализа bin^* и 1D-транспонированные свёрточные слои (ConvTranspose1d) для генерации $\widehat{mask}^*$. Размерности слоев рассчитываются автоматически. Структура модели описана в главе 5.

Размерность выхода 1D-свёртки (при $padding=0$, $dilation=1$, $stride=1$):

$$L_{out} = \lfloor L_{in} - kernel\_size + 1 \rfloor \quad (3.30)$$

Размерность выхода 1D-транспонированной свёртки (при $padding=0$, $dilation=1$):

$$L_{out} = (L_{in} - 1) \times stride + (kernel\_size - 1) + output\_padding + 1 \quad (3.31)$$

В ходе исследования было выявлено, что исходная архитектура НСВБП

имела фундаментальное ограничение. Корректность вычисления промежуточных размерностей тензоров, например $len5$, требовала, чтобы $dest_m$ удовлетворяло условию:

$$\frac{dest_m - 24}{8} \in \mathbb{N} \quad (3.32)$$

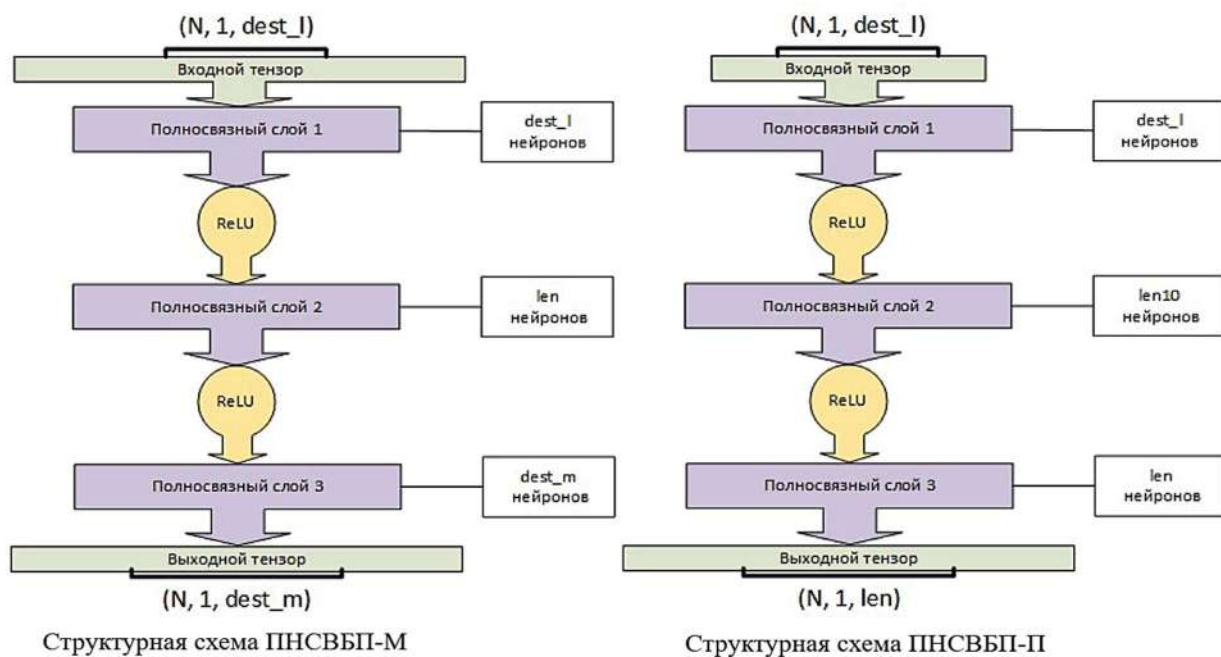


Рисунок 3.18 – Структурные схемы полносвязных нейронных сетей

В ходе исследования было выявлено, что исходная архитектура НСВБП имела фундаментальное ограничение. Корректность вычисления промежуточных размерностей тензоров, например $len5$, требовала, чтобы $dest_m$ удовлетворяло условию:

$$\frac{dest_m - 24}{8} \in \mathbb{N} \quad (3.33)$$

Это условие не выполнялось для $p=0,05$ ($dest_m=820$), что делало исходную модель неприменимой. В связи с этим, архитектура НСВБП была уточнена – в нее был добавлен дополнительный полносвязный слой 3, который снимает жесткие ограничения на размерность $dest_m$ и обеспечивает корректную работу модели при любых p и len .

Для экспериментальной оценки эффективности предложенных моделей и всей архитектуры кодека была разработана и применена единая методика. Обучение моделей проводилось на большом наборе данных, состоящем из

66500 кадров, преобразованных в бинарные последовательности ЛПП (длиной $len=16384$) с использованием VAE KL-f16. Обучение нейросетевых моделей (НСВБП, ПНСВБП-М, ПНСВБП-П) проводилось на GPU Nvidia A100 80Gb с использованием оптимизатора *Adam*. В качестве функции потерь использовалась среднеквадратическая ошибка (RMSE), так как стандартная метрика MSE имела крайне низкие, нерепрезентативные значения.

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (3.34)$$

Критерием остановки обучения являлось увеличение $RMSE_{\text{тест}}$ на протяжении двух эпох подряд, что позволяло избежать переобучения. Пример графика обучения и точки остановки для модели НСВБП приведен на рисунке 3.19.

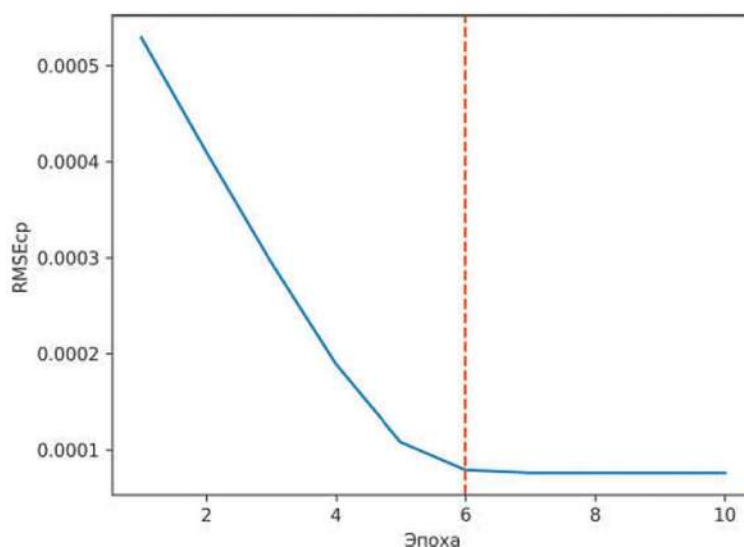


Рисунок 3.19 – Обоснование количества эпох обучения на примере НСВБП с $p=0,05$

Финальное тестирование и оценка производительности проводились на малом наборе данных (1000 кадров). В ходе 133 экспериментов (по числу вариаций моделей и степеней маски $p \in \{0,05; \dots; 0,95\}$) измерялись ключевые результирующие признаки: перцептивное качество восстановления кадра (DISTS, SSIM, PSNR), время выполнения t_m (маскирование) и t_{dm} (демаскирование), а также *black_rate* – процент кадров, которые не удалось

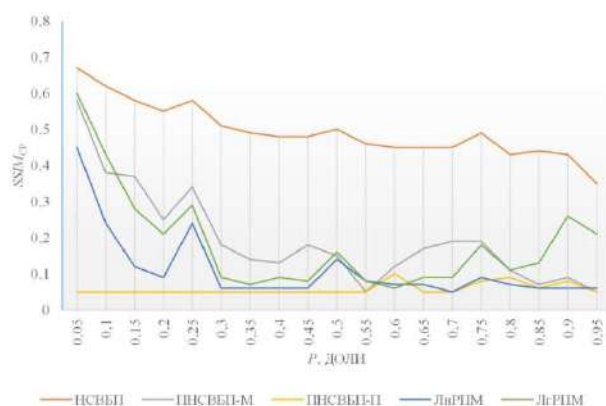
декодировать.

Анализ экспериментальных результатов

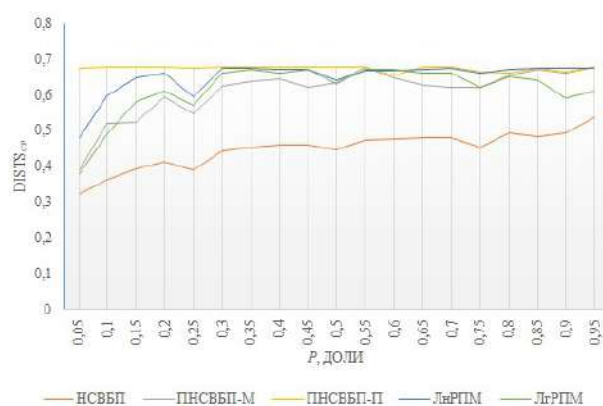
Экспериментальный анализ предложенных моделей проводился по двум ключевым направлениям: оценка качества восстановления (как количественная, так и качественная) и оценка производительности (временные задержки), необходимой для работы в реальном времени.

Анализ перцептивного качества восстановления

Для количественной оценки перцептивного качества восстановленных кадров использовались метрики DISTS, SSIM и PSNR (дополнительно). На графике зависимости SSIM от степени маски p (рис. 3.20а) видно, что модели ПНСВБП-П и ЛНРПМ показывают неприемлемо низкое качество ($SSIM \approx 0,05$). Их показатели практически не меняются с ростом p , что говорит о полной неспособности восстановить структуру изображения. Модель НСВБП, напротив, демонстрирует значительно более высокое качество, плавно деградирующее с ростом p .



а) $SSIM_{ср}$



б) $DISTS_{ср}$

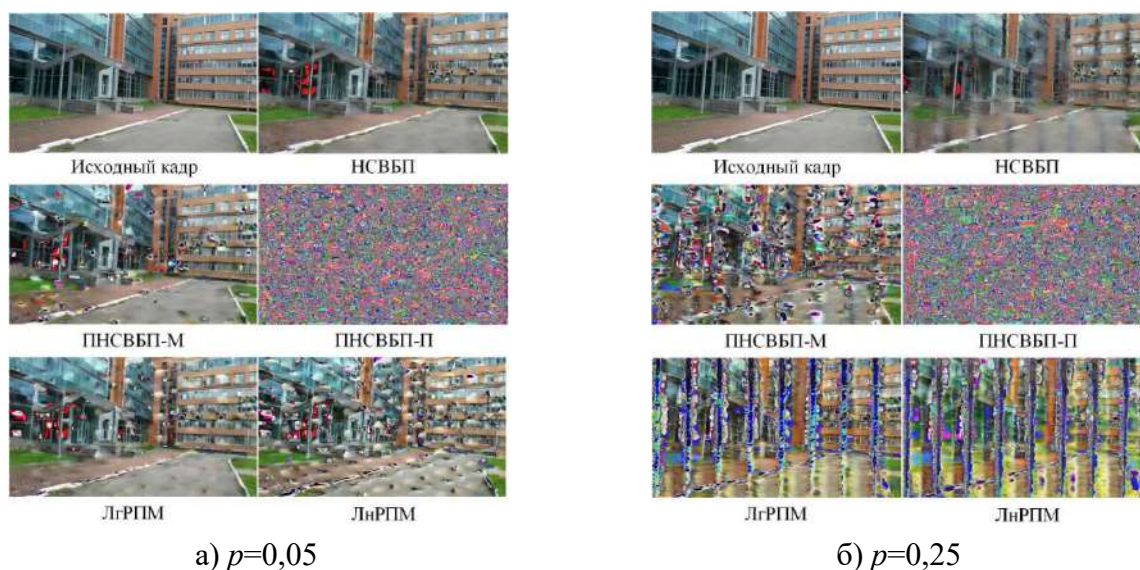
Рисунок 3.20 – Зависимость метрик качества от p

Аналогичную картину демонстрирует график DISTS (рис. 3.30б). Метрики ПНСВБП-П и ЛНРПМ находятся на стабильно высоком уровне ($\approx 0,5-0,6$), в то время как НСВБП показывает наилучший результат во всем диапазоне p , начиная с 0,32 при $p=0,05$ и увеличиваясь до 0,39 при $p=0,25$.

Эти количественные данные полностью подтверждаются качественным визуальным анализом. На рисунке 3.21а представлены примеры

восстановленных кадров при минимальной степени маски $p=0,05$. Уже здесь видно, что ПНСВБП-П и ЛНРПМ генерируют преимущественно «шум», в то время как НСВБП успешно восстанавливает кадр с незначительными артефактами.

С увеличением степени маски до $p=0,25$ (рис. 3.21б) деградация НСВБП становится более заметной, но структура изображения все еще сохраняется.



а) $p=0,05$ б) $p=0,25$
Рисунок 3.21 – Пример восстановленных кадров видеопотока при маскировании ЛПП

При $p=0,50$ (рис. 3.22) НСВБП все еще способна восстановить основные контуры кадра, в то время как остальные пригодные модели (ПНСВБП-М и ЛГРПМ) уже показывают результат, близкий к «шуму».

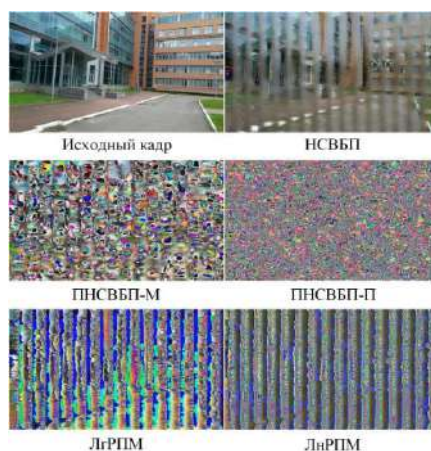


Рисунок 3.22 – Пример восстановленных кадров видеопотока при маскировании ЛПП при $p=0,5$

Важным положительным итогом является то, что *black_rate* (процент

«чёрных кадров» или фатальных сбоев декодера) для всех моделей равнялся нулю, что говорит о робастности VAE-декодера к искаженным данным ЛПП.

Анализ производительности (время t_m и t_{dm})

Ключевым требованием кодека является поддержание времени обработки t_C (кодер) и t_D (декодер) в заданных пределах $FPS_{\text{треб}}$, что выражается условием:

$$\max(t_C, t_D) \leq \frac{1}{FPS_{\text{треб}}} \quad (3.35)$$

Анализ времени маскирования (t_m , рис. 3.23) показал, что регрессионные модели на CPU незначительно быстрее (1,25 мс $\rightarrow$ 0,125 мс), чем нейросетевые на GPU (2 мс $\rightarrow$ 0,25 мс).

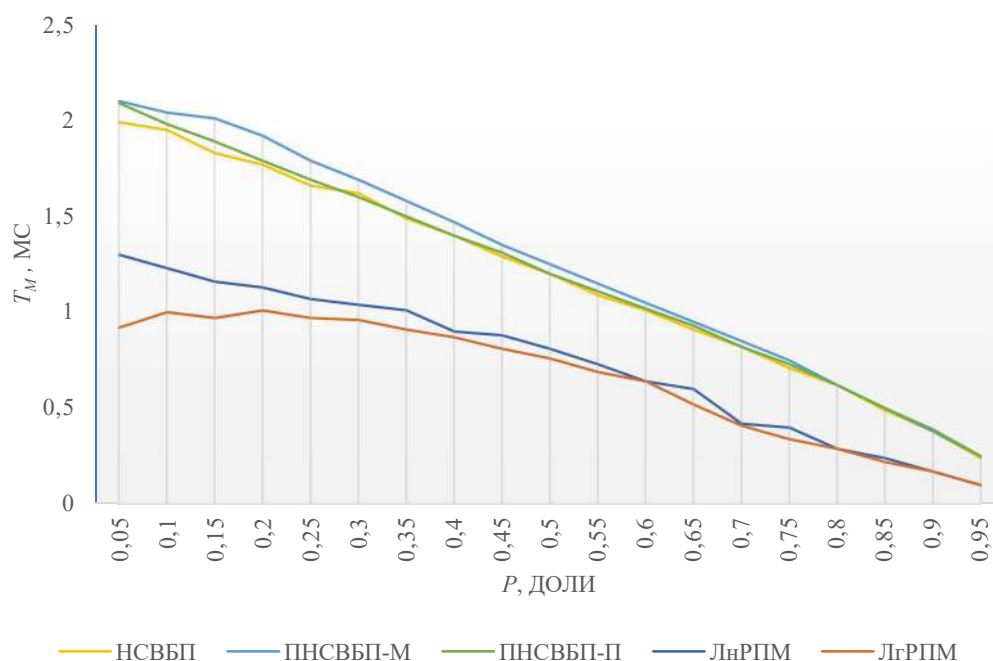


Рисунок 3.23 – Зависимость времени маскирования t_m от p для моделей маскирования ЛПП

Однако анализ времени демаскирования (t_{dm} рис. 3.24) выявил решающую тенденцию. Регрессионные модели (ЛГРПМ, ЛНРПМ) на CPU продемонстрировали катастрофическую деградацию производительности: их время t_{dm} линейно возрастало с p , достигая 33 мс (ЛГРПМ) и 23 мс (ЛНРПМ) при $p=0,95$. Напротив, нейросетевые модели (НСВБП, ПНСВБП-М) на GPU A100 показали стабильно низкое время демаскирования ≈ 3 мс вне зависимости от p .

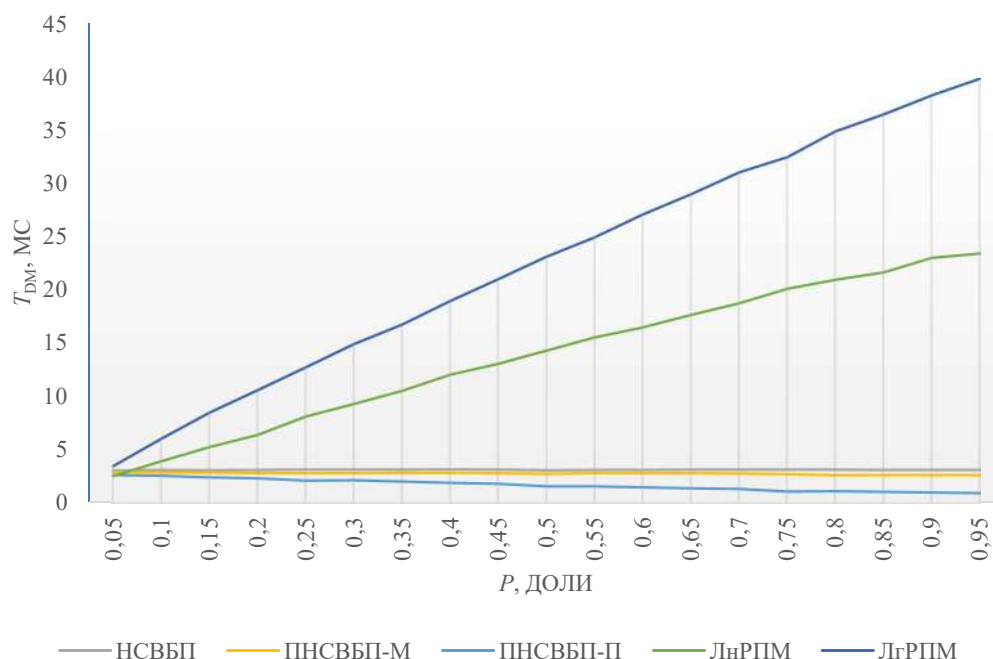


Рисунок 3.24 – Зависимость времени демаскирования t_{dm} от p для моделей маскирования ЛПП

Этот результат делает регрессионные модели непригодными для использования в составе нейросетевого видеокодека, поскольку они вносят недопустимо высокую задержку на стороне декодера (до 33 мс), что не отвечает требованиям систем реального времени.

Выводы по маскирующему кодеку

Совокупный анализ качества и производительности выявил, что НСВБП является единственной жизнеспособной моделью для реализации маскирующего кодека. Суммарное время ($t_m + t_{dm}$) для наилучшей по перцептивному качеству модели НСВБП (на GPU Nvidia A100) стабильно находится в диапазоне от 2,25 мс до 5 мс. Это полностью удовлетворяет требованиям систем реального времени, обеспечивая потенциальную частоту кадров более 200 FPS и отвечая требованию $\max(t_c, t_D) \leq \frac{1}{FPS_{\text{треб}}}$. Несмотря на техническую реализуемость, практическое применение маскирования сопряжено со значительным снижением качества. Результаты показывают, что использование НСВБП целесообразно в двух сценариях:

- при $p=0,05$: в случае использования дополнительного сжатия ЛПП с

незначительными потерями;

- при $p=0,25$: в случае отсутствия дополнительного сжатия и при низких требованиях к качеству восстанавливаемых кадров.

3.1.4. Нейросетевой видеокодек сжатия контекста

Ещё одной разработанной архитектурой нейросетевых видеокодеков является НВК_{DMCI} – нейросетевой видеокодек глубокого сжатия контекста. Данная архитектура основывается на модели DMCI, которая также применяется в нейросетевом видеокодеке DCVC-RT (*от англ. Deep contextual video compression in real time* – глубокое контекстное сжатие видео в реальном времени) [440] (рис. 3.25).

Нейросетевой видеокодек DCVC-RT имеет два режима работы: пок кадрового сжатия (только I-кадры) и межкадрового предсказания (I-кадры и P-кадры). Недостатком DCVC-RT является чувствительность к потерям. При возникновении потерь кадров видеопотока возможна потеря I-кадров, что в свою очередь приводит к «чёрному экрану». В составе разработанного НВК_{DMCI} данная проблема отсутствует.

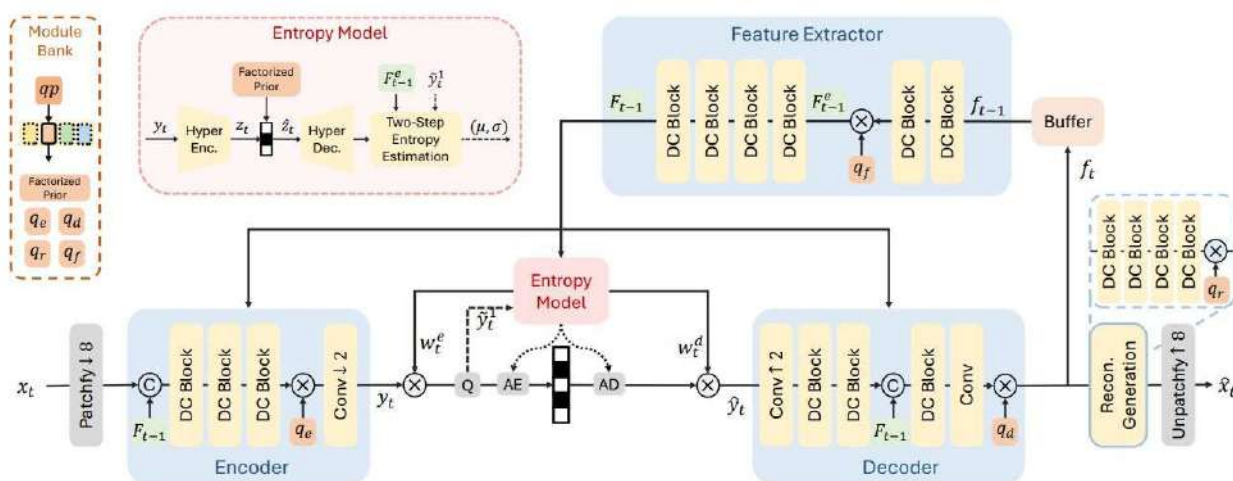
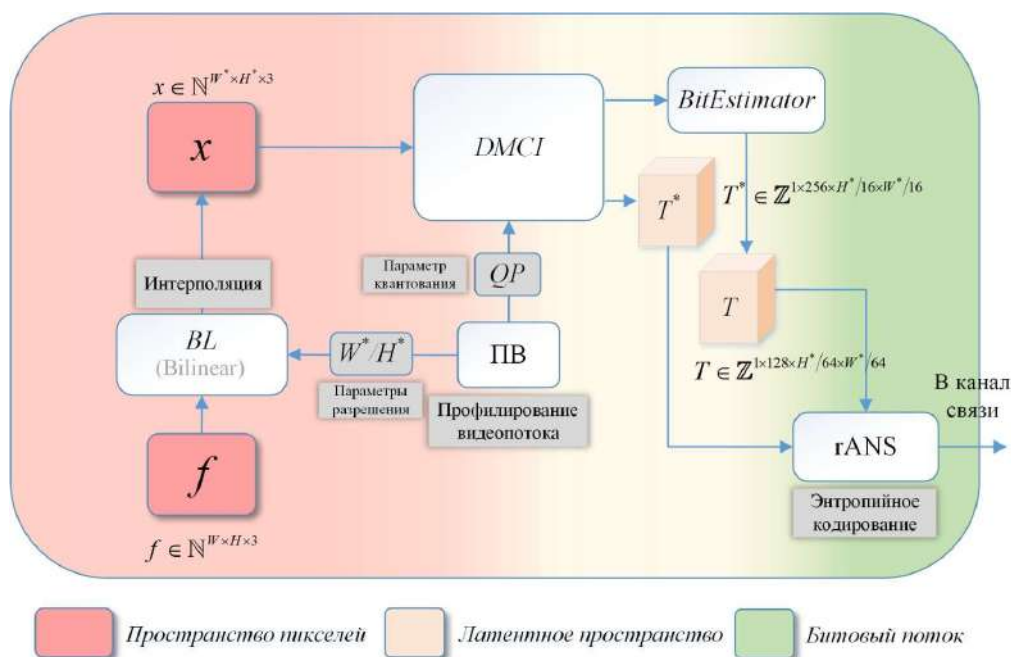


Рисунок 3.25 – Модель DCVC-RT

Кодер НВК_{DMCI} состоит из блоков: интерполяции, нейросетевого кодирования (DMCI) с квантованием, энтропийного кодирования (рис. 3.26).

Рисунок 3.26 – Кодер НВК_{DMCI}

- *(Первый) блок интерполяции.* Во время инициализации НВК_{DMCI} выполняется построение матрицы разрешений, которые допустимо подавать на вход модели. Высота и ширина должны быть кратными 64. Когда кадр видеопотока f поступает на вход НВК_{DMCI}, он передаётся на вход (первого) блока интерполяции. Интерполяция проводится либо до любого, либо до наименьшего ближайшего разрешения. Разрешение может динамически изменяться при изменении полосы пропускания в канале связи. Этим управляет блок профилирования видеопотока.

- Блок нейросетевого кодирования DMCI. На данный блок поступает интерполированный кадр видеопотока x . После этого x кодируется с использованием нейросетевой модели DMCI с применением гиперраспределения. Гиперраспределение представляет собой распределение параметров распределения [441, 442].

Если внутреннее латентное пространство признаков выражается как T , параметры гиперраспределения как z , параметры модели гипердекодирования как θ_{hd} , параметры контекстной модели как θ_{cm} , а параметры энтропийного кодирования как θ_{ec} , то в рамках данной модели они распределены как [443]:

$$p_T(T | z, \theta_{hd}, \theta_{cm}, \theta_{ec}) = \prod_i \left(N(\mu_i, \sigma_i^2) * U\left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) \right)(T) \quad (3.36)$$

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

Таким образом, энтропийная модель соответствует [443]:

$$R + \lambda \times D = E_{x \sim p_x} [-\log_2(p_T T)] + E_{x \sim p_x} [-\log_2(p_z z)] + \lambda \times E_{x \sim p_x} \|x - \hat{x}\|_2^2 \quad (3.37)$$

Процесс кодирования упрощённо изображен на рисунке 3.27.

1. *Сверточная сеть*. Начальный этап представляет собой многоуровневую систему преобразований, предназначенную для выделения ключевых характеристик изображения. Основная идея заключается в последовательном преобразовании кадра во внутреннее представление, где пространственная структура постепенно заменяется компактными числовыми коэффициентами ЛПП. Часть пространственной детализации переносится в каналы признаков, после чего выполняется серия свёрточных преобразований. Эти блоки уплотняют информационный сигнал и устраняют избыточность. На одном из этапов масштаб ЛПП корректируется параметром квантования (QP), что задаёт внутренний баланс между степенью сжатия и сохранением деталей.

В результате формируется компактное представление, содержащее основные признаки изображения в числовом виде. Оно служит исходным материалом для последующего статистического описания и энтропийного

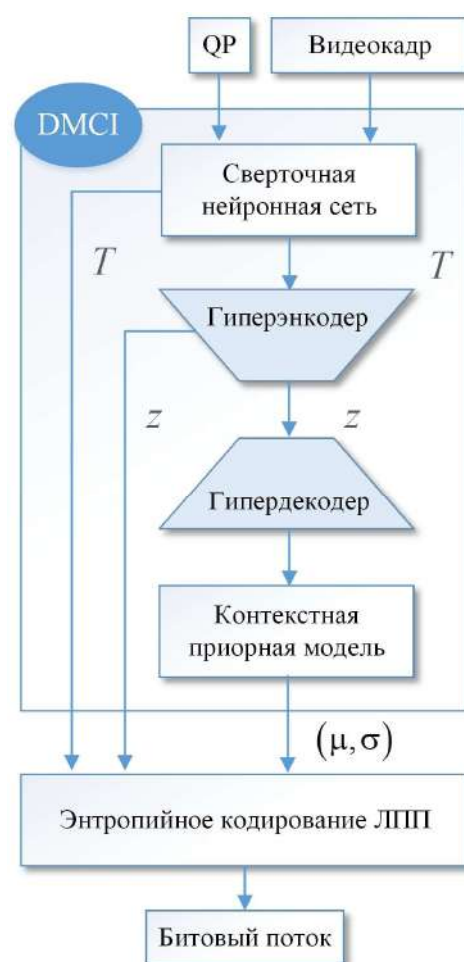


Рисунок 3.27 – Упрощённая схема работы нейросетевого кодера

кодирования.

2. *Гиперэнкодер*. Этот блок представляет собой сеть, извлекающую статистические признаки из ЛПП. Полученные данные переводятся в целочисленный формат для записи в поток и одновременно используются для вычисления параметров распределений, необходимых при энтропийном кодировании. Статистика параметров гиперэнкодера постоянна и не требует повторных вычислений.

3. *Гипердекодер*. Блок представляет собой сеть, вычисляющую грубое статистическое описание – вспомогательное латентное представление, отражающее закономерности и распределения величин внутри ЛПП. Данный блок передает «подсказки» о структуре данных текущего кадра для более точной работы контекстной приорной модели.

4. *Контекстная приорная модель*. Данный блок, используя грубые оценки статистики ЛПП, восстанавливает локальные параметры вероятностных моделей, обеспечивающие адаптацию к структуре конкретного кадра. Иными словами данная модель анализирует уже переданные кадры и контекст, чтобы предсказать распределение вероятностей ЛПП текущего кадра для этапа энтропийного кодирования. Для более быстрой работы без пересчета сложных распределений модель использует набор готовых распределений для разных уровней качества (QP). Для компенсации движения признаки текущего кадра «подмешиваются» к высокоуровневым признакам в скрытом состоянии из памяти (предыдущие кадры) через специальные сверточные блоки. При этом не используются явные вектора движения (как в стандартных видеокодеках), а осуществляется переход к условному предсказанию признаков.

- *Блок квантования*. В данном блоке значения тензора ЛПП T , который поступает на данный блок с блока нейросетевого кодирования, квантуются. Процесс квантования описывается как [441]:

$$I = QS \times \left[\frac{I}{QS} \right], \quad (3.38)$$

где I – значение параметра; $\hat{I}$ – квантованное значение параметра; QS – шаг квантования, $[]$ – операция округления.

В *DMCI* используются два параметра квантования: глобальный s_t^{enc} и локальный (в зависимости от части кадра видеопотока) w_t^{enc} . Входной параметр квантования – $q_t \in [0; q_{num}-1]$, где q_{num} – это настраиваемое значение, показывающее количество допустимых значений параметра q_t и по умолчанию равно 64. Если его значение увеличивается, глобальный параметр квантования возрастает экспоненциально:

$$s_t^{enc} = s_{min}^{enc} \times \left(\frac{s_{max}^{enc}}{s_{min}^{enc}} \right)^{\frac{q_t}{q_{num}-1}}, \quad (3.39)$$

где s_{max}^{enc} и s_{min}^{enc} – максимальное и минимальное значения глобального шага квантования s_t^{enc} , соответственно.

Чтобы увеличить стабильность вычисления, вместо (3.39) используется другая форма:

$$s_t^{enc} = \exp \left(s_{min}^{enc} + \frac{q_t}{q_{num}-1} \times (\ln s_{max}^{enc} - \ln s_{min}^{enc}) \right), \quad (3.40)$$

Параметр квантования влияет на функцию потерь *DMCI*, которая применяется для обучения данной модели:

$$Loss_{RD} = R + \lambda \times D, \quad (3.41)$$

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

$$\lambda = \exp \left(\ln \lambda_{min} + \frac{q_t}{q_{num}-1} \times (\ln \lambda_{max} - \ln \lambda_{min}) \right), \quad (3.42)$$

где λ_{min} и λ_{max} – это минимальное и максимальное значения параметра λ соответственно. По умолчанию данные значения равны 1 и 768.

- *Блок профилирования видеопотока.* Значение параметра q_t в

NBK_{DMCI} определяется автоматически в зависимости от требования к полосе пропускания $bandwidth_{req}$. Пусть для реальной полосы пропускания $bandwidth_{real}$ не выполняется условие

$$0,7 \times bandwidth_{req} < bandwidth_{real} < 1,3 \times bandwidth_{req}. \quad (3.43)$$

Тогда новое значение q_i и разрешение для интерполяции выбираются с использованием ML модели «случайного леса». Эта модель позволяет подбирать такие q_i и разрешение, чтобы при соблюдении условия (3.44) перцептивное качество восстановленного видеопотока (по метрикам DISTS и SSIM) было максимально возможным.

- *Блок оценки распределения гиперлатента (BitEstimator).* В данный блок поступает квантованный гиперлатент T , формируемый гиперэнкодером (рис. 3.40). Блок *BitEstimator* реализует параметризованную энтропийную модель, предназначенную для аппроксимации дискретного распределения значений 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, что обеспечивает корректное и синхронизированное энтропийное кодирование побочной информации, необходимой для восстановления ЛПП.

- *Блок энтропийного кодирования.* На данный блок поступают квантованный тензор видеопотока T^* , а также вспомогательный квантованный тензор T , формирующий побочную информацию для энтропийного кодирования. Внутри блока осуществляется преобразование T^* в сжатую бинарную последовательность bin с использованием статистической информации, извлекаемой из тензора T . Кодирование тензора T выполняется отдельно с применением параметризованной энтропийной модели, после чего он также включается в итоговый бинарный поток.

Энтропийное кодирование реализуется тремя взаимосвязанными

компонентами.

1. PMF (*аббр. от англ. Probability Mass Function*, плотность вероятности) – дискретное распределение вероятностей, описывающее, с какой частотой каждое квантизованное значение ЛПП может встретиться. Параметры распределения (средние и масштабы), вычисленные priorной моделью, определяют форму PMF и задают вероятностную структуру данных. Эти распределения отражают локальные особенности изображения и контекст соседних областей.

2. CDF (*аббр. от англ. Cumulative Distribution Function*, кумулятивная функция распределения) – кумулятивная форма PMF, где каждая позиция хранит сумму всех предыдущих вероятностей. В реализации она представлена в виде целочисленной таблицы фиксированной длины, что позволяет эффективно преобразовывать вероятности в диапазоны без операций с плавающей запятой. Такая форма особенно удобна для быстрого обращения при кодировании и декодировании.

3. rANS (*аббр. от англ. Range Asymmetric Numeral System*, интервальная асимметричная система счисления) [444] – современный метод энтропийного кодирования, функционально эквивалентный арифметическому кодеру, но более производительный и компактный. Он 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.

Алгоритмы энтропийного кодирования семейства ANS работают следующим образом [444]. Пусть имеем двоичную систему счисления. При добавлении к некоторому числу bn нового бита новое число становится равным:

$$bn' = 2 \times bn + s. \quad (3.45)$$

Рассмотрим кодирование на основе асимметричных систем счисления

(ANS). При добавлении новой цифры s с вероятностью появления p_s к некоторому числу bn становится равным:

$$bn' = bn \times 1/p_s. \quad (3.46)$$

В позиционных системах счисления для всякой s предполагается равное p_s . Следовательно, ANS представляет обобщение позиционных систем счисления.

Пусть даны алфавит $A = \{0, \dots, k-1\}$ и вероятностное распределение $\{p_s\}_{s \in A}$, и выполняется условие $\sum_s p(s) = 1$.

Информацию о последовательности символов, переданной до настоящего момента, содержит sn . Определяются две функции: энтропийное кодирование EC и декодирование ED :

$$D(sn) = (s, sn). \quad (3.47)$$

причём

$$C(D(sn')) = sn'. \quad (3.48)$$

$$sn' \approx sn/p_s. \quad (3.49)$$

Алгоритм энтропийного кодирования $rANS$ является разновидностью ANS. Особенностью данного алгоритма является помещение символов в интервалы. Пусть вероятностное распределение алфавита символов – это натуральная дробь $(l_0, l_1, \dots, l_{n-1})/m$, для которой выполняются условия:

$$l_s \in \mathbb{N}, m = \sum_s l_s. \quad (3.50)$$

Тогда пусть $s(x)$ – это символ на некоторой позиции $sn \in [0, \dots, m-1]$ в циклическом распределении символов $(00\dots 011\dots 1)$ длины n , где символ s появляется l_s раз. Тогда

$$\begin{cases} \bar{s}(x) = s(\text{mod}(sn; m)) \\ s(x) = \min \left\{ s : x < \sum_{i=0}^s l_i \right\} \end{cases}. \quad (3.51)$$

а начальная позиция символа s в цикле равна

$$b_s = \sum_{i=0}^{s-1} l_i. \quad (3.52)$$

Тогда кодирование и декодирование проводятся в соответствии с выражениями [444]:

$$C(s, sn) = m \left\lfloor \frac{sn}{l_s} \right\rfloor + b_s + \text{mod}(sn, m). \quad (3.53)$$

$$\begin{cases} D(sn) = \left(s; l_s \left\lfloor \frac{sn}{m} \right\rfloor + \text{mod}(sn, m) - b_s \right) \\ s = s(\text{mod}(sn, m)) \end{cases} \quad (3.54)$$

Декодер НВК_{DMCI} состоит из следующих функциональных блоков: энтропийного декодирования, восстановления квантованных латентных представлений, нейросетевого декодирования и блока интерполяции (рис. 3.28).

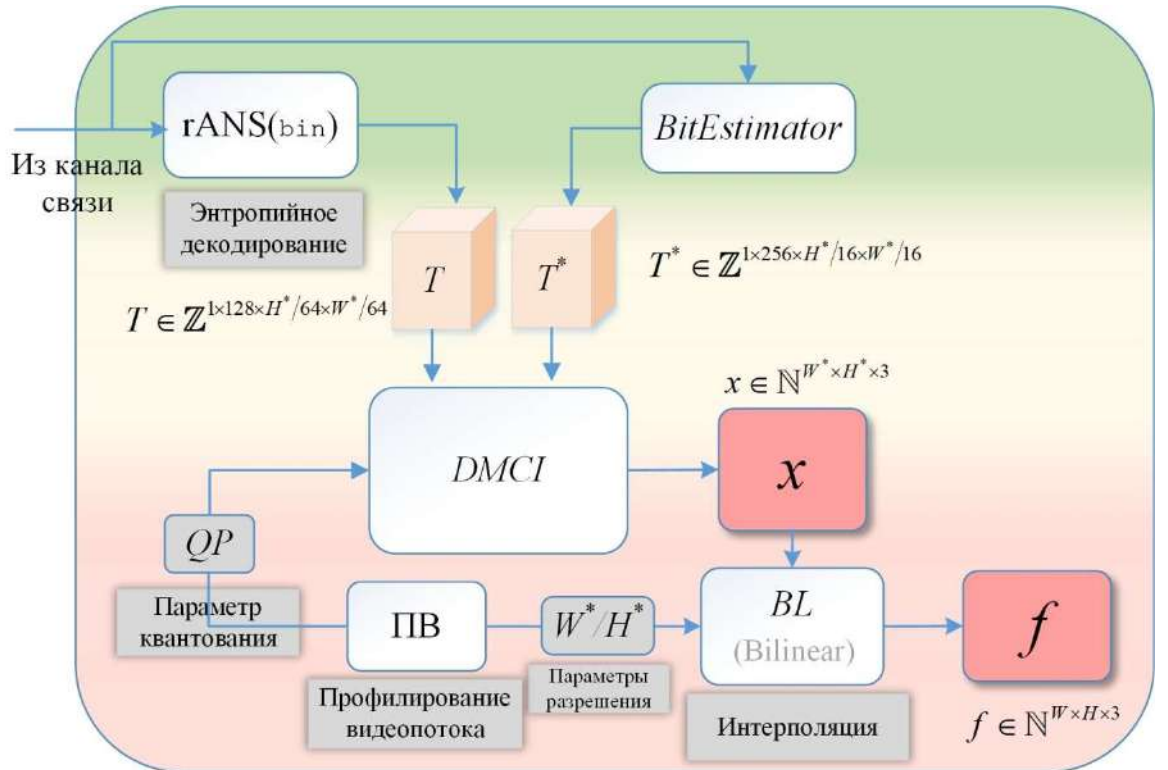


Рисунок 3.28 – Декодер НВК_{DMCI}

- *Блок энтропийного декодирования.* На вход данного блока поступает сжатая бинарная последовательность *bin*. В результате выполнения энтропийного декодирования осуществляется восстановление квантованных латентных тензоров, представленных в формате ЛПП. Для декодирования

используется алгоритм rANS, обеспечивающий обратимое восстановление дискретных символов на основе вероятностных моделей, согласованных с этапом кодирования.

- *Блок восстановления квантованных латентных представлений (BitEstimator).* В рамках данного этапа выполняется обратное преобразование, соответствующее операции квантования на стороне кодера, включая масштабирование латентных коэффициентов в соответствии с параметрами квантования.

- *Блок нейросетевого декодирования DMCI.* На вход данного блока поступает восстановленное латентное представление видеокadra в формате ЛПП. Далее осуществляется нейросетевое декодирование, заключающееся в преобразовании латентного представления в восстановленный видеокادر в пиксельном пространстве. Для этого применяется нейросетевая модель DMCI, выполняющая аппроксимацию обратного преобразования кодера и восстановление изображения.

- *Блок интерполяции.* На вход данного блока поступает восстановленный видеокادر, полученный после нейросетевого декодирования. При необходимости данный кадр интерполируется до требуемого пространственного разрешения, соответствующего параметрам выходного видеопотока и условиям отображения или дальнейшей обработки.

3.2. Выводы по главе 3

1. Решена задача теоретического и архитектурного обоснования применения нейросетевых методов кодирования видеоинформации в системах FPV. Проведенное исследование показало, что переход от традиционного пиксельного представления видеокadров к их представлению во внутреннем латентном пространстве признаков нейронной сети создает основу для построения нового класса видеокодеков, ориентированных не на универсальные мультимедийные сценарии, а на задачи передачи FPV-видеопотока с низкой задержкой.

2. В результате сопоставительного анализа установлено, что различные классы нейросетевых видеокодеков обладают принципиально разной пригодностью для применения в системах реального времени. Показано, что диффузионные архитектуры, обеспечивая приемлемое качество восстановления изображения, характеризуются чрезмерной вычислительной сложностью (0,64 секунд на кадр при объеме сжатых данных в 13,6 Кбит) и потому не позволяют обеспечить требуемую кадровую производительность. Это ограничивает их применение в задачах FPV, где определяющим требованием является не только степень сжатия, но и возможность выполнения кодирования и декодирования в жестких временных ограничениях.

3. Установлено, что наиболее перспективным направлением является использование нейросетевых видеокодеков на основе вариационных автокодировщиков. Данный подход обеспечивает рациональное сочетание трех ключевых свойств: формирования компактного латентного представления видеокadra, приемлемого качества восстановления и существенно меньшей вычислительной сложности по сравнению с более тяжелыми генеративными архитектурами. По результатам исследований показано, что при битрейте от 223 Кбит/с достигаются значения SSIM в диапазоне 0,48-0,90, DISTS в диапазоне 0,12-0,46 и PSNR в диапазоне 27,87-32,21 дБ, что подтверждает возможность использования данной архитектуры в качестве базовой для систем нейросетевого сжатия FPV-видеопотока.

4. Дальнейшее развитие данного направления в главе 3 связано с обработкой латентного пространства признаков как самостоятельного объекта оптимизации. Показано, что дополнительное снижение объема передаваемых данных может быть достигнуто не только за счет нейросетевого кодирования, но и за счет специальной модификации структуры латентного представления, включая его маскирование и контекстное сжатие. Это говорит о том, что наиболее значимые резервы повышения эффективности нейросетевого видеокодека находятся не столько на уровне пиксельного описания изображения, сколько на уровне внутренней организации признакового

пространства.

5. Показано, что маскированный видеокодек позволяет реализовать дополнительное уменьшение объема передаваемой информации за счет удаления части значений латентных признаков с их последующим восстановлением на приемной стороне. Показано, что наиболее эффективным является режим удаления 25% значений, обеспечивающий дополнительное сжатие видеопотока на 25% при ухудшении качества восстановленного изображения примерно на 17,95% по метрике DISTS. Тем самым обоснована принципиальная применимость маскирования как инструмента адаптации нейросетевого видеокодека к каналам связи с ограниченной пропускной способностью.

6. Контекстное сжатие латентного пространства является наиболее эффективным направлением дальнейшего повышения степени сжатия видеопотока. Показано, что учет статистической и структурной зависимости между элементами латентного представления позволяет достичь экстремально малых объемов передаваемых данных при сохранении приемлемого перцептивного качества восстановления видеокадров.

7. Основным научным результатом является установление того, что для задач FPV наибольшей эффективностью обладают нейросетевые видеокодеки, основанные на вариационных автокодировщиках для формирования латентного пространства признаков и его последующей специализированной обработке. Проведенное исследование позволило определить архитектурное направление построения видеокодеков, в котором обеспечивается согласование требований к степени сжатия, качеству восстановления видеопотока и вычислительной сложности. Полученные результаты формируют научно-методическую основу для последующей разработки методов уменьшения задержки передачи видеопотока в каналах информационного обмена систем FPV управления.

ГЛАВА 4. СОКРАЩЕНИЕ ЗАДЕРЖКИ ПЕРЕДАЧИ FPV-ВИДЕОПОТОКА МЕТОДОМ ПРЕДСКАЗАНИЯ БУДУЩИХ КАДРОВ

Передача видеопотока со стороны БПЛА на терминал оператора сопряжена с неустраняемыми физическими и технологическими задержками. Как было показано в главе 2 латентность видеосистемы состоит из нескольких компонент: задержки кодирования, буферизации на передатчике, сетевой передачи, буферизации на приёмнике и задержки отображения. По данным эмпирических исследований, общая задержка в системах взаимодействия оператора с беспилотной системой варьируется в диапазоне 50–400 мс. Для систем FPV такие задержки критичны, поскольку оператор утрачивает способность к своевременной коррекции траектории и совершает ошибки, вызванные асинхронностью между его действиями и видимым состоянием аппарата.

Поскольку физические ограничения (скорость света, расстояния передачи) представляют непреодолимый барьер для дальнейшего снижения задержки традиционными методами, альтернативный подход основан на предсказании (экстраполяции) будущих видеокадров на приёмной стороне, используя доступные исторические данные. Принцип основан на корреляционной зависимости между последовательными видеокадрами: изменения в видеопотоке подчиняются закономерностям движения объектов в сцене, которые могут быть смоделированы с помощью методов глубокого обучения.

4.1 Анализ нейросетевых моделей предсказания видео

Для разработки более эффективного подхода к прогнозированию последующих кадров целесообразно исследовать принципиальную возможность предсказания тензоров ЛПП, формируемых на этапе кодирования видеопотока нейросетевыми видеокодеками [446]. Такое исследование должно охватывать как временную автокорреляционную структуру самих FPV-видеокадров, так и статистические зависимости (автокорреляцию и взаимную

корреляцию) компонент тензора ЛПП, получаемого при сжатии кадра с применением НВК.

4.1.1 Анализ корреляционной структуры FPV-видеопотока

Эмпирическая проверка выполнена на авторском наборе данных (рис. 4.1), представляющем собой последовательность из 1000 FPV-кадров полёта БПЛА. Экспериментальная программа включала четыре этапа, реализованные согласно методике, изложенной далее.



Рисунок 4.1 – Примеры кадров набора данных

На первом этапе исследования видеоданные (1000 кадров) были кластеризованы для оценки изменчивости сцен. Тензоры латентных пространств признаков, полученные с помощью НВК, преобразовывались в векторы признаков длиной 512 с помощью ResNet18. Оптимальное число кластеров ($K=3$) было определено методом «локтя» на основе графика WCSS (аббр. от англ. Within-Cluster Sum of Squares) (рис. 4.2).

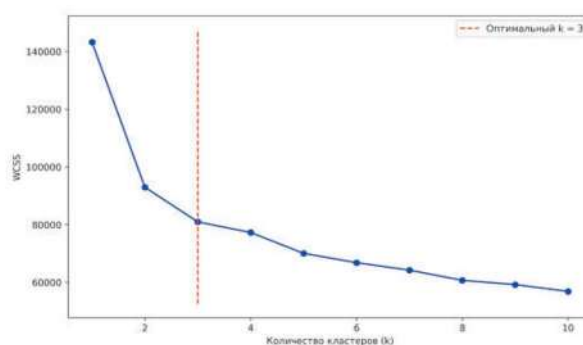


Рисунок 4.2 – График WCSS для определения оптимального количества кластеров

Изменчивость последовательных кадров оценивалась с помощью косинусного расстояния:

$$\text{score}(f_i, f_j) = \frac{f_i^T f_j}{\|f_i\| \times \|f_j\|} \quad (4.1)$$

Результаты показали наличие периодов низкой, средней и высокой изменчивости (рис. 4.3).

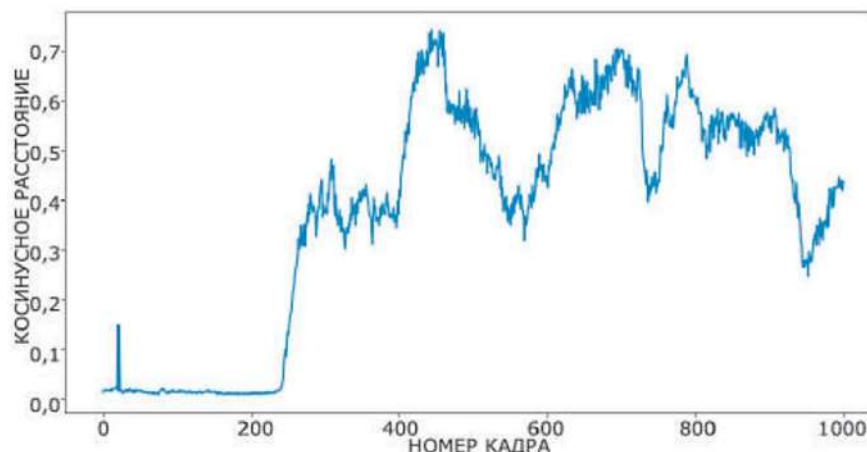


Рисунок 4.3 – График изменчивости кадров (косинусное расстояние)

Далее исходные кадры f_i преобразовывались из цветового пространства RGB в градации серого GRAY [447]. Для каждого пикселя x выполнялось вычисление:

$$x_{ig} = W_r \times x_{ir} + W_g \times x_{ig} + W_b \times x_{ib}, \quad (4.2)$$

где x_r, x_g, x_b – значения красного, зелёного и синего каналов соответственно, x_{ig} – результирующая яркость (GRAY); $W_r=0,299$, $W_g=0,587$, $W_b=0,114$ – весовые коэффициенты каналов. При произвольном выборе весов должно сохраняться условие нормировки [448]:

$$W_r + W_g + W_b = 1. \quad (4.3)$$

После приведения кадров к GRAY для временных рядов значений f_{ig} рассчитывались коэффициенты автокорреляции порядка l , где l интерпретируется как лаг (число кадров сдвига относительно текущего значения). Использовалась нормированная оценка автокорреляции по последовательности длиной T при ограничении $1 \leq l < T$:

$$p(l) = \frac{\sum_{t=1}^{T-l} (x_t - \bar{x}) \times (x_{t+l} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^T (x_t - \bar{x})^2}, \quad (4.4)$$

где x_t – наблюдаемое значение (например, яркость выбранного пикселя) в момент t , $\bar{x}$ – среднее по рассматриваемому интервалу, T – общее число последовательных кадров.

В рамках первого этапа были получены значения коэффициентов автокорреляции для пикселей кадров видеопотока БПЛА из набора данных при $l=1, \dots, 10$ (рис. 4.4). Дополнительно для случаев $l=1$ и $l=10$ построены тепловые карты распределения автокорреляции по координатам изображения (рис. 4.5), отражающие неоднородность временной согласованности различных областей кадра.

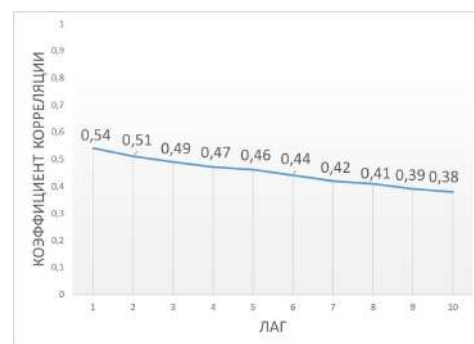
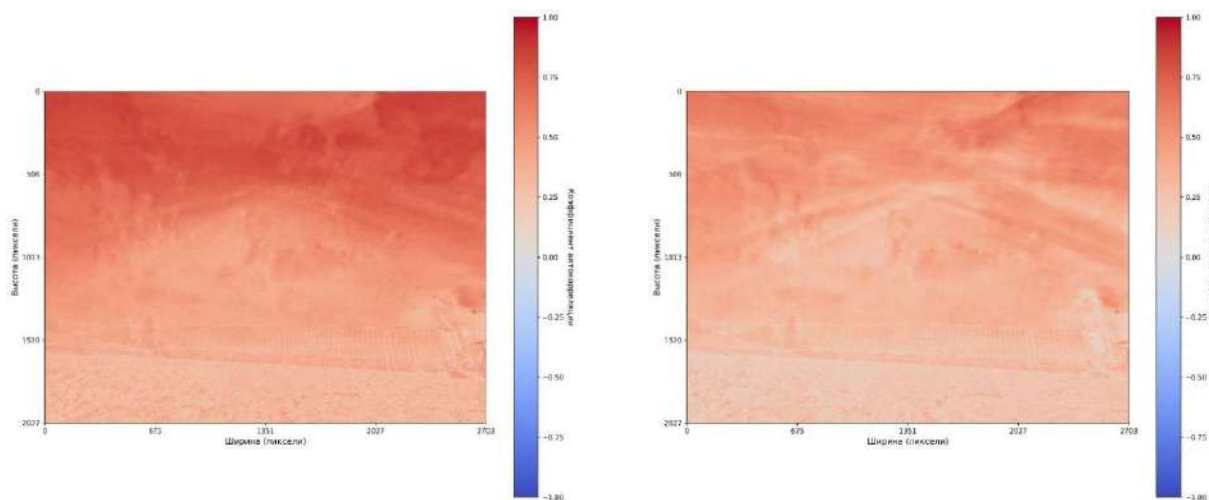


Рисунок 4.4 – График коэффициентов автокорреляции пикселей в зависимости от лага



а) при лаге 1

б) при лаге 10

Рисунок 4.5 – Тепловая карта коэффициентов автокорреляций отдельных значений пикселей

Анализ тепловых карт показывает, что в верхней части изображения (рис. 4.5) наблюдаются более высокие значения корреляционных коэффициентов, тогда как в нижней – более низкие, что согласуется со спецификой сцены. При увеличении лага отмечается более выраженное снижение автокорреляции

именно в верхней зоне кадра. Кроме того, на картах проявляются устойчивые контуры, связанные с длительным пребыванием БПЛА в близком пространственном положении (ограниченная динамика сцены на отдельных фрагментах).

В среднем коэффициент автокорреляции уменьшается с 0,54 до 0,38 при росте лага с 1 до 10. Относительно медленная деградация автокорреляции при увеличении лага может быть объяснена высокой степенью сходства кадров в ходе испытаний.

Полученные результаты указывают на наличие статистической предсказуемости кадров видеопотока. В прикладном аспекте это означает возможность предсказания тех областей кадра, которые демонстрируют наибольшую автокорреляцию, при одновременной передаче по каналу связи между БПЛА и ТО преимущественно тех фрагментов, которые характеризуются меньшей коррелированностью и, следовательно, хуже поддаются прогнозу.

На втором этапе экспериментов исходные кадры f_i приводятся к разрешению 512×512 с использованием метода интерполяции INTER_AREA из пакета cv2 и далее кодируются с помощью вариационного автокодировщика типа VQ-f16, входящего в состав моделей Stable Diffusion и обученного на наборе данных LAION-5B. По результатам кодирования формируются тензоры латентного признакового пространства t_i . Для значений тензора ЛПП вычисляются коэффициенты автокорреляции порядка l .

В рамках второго этапа экспериментов получены коэффициенты автокорреляции значений тензоров ЛПП, извлечённых из кадров видеопотока БПЛА во время полёта из набора данных с $l \in \mathbb{N} \cap [1; 10]$ (рис. 4.6). Для этих данных

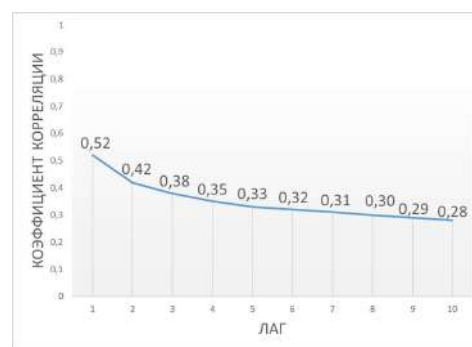


Рисунок 4.6 – График автокорреляции ЛПП в зависимости от лага

построены тепловые карты автокорреляций (рис. 4.7). Размерность тензоров ЛПП составляет $1 \times 8 \times 32 \times 32$; для индексации применяется запись $1 \times A \times B \times C$, отсчёт индексов начинается с нуля.

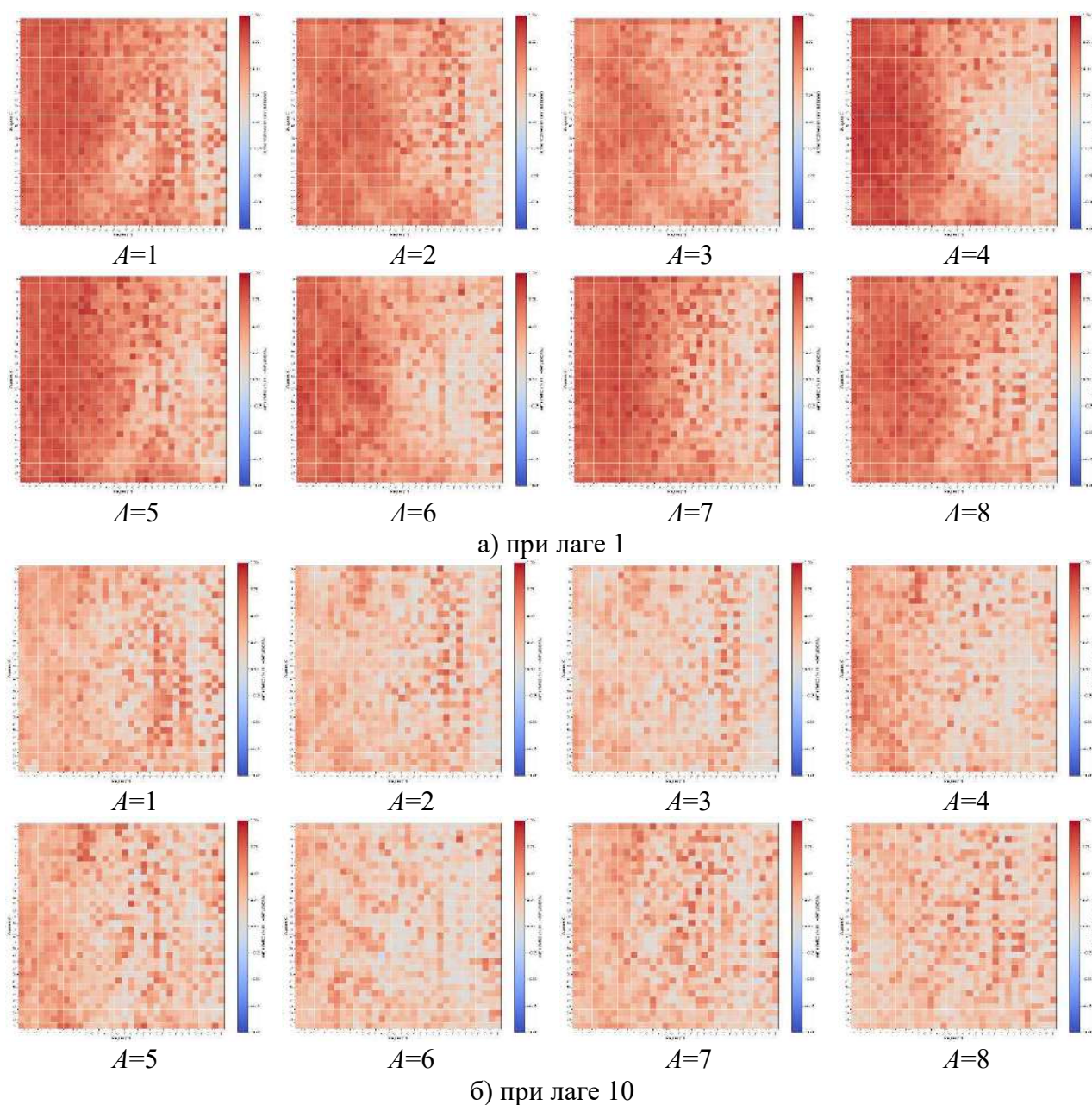


Рисунок 4.7 – Тепловая карта коэффициентов автокорреляций отдельных значений пикселей

Анализ тепловых карт (рис. 4.7) показывает, что коэффициенты автокорреляций значений тензоров ЛПП ниже по сравнению с кадрами видеопотока и снижаются с 0,52 до 0,28 при увеличении лага l с 1 до 10. Важно отметить, что наблюдалось резкое снижение коэффициента при лагах от 1 до 3.

Таким образом, предсказание значений тензоров ЛПП возможно, однако целесообразность использования тензоров с $l > 3$ следует ограничить.

Пусть БПЛА выполняет типовое полётное задание в заданных условиях. В таком случае для данного полётного задания можно определить эталонный образец видеопотока. Полученные результаты свидетельствуют, что при наличии такого типового образца можно выделить наиболее автокоррелированные области значений тензора ЛПП, предсказывать данные области на стороне ТО и передавать остальную информацию по КИО. Кроме того, для получения более точных шаблонов целесообразно разбиение типовых образцов видеопотока на кластеры и формирование шаблонов на базе корреляционного анализа по каждому кластеру.

На третьем этапе экспериментов вычисляется корреляция между каждой парой значений тензоров ЛПП t_i и t_j , где каждая пара характеризуется метрикой Манхэттена:

$$d_m(t_i, t_j) = \sum_{k=1}^{\max \dim} |t_{ik} - t_{jk}|, \quad (4.5)$$

где t_{ik} обозначает значение k -й размерности t_i , t_{jk} — значение k -й размерности t_j , и максимальная размерность определяется как $L=4$. Общая размерность тензоров ЛПП равна $1 \times 8 \times 32 \times 32$ с натуральными значениями.

В результате четвертого этапа экспериментов были найдены соответствия между значениями коэффициентов корреляции и метриками Манхэттена (рис. 4.8). Обнаружен значительный разброс коэффициентов корреляций для одного тензора ЛПП при фиксированных расстояниях между данными значениями. Корреляции сохраняют высокий уровень при значениях метрики Манхэттена выше 50, особенно выражены при метрике Манхэттена, не превышающей 3.

Результаты проведённого анализа свидетельствуют о возможности предсказания кадров видеопотока взаимодействия оператора и беспилотной системы через прогнозирование значений тензоров ЛПП, основываясь на соседних данных внутри скрытого признакового пространства вариационного

автокодировщика. Анализ показал высокий разброс, но при этом была выявлена сильная корреляция. Особенно высоки коэффициенты корреляции (достигая 1,00 и -1,00) при значениях метрики Манхэттена, меньшей или равной 3. Таким образом, можно сделать вывод, что возможным является предсказание значений тензоров ЛПП на основании их соседних значений, с наибольшей точностью при $d_m \leq 3$.

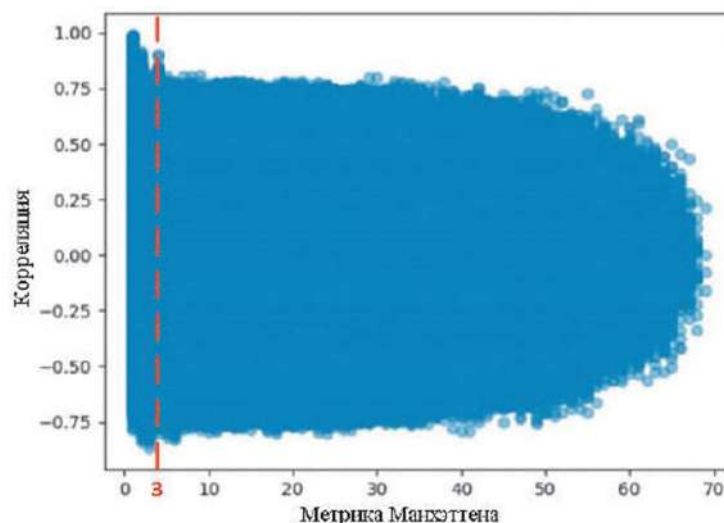


Рисунок 4.8 – Диаграмма разброса значений между коэффициентами корреляции и метриками Манхэттена

При этом прогноз пиксельного пространства видеокadra демонстрирует большую точность по сравнению с прогнозированием значений тензоров ЛПП, что обосновывается более высокими коэффициентами автокорреляции в пиксельном пространстве. Дополнительно отмечается, что последовательные кадры FPV-видеопотока проявляют выраженную корреляционную зависимость. При условии поддерживаемого полёта по заданной траектории динамика сцены носит характер предсказуемых изменений: перемещение камеры следует направлению заданной траектории, а ориентиры сцены перемещаются в соответствии с законами механики.

Эта характеристика позволяет строить вероятностные модели изменения видеопотока во времени на основе предшествующих кадров $\{\hat{I}_{t+1}, \hat{I}_{t+2}, \dots\}$, где $\hat{I}_{t+k}$ обозначает предсказанный будущий кадр с индексом k , формируемый на

основе t предшествующих кадров $\{I_i \mid i=1, \dots, t\}$, при этом I_i – i -й наблюдаемый кадр последовательности.

Основные классы методов предсказания видео включают подходы на базе *явных преобразований* и *методы синтеза на уровне пикселей*.

4.1.2 Методы явных преобразований

Цель данной группы методов состоит в преобразовании между выбранными кадрами реальных изображений в последовательности $\{I_{t-n}, I_{t-n+1}, \dots, I_t\}$, где n задаёт длину исторической последовательности, и первоначальным кадром из последовательности предсказываемых будущих кадров $\{I_{t+1}, I_{t+2}, \dots\}$ [449]. Принцип заключается в том, что синтез будущих кадров достигается исключительно за счёт перераспределения пиксельной информации из предшествующих исторических кадров.

Основной метод в данной области состоит в вычислении оптического потока (*от англ. optical flow*). Эта техника направлена на оценку векторного поля перемещений, предсказывающего траекторию каждого пикселя между последовательными кадрами. Иллюстрация оптического потока представлена на рисунке 4.9, где цветовая кодировка отражает направление и величину потока. В правом нижем углу рисунка 4.9 приведена круговая диаграмма, поясняющая цветовую схему: например, красный оттенок соответствует правостороннему перемещению пикселей, а интенсивность окраски пропорциональна величине смещения.

Однако реализация оптического потока остаётся сложной задачей: вычислительный процесс характеризуется высокой вычислительной сложностью и значительными временными затратами. Основные ограничения метода включают чувствительность к высоким скоростям движения объектов, исчезновение объектов за счёт обструкции (окклюзии), размытие движения и наличие текстурно-бедных поверхностей (апертурная проблема) [450].

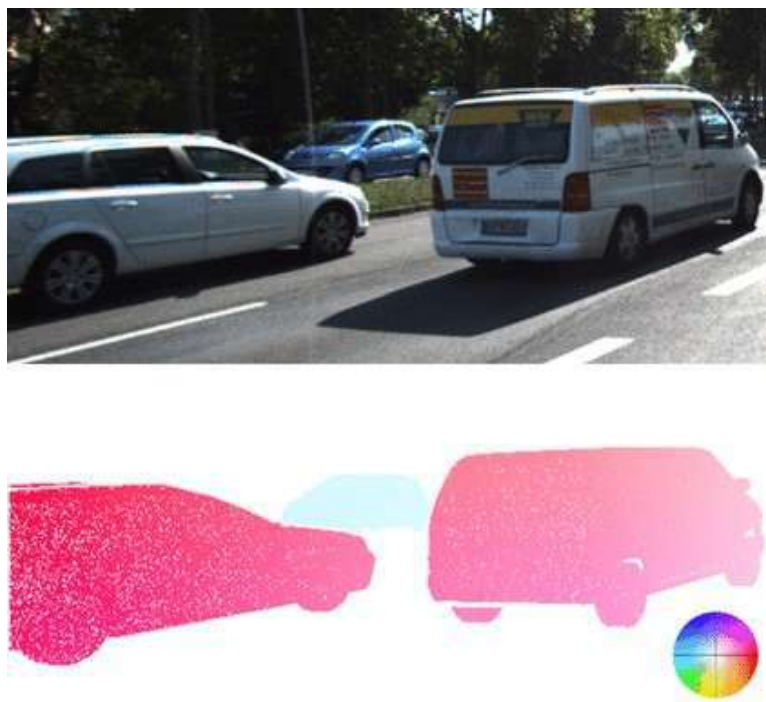


Рисунок 4.9 – Пример оптического потока

Классическим алгоритмом для оценки оптического потока является метод Лукаса–Канаде (Lucas-Kanade) [451], который допускает локальную постоянность потока в окрестности пикселя и минимизацию квадратичной ошибки. Однако данный подход отличается высокой чувствительностью к шумам и низкому контрасту, что стимулировало переход к моделям машинного обучения для оценки оптического потока [452, 453].

Формально оптический поток, трансформирующий кадр I_t в I_{t+n} при фиксированном n из множества $\{-1, 1\}$, обозначается как $F_{t+n \rightarrow t}$. Синтез будущего кадра реализуется через обратное искажение W (от англ. backward warping) [454] согласно соотношению:

$$I_{t+n} = W(I_t, F_{t+n \rightarrow t}). \quad (4.6)$$

Альтернативным расширением концепции потока является воксельный поток (от англ. voxel flow) F , который интегрирует пиксели из двух последних исторических кадров, в отличие от классического потока, ограниченного одним предшествующим кадром.

Для выбора пикселей вводится бинарная маска m , означающая регионы предпоследнего кадра, тогда $1-m$ соответствует областям последнего кадра.

Обобщённый алгоритм предсказания кадра принимает вид (4.7), где поэлементное умножение обозначено как $\odot$:

$$I_{t+1} = (1 - m) \odot W(I_t, F_{t+1 \rightarrow t}) + m \odot W(I_{t-1}, F_{t+1 \rightarrow t-1}), \quad (4.7)$$

В настоящее время существует множество архитектур, применяющих явные преобразования для задач видео-предсказания. Классические примеры включают:

1. STVA (*аббр. от англ. Spatio-Temporal Video Autoencoder with Differentiable Memory*, пространственно-временной автокодировщик видео с дифференцируемой памятью) – энкодерно-декодерная модель для прогнозирования оптического потока, построенная на основе рекуррентной архитектуры LSTM (*аббр. от англ. long short-term memory*) с интеграцией сверточных модулей (CNN) для пространственно-временного моделирования [455].

2. NVP (*аббр. от англ. Novel Video Prediction for Large-scale Scene using Optical Flow*, новое предсказание видео в крупных сценах с использованием оптического потока) – сверточная нейронная сеть, предназначенная для генерации будущих кадров в крупных сценах посредством оценки оптического потока между историческими кадрами с различной задержкой во времени, что отражает масштабность сцены и вариативность временных лагов [456].

4.1.3 Методы синтеза пикселей

Другой подход предсказания видеопотока строится на принципе синтеза новых пиксельных значений, а не на перераспределении пикселей существующих кадров. Такие подходы генерируют целый набор пикселей заново, что позволяет формировать более длинные последовательности будущих кадров по сравнению с методами, оперирующими явными преобразованиями. Но эти методы приводят к снижению производительности, а также к сглаженности изображений в итоговых кадрах [457]. Рассмотрим несколько существующих подходов:

1. MAGViT (*аббр. от англ. Masked Generative Video Transformer*, масочный генеративный трансформер для видео) [458] – масочный генеративный трансформер для видео: многозадачная архитектура, показывающая хорошие результаты на широком спектре задач предсказания видео, включая предсказание движений людей и объектов роботов. Помимо этого, MAGViT демонстрирует заметно более высокую скорость вывода по сравнению с аналогичными моделями, что является существенным преимуществом для реального времени взаимодействия оператора и беспилотной системы.

2. VPTR (*аббр. от англ. Video Prediction Transformer*, трансформер для предсказания видео) [459] – трансформер для предсказания видео: реализован как энкодер-декодерная структура, где энкодер извлекает визуальные признаки входных кадров, которые затем подаются на трансформер для предсказания признаков будущих кадров

3. SimVP (*аббр. от англ. Simpler yet better video prediction*, более простое, но лучшее предсказание видео) [460] – основан исключительно на базовых сверточных слоях. Эмпирически показано, что для предсказания видеопотока достаточно использовать только RGB-представление, без использования семантических карт или другой дополнительной информации; сложные архитектуры вроде LSTM и трансформеров не являются необходимыми для базового уровня качества.

Анализ существующих подходов показывает ограниченность их применения к задаче взаимодействия оператора и беспилотной системы от первого лица по следующим причинам. Во-первых, существующие методы VPTR и SimVP обучались и проверялись на изображениях низкого разрешения (64×64 или 128×128), что ограничивает эффективность взаимодействия оператора и беспилотной системы из-за несоответствия требованиям к качеству и разрешению кадров. Такая специфика данных затрудняет достоверное предсказание траекторий камеры в условиях реальной эксплуатации. Во-вторых, обучающие наборы в основном ориентированы на предсказание

движений людей или манипуляторной робототехники, тогда как задача FPV требует предсказания движения самой камеры БПЛА и сценических элементов в реальном времени. Это создаёт существенный разрыв между обучающей выборкой и прикладной задачей. В-третьих, подходы STVA и NVP часто приводят к появлению размытого изображения в предсказаниях, что ухудшает восприятие сцены и снижает вероятность достижения цели функционирования БПЛА.

Следовательно, для эффективного взаимодействия оператора с беспилотной системой от первого лица необходимы решения, способные обрабатывать изображения высокого разрешения (HD и/или FullHD) и проходить тестирование на видеопотоках с движущимися объектами, характерными для режима FPV. Особенно востребованы методы, показывающие лучшие результаты на известных наборах данных CityScapes [461] и KITTI [462] (рис. 4.10), поскольку эти наборы наиболее точно отражают специфику FPV-видеопотока различного назначения.



а) *CityScapes*



б) *KITTI*

Рисунок 4.10 – Пример изображений из наборов данных

Далее рассмотрим решения, удовлетворяющие вышеописанным требованиям:

1. VPvI (аббр. от англ. Optimizing Video Prediction via Video Frame Interpolation – Оптимизация предсказания видео с помощью интерполяции кадров) [463] трактует предсказание видео как задачу оптимизации через интерполяцию между существующими кадрами. В рамках этого подхода сначала аппроксимируется оптический поток $F_{t+1 \rightarrow t}$, который преобразует текущий кадр I_t в предполагаемый кадр $\hat{I}_{t+1}$. Затем применяется

интерполяционная модель G , которая формирует I_t^G на основе I_{t-1} и аппроксимированного $\hat{I}_{t+1}$, вместе с оценками оптических потоков $F_{t+1 \rightarrow t}^G$ и $F_{t-1 \rightarrow t}^G$:

$$I_t^G, F_{t+1 \rightarrow t}^G, F_{t-1 \rightarrow t}^G = G(I_{t-1}, \hat{I}_{t+1}), \quad (4.8)$$

Точность аппроксимации $F_{t+1 \rightarrow t}$ напрямую влияет на близость предсказанного кадра I_t^G к реальному I_t , что находит отражение в минимизации общей функции потерь L_{total} :

$$L_{total} = w_1 L_{img} + w_2 L_{const}, \quad (4.9)$$

где L_{img} – функция потерь, отражающей расхождение между I_t и I_t^G :

$$L_{img} = \|I_t - I_t^G\|, \quad (4.10)$$

L_{const} – функция потерь, отражающая постоянство оптического потока:

$$L_{const} = \sum_p \|\Delta F_{t+1 \rightarrow t}^G(p)\|, \quad (4.11)$$

где p – область изображения, на которой проверяются прямой и обратный потоки. Веса $w_1=1$ и $w_2=0,1$ в L_{total} и параметры обучения настраиваются через оптимизатор *Adam* и заданную скорость обучения $lr=10^{-4}$.

Особенность подхода VPvI состоит в отсутствии необходимости дополнительного обучения, применяется пара предобученных нейросетевых моделей для извлечения оптического потока (RAFT [450]) и для интерполяции видео (RIFE [452]). В большинстве существующих решений задача предсказания видео требует компоновки нескольких моделей, каждая из которых адаптирована под конкретный тип движения. В то же время задача общей интерполяции видео не ограничивает распознавание по конкретному виду движения, что обеспечивает лучшую способность к обобщению по сравнению с аналогами. Это делает предлагаемый подход более приемлемым к задаче взаимодействия оператора и беспилотной системы от первого лица. Однако высокая требовательность к ресурсам остается одним из ограничений,

особенно заметным на наборах CityScapes и KITTI, где VPvI занимает второе место после DMVFN согласно результатам [464].

2. DMVFN (аббр. от англ. Dynamic Multi-Scale Voxel Flow Network for Video Prediction, динамическая многомасштабная нейронная сеть воксельного потока для предсказания видео) [457] представляет собой архитектуру, основанную на глубоком воксельном потоке (Deep Voxel Flow [457]): вместо фокусирования на пиксельном оптическом потоке обучается предсказывать траектории перемещения вокселей в пространстве признаков, что позволяет аппроксимировать движение на RGB-изображениях без дополнительной разметки движения. Динамическая архитектура DMVFN адаптирует конфигурацию сети в зависимости от свойств входных данных, активируя только необходимые модули для задач с меньшей сложностью, что приводит к заметному ускорению инференса примерно вдвое. Благодаря такой гибкости DMVFN демонстрирует высокие показатели на видео высокого разрешения и на динамичных сценах и тестирования на CityScapes и KITTI. Подробности архитектуры и функций модели раскрываются далее в разделе 4.2.

Оба подхода ориентированы на обработку видеоданных высокого разрешения и устойчивы к динамике сцены, что актуально для FPV. Однако VPvI достигает своей эффективности за счет использования предобученных модулей оптического потока и интерполяции, в то время как DMVFN выигрывает за счет прямого моделирования траекторий вокселей и динамической перестройки сети под входные данные. Эти различия влияют на вычислительную сложность и требования к обучению, а значит и на применимость к сценариям, требующим обработки данных в реальном времени. В итоге приоритет следует отдавать методам, которые способны работать с HD и Full HD видеопотоками и которые демонстрируют устойчивость к движущимся объектам в сценах с городскими и пригородными локациями, что подтверждают результаты на наборах данных *CityScapes* и *KITTI*.

В условиях FPV важна не только точность предсказания кадров, но предсказуемость и стабильность качества изображения, что делает DMVFN привлекательной за счёт аппроксимации движения без необходимости детальной аннотации, а VPvI – за счёт потенциала точной интерполяции и снижения количества промежуточных моделей. В идеале в составе модуля КИБ следует рассмотреть гибридные решения, сочетающие преимущества интерполяции и динамического моделирования траекторий воксельного потока, с учетом ограничений вычислительных ресурсов и требований к задержке в реальном времени.

4.1.4. Выбор нейросетевой модели предсказания кадров

Для сравнения моделей предсказания видео были использованы стандартные метрики оценки качества SSIM, PSNR, LPIPS и DISTS, предназначенные для задач видео-предсказания и принимающие значения в диапазоне $[0, 1]$, где значение 1 соответствует полному совпадению изображений. Предсказание осуществлялось для последовательности до 5-10 кадров вперед: на вход модели подавались два последовательных кадра для генерации следующего, а последующие кадры получались рекуррентно путем подачи ранее предсказанных изображений. Все изображения имели разрешение 1280×720 пикселей. Вычисления проводились с использованием графического процессора NVIDIA Tesla T4.

Оценка моделей выполнена на двух разнородных наборах данных:

1. MSU Video Super-Resolution (MSU SR) (рис. 4.11), изначально ориентированный на задачи сверхразрешения видео, однако содержащий обширный корпус видеоматериалов различных тематик, что обеспечивает репрезентативность для объективной валидации моделей предсказания.

2. Собственный авторский датасет, включающий 12 видеороликов, снятых с БПЛА (далее – «видео с дронов») (рис. 4.12). Материалы были собраны из открытых источников и адаптированы для тестирования моделей на

домене, максимально приближенном к целевой задаче предсказания FPV-видеопотока.

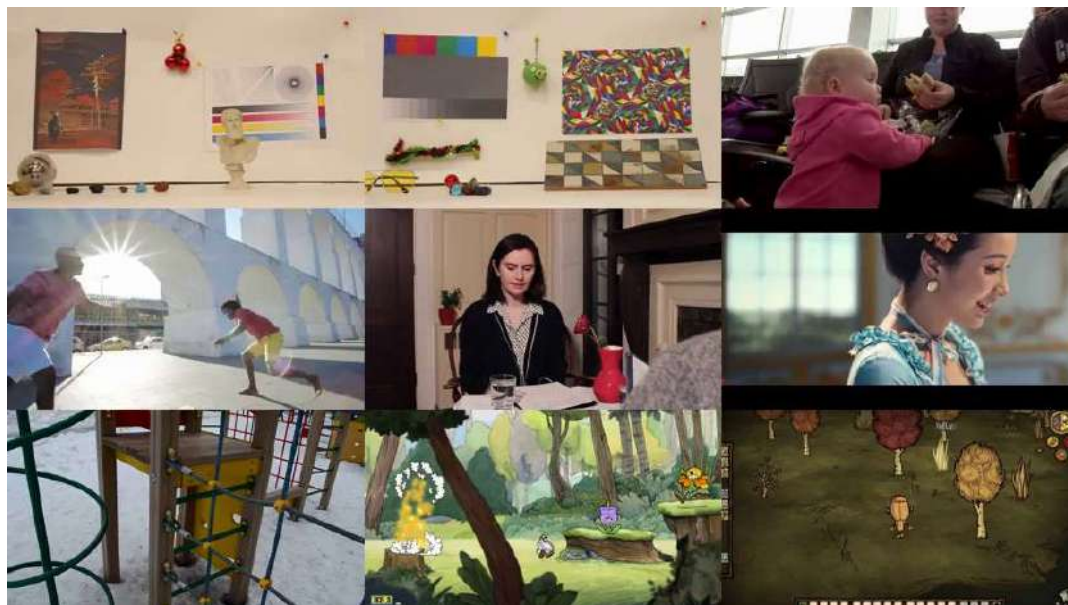


Рисунок 4.11 – Примеры видеокадров из набора MSU SR

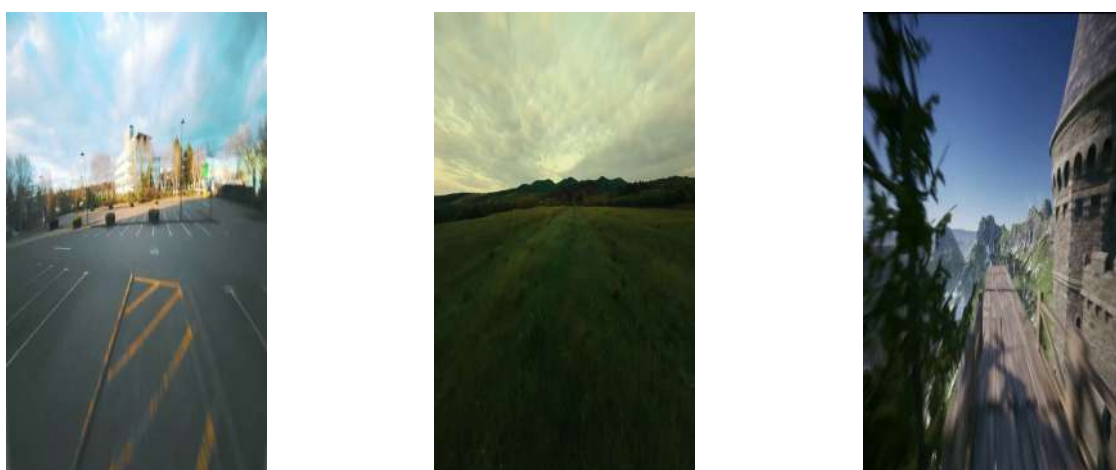


Рисунок 4.12 – Примеры видеокадров из набора «Видео с дронов»

Согласно экспериментальным данным (рис. 4.13) архитектура нейронной сети DMVFN, инициализированная весовыми коэффициентами, полученными при обучении на корпусе синтетических данных *CityScapes*, обеспечивает статистически значимое повышение обобщающей способности при переносе на целевую задачу по сравнению с сетью, предварительно обученной на реальных данных датасета *KITTI*. Количественная оценка качества прогнозирования согласно структурной метрике подобия SSIM показывает превосходство DMVFN над методом VPvI, составляющее 1,8 процентных пункта на

специализированном наборе данных «видео с дронов» и 2,7 процентных пункта на бенчмарке MSU SR.

Полученные количественные результаты обосновывают целесообразность выбора именно DMVFN с инициализацией *CityScapes* в качестве базового прогностического модуля в архитектуре модуля КИВ, поскольку указанная конфигурация достигает оптимального компромисса между точностью прогнозирования и адаптивностью к характеристикам целевого домена.

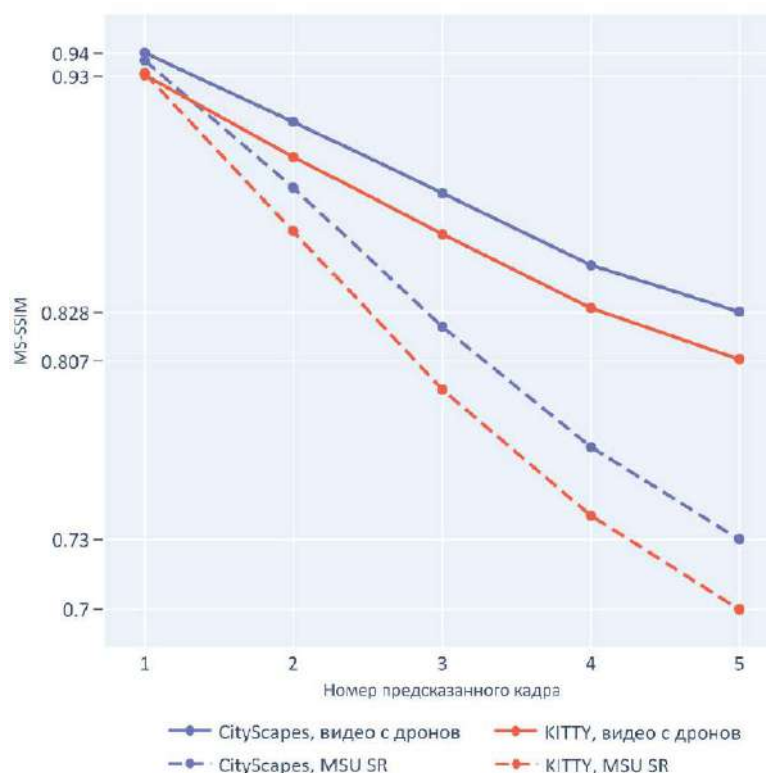


Рисунок 4.13 – Сравнение модели DMVFN обученной на наборах данных *CityScapes* и *KITTI*

В таблице 4.1 представлены изменения значения метрик SSIM и PSNR в зависимости от количества предсказываемых кадров k [465].

Таблица 4.1 – Изменение метрик DISTS, SSIM и PSNR в зависимости от k для модели DMVFN

k	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SSIM	0,929	0,873	0,801	0,757	0,723	0,691	0,664	0,622	0,568
PSNR	32,276	27,205	23,321	21,406	20,033	18,909	18,171	17,605	17,162
DISTS	0,0858	0,1445	0,2144	0,254	0,2843	0,3103	0,3320	0,3645	0,4038

Детальный анализ динамики показателей качества выявляет устойчивое монотонное снижение численных значений метрик SSIM и PSNR по мере увеличения горизонта прогнозирования k , что обусловлено прогрессирующим накоплением ошибок прогнозирования в многошаговом режиме функционирования сети DMVFN и, соответственно, возрастанием зависимости от результатов внутренних предсказаний в ущерб воспроизведению реальных видеокадров из входного потока. Сопутствующее исследование демонстрирует, что на ранних временных горизонтах предсказания, в частности при $k=2$, предсказанные кадры сохраняют высокое визуальное качество: $DISTS=0,0858$, $SSIM=0,929$ и $PSNR=32,276$ дБ – что свидетельствует о достаточной точности работы модели на коротком временном диапазоне.

На рисунке 4.14 [465] представлена функциональная взаимосвязь между интегральными метриками качества SSIM и PSNR и параметром горизонта прогнозирования k (в диапазоне значений от 2 до 10), что подтверждает существование обратной (убывающей) корреляционной зависимости обеих метрик от объёма предсказываемых кадров. Временная ось абсцисс соответствует переменной k , левая ордината отображает нормализованные значения SSIM, а правая ордината представляет PSNR, выраженную в децибелах, что позволяет одновременно отслеживать тенденцию обеих характеристик.

В целях определения оптимального количества итераций оптимизации для модели VPvI была реализована серия контролируемых экспериментов на эталонном наборе данных «видео с дронов» (рис. 4.12) Тестированию подвергались две конфигурации архитектуры: базовая архитектура без применения пост-обработки оптимизационного алгоритма и модифицированная версия, подвергаемая итеративной оптимизации с числом итераций $n=100$.

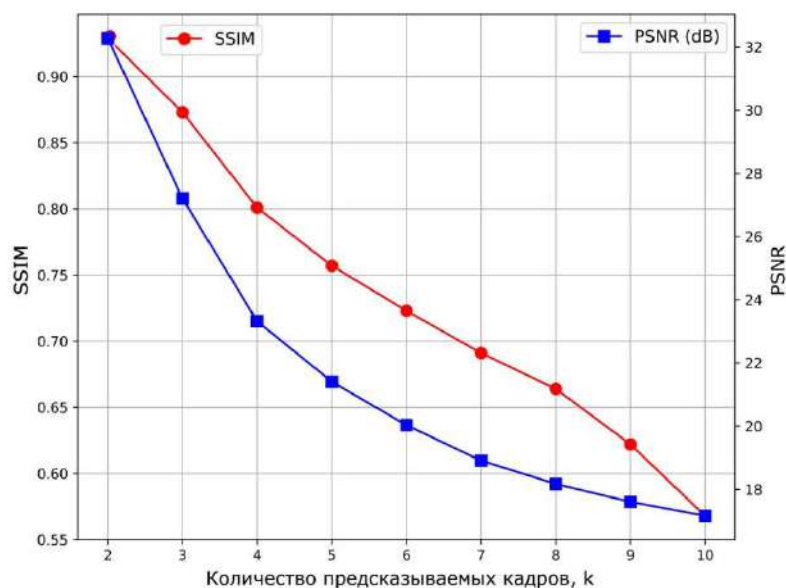


Рисунок 4.14 – Зависимость между k и метриками SSIM и PSNR при использовании модели DMVFN

Результаты, представленные в таблице 4.2, приводят к заключению о том, что внедрение дополнительной процедуры оптимизации обеспечивает лишь незначительное улучшение интегральных метрик качества, проявляющееся в изменениях порядка долей процентов. Хотя метрики SSIM и DISTS продемонстрировали прирост в среднем на 0,2%, это достижение оказалось экономически нецелесообразным, так как оно сопровождалось возрастанием вычислительной сложности в 3,5 раза (табл. 4.3), что представляет критическое ограничение для систем с жёсткими требованиями к задержкам взаимодействия оператора с БПЛА.

Таблица 4.2 – Сравнение конфигураций VPvI

Описание конфигурации	SSIM	LPIPS	DISTS
100 итераций оптимизации	0,798232	0,897756	0,216951
без оптимизации	0,795976	0,897067	0,219040

Сравнительный анализ архитектур DMVFN и VPvI по метрикам SSIM, LPIPS и DISTS представлен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Средние результаты моделей

Модель	MSU SR			Видео с дронов			Время предсказания пяти кадров, с
	SSIM	LPIPS	DISTS	SSIM	LPIPS	DISTS	
DMVFN	0,8281	0,8713	0,1887	0,9082	0,8921	0,108	3,05
VPvI	0,8113	0,8603	0,2047	0,857	0,8877	0,1605	16,3

Результаты, приведённые в таблице 4.3, демонстрируют превосходство архитектуры DMVFN на всех тестовых подмножествах данных без исключения. Наиболее существенное улучшение показателей достигается на специализированном наборе данных «видео с дронов», где DMVFN обеспечивает прирост качества предсказания в размере 6 процентных пунктов по метрике SSIM и 5 процентных пунктов по метрике DISTS в сравнении с методом VPvI.

Кроме того, DMVFN характеризуется выраженным преимуществом по вычислительной эффективности, превосходя альтернативный метод по показателю временной сложности более чем на порядок величины, что выражается в пятикратном сокращении времени выполнения операции прогнозирования одного видеокadra.

На рисунке 4.15 представлена зависимость качества изображений от количества предсказанных будущих кадров.

Проведённое исследование эмпирических зависимостей выявило наличие выраженной тенденции к монотонному снижению фактической точности прогнозирования каждого последующего кадра в последовательности, с достижением критического порога 0,85 для архитектуры DMVFN при прогнозировании пятого кадра в видеопоследовательностях, полученных с дронов. На основании данных закономерностей можно заключить, что экстраполяция результатов предсказания за границу пяти кадров вперёд без предварительного адаптивного дообучения моделей на специальных наборах

данных целевой предметной области (в контексте FPV) представляется необоснованной и практически неэффективной.

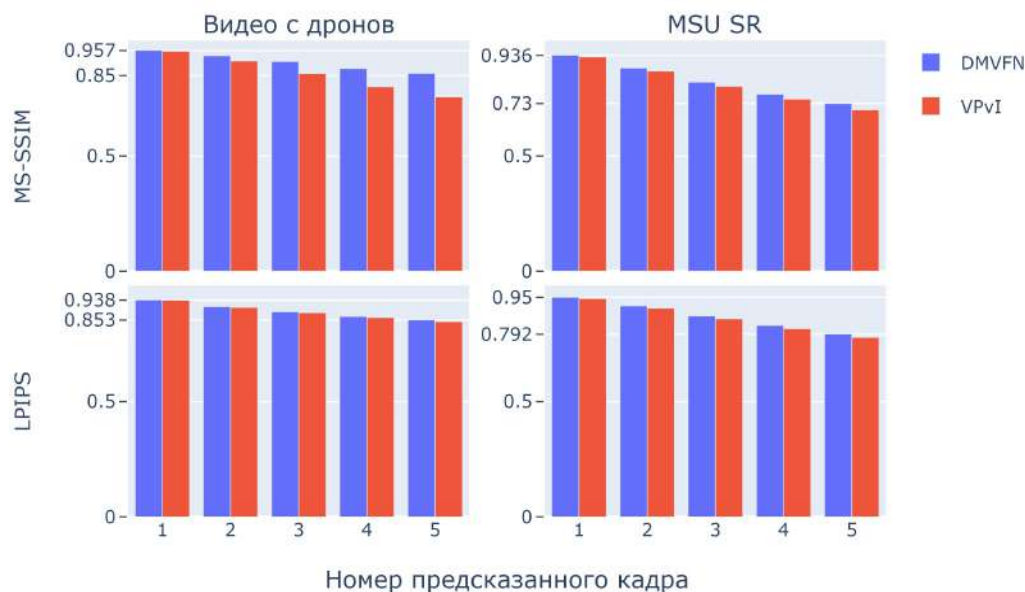


Рисунок 4.15 – Среднее значение метрик качества в зависимости от количества предсказываемых кадров

Вместе с тем следует подчеркнуть, что перцептивная метрика LPIPS, основанная на глубинных представлениях предварительно обученных сверточных нейросетей, демонстрирует незначительные расхождения между сравниваемыми моделями, что позволяет утверждать о сопоставимой субъективной оценке визуального качества предсказанных кадров с точки зрения человеческого восприятия. Тем не менее, превосходство DMVFN в восстановлении структурной целостности кадра подтверждается существенно более высокими значениями метрики SSIM и низкими значениями метрики DISTS, что служит объективным показателем превосходства данной архитектуры.

Исследуемые алгоритмы предсказания видеок кадров на основе глубокого обучения демонстрируют адекватную производительность при использовании на входе двух последовательных исторических кадров, обеспечивая приемлемую точность восстановления последующих. Однако в реальных сценариях передачи данных через КИО, характерные для систем передачи видео в реальном времени, такие факторы, как задержка передачи и потеря

пакетов, существенно затрудняют гарантированное поступление парного набора реальных кадров на стороне оператора. В отсутствие свежих входных данных модель вынуждена полагаться на ранее сгенерированные синтетические кадры, что провоцирует экспоненциальное накопление ошибок предсказания – феномен, хорошо документированный в научной литературе по рекуррентным нейронным сетям и моделям предсказания видео. Это явление обусловлено фундаментальными свойствами итеративного прогнозирования: малые диспропорции на уровне пиксельного пространства (измеряемые, например, метриками L2-нормы или PSNR) усиливаются при каждом шаге рекурсии за счет кумулятивного эффекта отклонений в оценке оптического потока и текстурных деталей.

При предсказании единственного кадра ошибка остается в пределах, не вызывающих визуально заметных артефактов, поскольку краткосрочный горизонт позволяет сохранять пространственную когерентность и временную согласованность. Напротив, расширение горизонта предсказания до двух или более кадров приводит к выраженной деградации качества, проявляющейся в размытости движущихся объектов, искажениях контуров и накоплении стохастических шумов. Такое поведение основывается на ограниченной способности, например, сверточных сетей LSTM и генеративно-сопоставительных сетей (GAN) моделировать долгосрочные зависимости в высоко динамичных сценах, где энтропия траекторий движения превышает порог устойчивости аппроксимации. Устойчивость генерации видеопоследовательности достигается исключительно при стабильном поступлении на вход модели двух последовательных реальных кадров, минимизируя таким образом риск каскадного разрастания ошибок.

В контексте оптимизации пропускной способности КИО возможна реализация сценария, при котором передаются два реальных кадра с последующим предсказанием пяти кадров, что позволяет снизить объем передаваемого видеопотока на 71% без критического ущерба воспринимаемому качеству. Оптимальным компромиссом между сжатием данных и точностью

выступает предсказание трех кадров вперед, обеспечивающее сокращение трафика на 60% при сохранении высокой точности предсказания, подтвержденной метриками DISTS, LPIPS, и SSIM. При прогнозировании одного кадра снижение объема потока составляет 33%, при практической неразличимости предсказанных кадров от реальных.

Архитектура сети динамического многомасштабного воксельного потока DMVFN представляет собой глубокую свёрточную архитектуру, специализированную на решении задачи синтеза последующего видеокadra с целью расширения или экстраполирования видеопоследовательностей высокого качества. Она использует воксельный поток для предсказания кадров видеопотока.

В работе [466] проведено исследование DMVFN на предмет возможности применения для предсказания кадров видеопотока в поточном режиме. Эксперименты показали, что на выполнение данной нейронной сети требуется порядка десятков миллисекунд на мощном оборудовании. Для разрешений 512×512 и HD нейронная сеть может увеличивать интенсивность видеопотока, в то время как для Full HD – нет. При этом SSIM предсказываемых кадров составляет приблизительно 0,8512, а LPIPS – 0,8586.

4.2 Метод предсказания будущих кадров FPV-видеопотока

Как было показано в параграфе 2.2.5, время рассинхронизации T_p определяется задержкой передачи видеопотока T_3^B и задержкой передачи команд взаимодействия оператора T_3^K в КИО и определяется выражением (2.31).

При этом в спутниковых системах связи задержка маршрутизации пакетов T_r и задержка в сетевых очередях T_q (2.34) приобретают вторичное значение и могут пренебрегаться по сравнению с задержкой распространения электромагнитного сигнала в космическом канале связи T_{prop} , так что справедливо неравенство:

$$T_{prop} \gg T_r + T_q. \quad (4.12)$$

Физическое обоснование этого предположения основывается на том, что в спутниковых системах орбитальная высота объектов (геостационарные спутники находятся на высоте $\sim 36\,000$ км) обуславливает основной вклад времени прохождения сигнала в общую задержку, типично составляющий около 140 мс в каждую сторону, что на порядки превышает задержки обработки в маршрутизаторах (единицы миллисекунд) и очередях буферов (десятки миллисекунд).

В соответствии с выражением (2.32) полная задержка видеопотока T_3^B включает в себя, помимо собственно сетевой передачи, задержку кодирования $T_{код}^B$ и декодирования $T_{декод}^B$ кадров видеопотока. Применение методов нейросетевого кодирования, включающих глубокие сверточные архитектуры и трансформерные слои, характеризуется существенно повышенными вычислительными требованиями и, как следствие, значительным увеличением времени обработки. Как было отмечено в главе 3, нейросетевые кодеки выполняют нелинейное преобразование высокого порядка, требующее множественных матричных умножений и нелинейных активаций, что неизбежно приводит к увеличению задержки в сравнении с традиционными стандартами кодирования (AVC/H.264, HEVC/H.265), где операции обработки сигнала допускают аппаратную реализацию с детерминированным временем выполнения порядка 40 мс и менее.

Снижение времени рассинхронизации T_P , определяемой выражением (2.37), достигается посредством так называемого, «псевдоуменьшения» сетевой задержки. Данный подход основывается на принципе, когда каждый видеокадр, подлежащий воспроизведению на стороне ТО, предварительно генерируется или прогнозируется на основе апостериорных данных с применением детерминированной прогностической модели глубокого обучения за $T_{пред}$ миллисекунд. Синхронизация процесса прогнозирования определяется таким образом, чтобы в момент инициирования предсказания указанный видеокадр

должен был бы 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 взаимодействие оператора и БПЛА.

Теорема 4.1. Условие эффективности сокращения задержки.

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

$$T_{\text{пред}} < \Delta T + T_{\text{prop}} + T_{\text{код}} + T_{\text{декод}}. \quad (4.13)$$

Доказательство. Пусть t – момент времени реальной полётной обстановки (на стороне БПЛА), которому соответствует последний «текущий» кадр $\hat{t}$, уже доступный системе предсказания. Рассматривается предсказание кадра, который должен соответствовать будущей обстановке в момент $t + \Delta T$, где $\Delta T > 0$ – горизонт предсказания (вперёд по времени).

$$T_3^B = T_{\text{prop}} + T_{\text{код}} + T_{\text{декод}}. \quad (4.14)$$

Для простоты будем считать, что T_3^B одинаково для реального и предсказанного кадров при прочих равных условиях тракта. Тогда момент отображения предсказанного кадра на ТО равен:

$$T_{\text{пред}}^{\text{disp}} = t + T_{\text{пред}}. \quad (4.15)$$

Реальный кадр, соответствующий обстановке в момент $t + \Delta T$, физически может быть сформирован (снят/сгенерирован) не раньше момента $t + \Delta T$; при прохождении того же тракта он будет отображён на ТО в момент:

$$T_{\text{реальный}}^{\text{disp}} = (t + \Delta T) + T_3^B. \quad (4.16)$$

Следовательно, предсказанный кадр будет получен (и, при немедленном выводе, отображён) раньше соответствующего реального кадра тогда и только тогда, когда $T_{\text{пред}}^{\text{disp}} < T_{\text{реальный}}^{\text{disp}}$, что с учетом (4.14), (4.15) и (4.16):

$$t + T_{\text{пред}} < t + \Delta T + T_3^B. \quad (4.17)$$

$$T_{\text{пред}} < \Delta T + T_3^B = \Delta T + T_{\text{prop}} + T_{\text{код}} + T_{\text{декод}}. \quad (4.18)$$

Теорема доказана.

Задержка передачи видеопотока взаимодействия оператора и беспилотной системы T_3^B в КИО определяется как временная дельта между моментом отображения кадра видеопотока на ТО и реальным временем, соответствующим полетной обстановке, изображённой на кадре. Пусть кадр, отражающий полётную обстановку на момент времени $t + \Delta T$, был отображён на ТО к моменту $t + T_{\text{пред}}$, тогда задержка FPV-видеопотока при прогнозировании равна

$$\hat{T}_3^B = \min(T_{\text{пред}} - \Delta T; \Delta T + T_s + T_{\text{prop}} + T_{\text{код}}^B + T_{\text{декод}}^B). \quad (4.19)$$

В соответствии с (4.12) (2.37) можно представить в виде:

$$\hat{T}_p \approx T_s + T_{\text{prop}} + T_{\text{код}}^K + T_{\text{декод}}^K + \min(T_{\text{пред}} - \Delta T; \Delta T + T_s + T_{\text{prop}} + T_{\text{код}}^B + T_{\text{декод}}^B). \quad (4.20)$$

Если уменьшение сетевой задержки является эффективным, т.е. выполняется теорема 4.1, то (4.19) сводится к

$$\hat{T}_3^B = T_{\text{пред}} - \Delta T, \quad (4.21)$$

а (4.20) упрощается до

$$\hat{T}_p \approx T_s + T_{\text{prop}} + T_{\text{код}}^K + T_{\text{декод}}^K + T_{\text{пред}} - \Delta T. \quad (4.22)$$

Выражение (4.21) формально выглядит как устранение сетевой составляющей задержки, хотя физическая задержка сети не исчезает, а лишь «обходится» за счёт опережающего формирования контента.

Применение процедур предсказания (экстраполяции) видеопоследовательности приводит к компенсации сетевой составляющей задержки $T_{\text{сеть}}$ видеопотока взаимодействия оператора и беспилотной системы T_3^B в КИО, выделенной в выражении (2.31). Вследствие этого наблюдаемое уменьшение запаздывания носит не физический, а алгоритмический характер, что позволяет трактовать рассматриваемый подход как метод «псевдоуменьшения» сетевой задержки.

Дополнительно, при выполнении условия ($\hat{T}_3^B < 0$, $T_{\text{пред}} < \Delta T$) возникает режим, в котором оценка задержки видеопотока взаимодействия оператора и беспилотной системы принимает отрицательные значения, то есть кадр, показываемый в момент времени «сейчас», соответствует сцене «в будущем» относительно момента отображения. Такая ситуация невозможна для реальной передачи по сети и потому корректно интерпретируется как модельный эффект предсказания (псевдоуменьшение задержки), а не как физическое отрицательное запаздывание канала. Подобный результат принципиально недостижим для реальной сетевой задержки, поскольку последняя по своей природе не может быть меньше нуля и отражает причинно-следственную последовательность передачи и отображения данных.

Теорема 4.2. Условие упреждающего взаимодействия оператора и беспилотной системы.

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

$$T_{\text{пред}} < \Delta T - T_3^K. \quad (4.23)$$

Доказательство. FPV взаимодействие является упреждающим, когда момент времени полётной обстановки позже момента времени поступления КВО на основе данной полетной обстановки:

$$t + T_{\text{пред}} + T_s + T_{\text{prop}} + T_{\text{код}}^K + T_{\text{декод}}^K < t + \Delta T. \quad (4.24)$$

$$T_{\text{пред}} < \Delta T - T_3^K. \quad (4.25)$$

Тогда время рассинхронизации $\hat{T}_p < 0$. Теорема доказана.

В соответствии с теоремой 4.2, команды взаимодействия оператора поступают на БПЛА с временным опережением относительно фактического состояния полётной обстановки. Это означает, что результирующая задержка в контуре FPV приобретает отрицательное значение, отражая эффект предвосхищения воздействий.

Для выполнения условий теорем 4.1 и 4.2 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. Использование именно двух кадров обусловлено как необходимостью снижения вычислительной нагрузки и временных затрат, так и динамическим характером полётной сцены, вследствие чего ранее полученные изображения быстро теряют актуальность. Как показано выше, включение в процесс предсказания исторических видеокadres приводит к деградации качества прогнозируемого кадра.

Пусть поток видеоданных поступает на ТО с интенсивностью FPS. Тогда временной интервал между последовательными кадрами Δt составляет

$$\Delta t = \frac{10^3}{\text{FPS}} \text{ мс.} \quad (4.26)$$

Каждый поступающий кадр помещается в буфер предсказания длиной B (рис. 4.16), 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 FPV-видеопотока в пределах временного диапазона $3\Delta T$ 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.

$$\Delta T = t_i - (t_i - \Delta T). \quad (4.27)$$

Восстановленный и поступивший в буфер предсказания во время

$$t_{\text{buff}} = t_i + T_3^B. \quad (4.28)$$

кадр видеопотока соответствует кадру полётной обстановки x_i во время t_i . Полётную обстановку во время $t_i - \Delta T$ описывает кадр x_{i-d} , где

$$d = \frac{\Delta T}{\Delta t}. \quad (4.29)$$

Полётную обстановку во время $t_i + \Delta T$ описывает кадр x_{i+d} . Буфер кадров B размером $B=d+1$ содержит кадры $\{x_{i-d}, x_{i-d+1}, \dots, x_i\}$ (рис. 4.16).

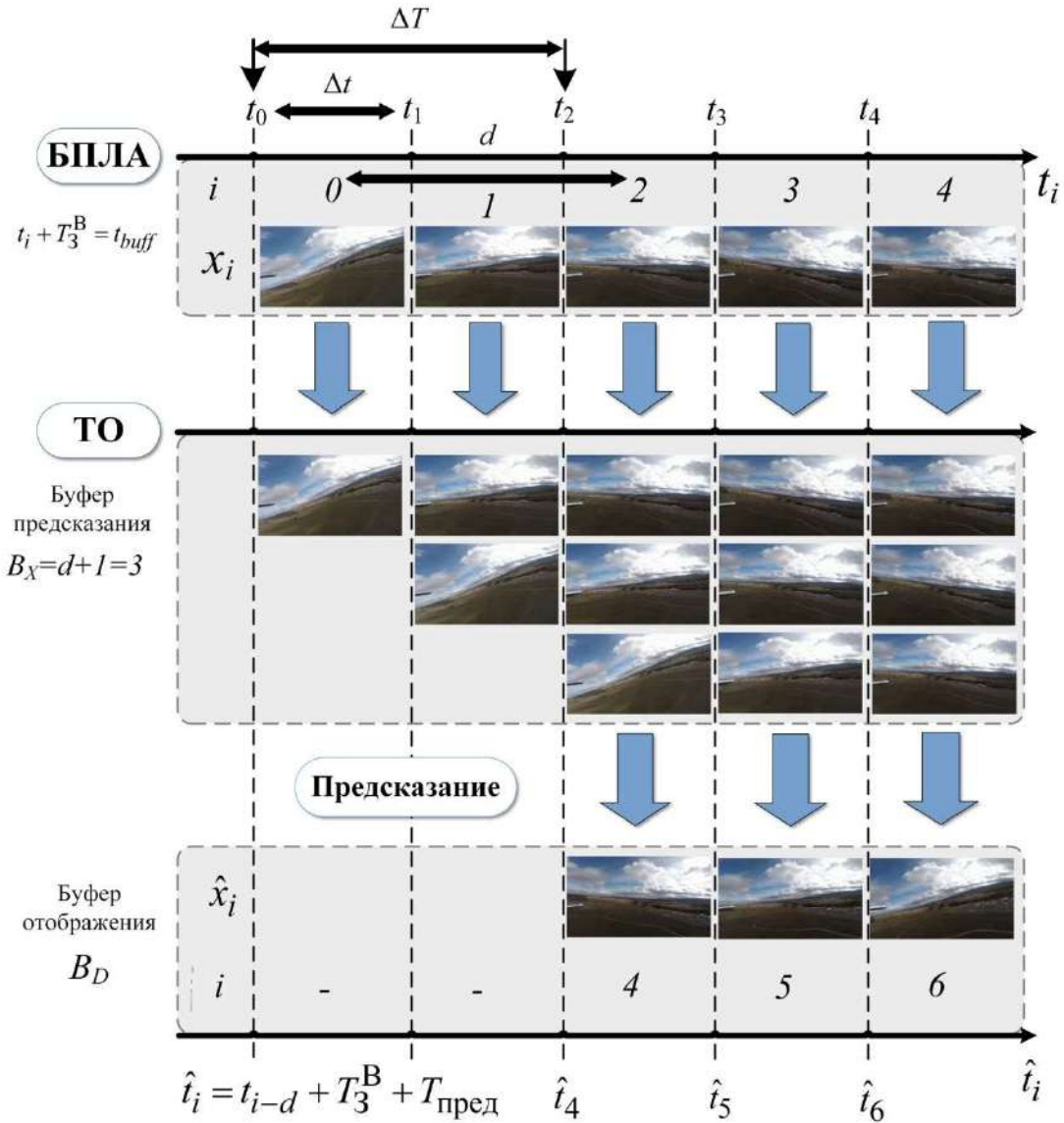


Рисунок 4.16 – Схема работы метода предсказания кадров видеопотока

После предсказания кадры поступают в буфер отображения в момент времени

$$\hat{t}_i = t_{i-d} + T_3^B + T_{\text{пред}}. \quad (4.30)$$

Текущие кадры в буфере отображения обозначаются как $\hat{x}_i$ с индексами $\hat{i}$. Предсказываемый кадр $\hat{x}_i$ соответствует полётной обстановке на момент $t_i = t_{i-d} + \Delta T$.

Теорема 4.3. Формализация индексации.

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = d \in \mathbb{N}. \quad (4.31)$$

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

Доказательство. Для предсказания кадра x_{i+d} используется пара опорных кадров x_{i-d} и x_i , где i – индекс текущего момента дискретизации по кадрам, а d – параметр временного смещения (горизонт предсказания). Индексация кадров задаётся на множестве неотрицательных целых чисел $i \in \mathbb{Z} \geq 0$, соответственно, все используемые индексы также должны принадлежать $\mathbb{Z} \geq 0$. Из этого следует ограничение применимости метода по начальным условиям: для корректного использования кадра x_{i-d} необходимо выполнение $i - d \geq 0$, то есть

$$i \geq d. \quad (4.32)$$

Вычислительная реализуемость предсказания в поточном режиме дополнительно требует, чтобы к моменту формирования оценки x_{i+d} оба опорных кадра x_{i-d} и x_i были доступны на СО (то есть поступили и могут быть использованы алгоритмом). Параметр d в рамках рассматриваемой постановки принимается целочисленным и неотрицательным, $d \in \mathbb{Z} \geq 0$, поскольку отрицательные значения приводят к перестановке ролей «прошлого» и «будущего» и выходят за пределы задачи прогнозирования.

Частный случай ($d=0$) является вырожденным: предсказываемый кадр x_{i+d} совпадает с текущим кадром x_i , а потому не представляет собой прогноз будущего состояния видеопотока. Следовательно, в дальнейшем целесообразно рассматривать только невырожденный режим предсказания при $d \in \mathbb{N}$, т.е. $d \geq 1$ при соблюдении ограничения (4.32), обеспечивающего корректность индексации и наличие требуемых опорных кадров:

$$x_{i-d} = x_i = x_{i+d} \quad i \geq d. \quad (4.33)$$

Следовательно, практический интерес представляют только те ситуации, в которых метод предсказания будущих кадров видеопотока не вырождается, то есть при

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = d \in \mathbb{N} \quad (4.34)$$

Теорема доказана.

Этап инициализации метода предсказания будущих кадров осуществляется до момента наступления времени $\hat{t} < t_0 + T_3^B + T_{\text{пред}}$, где t_0 — начальный момент отсчёта. На данном этапе выполняется заполнение буфера предсказания B , обеспечивающего хранение информации, требуемой для дальнейшего вычисления прогнозируемых кадров. Поскольку корректные предсказанные кадры в этот период не гарантируются (вследствие неполной инициализации состояния B), кадры видеопотока на этапе инициализации на устройство отображения не выводятся.

После достижения момента $\hat{t}$ система переходит в рабочий режим, в котором буфер B считается сформированным в объёме, достаточном для применения предсказания. В рабочем режиме предсказанные кадры видеопотока подаются на отображение дискретно с постоянным шагом по времени Δt , т.е. с периодом обновления, равным Δt между соседними выводимыми предсказанными кадрами. Указанная периодичность Δt тем самым задаёт интенсивность отображения (частоту обновления), определяющую темп визуализации результатов предсказания.

Теорема 4.4. Граничные условия.

Метод предсказания будущих кадров видеопотока является применимым при выполнении следующих необходимых условий:

1. Ограничение по вычислительной производительности блоков кодирования и предсказания

$$T_{\text{декод}}^B + T_{\text{пред}} \leq \Delta t, \quad T_{\text{код}} \leq \Delta t. \quad (4.35)$$

2. Ограничение по пропускной способности тракта декодирования при входной интенсивности FPS

$$T_{\text{декод}} \leq \frac{1}{\text{FPS}}. \quad (4.36)$$

Если декодирование и предсказание выполняются на одном и том же графическом ускорителе и не могут исполняться параллельно (ресурс используется последовательно), то условие 2 усиливается до:

$$T_{\text{декод}} + T_{\text{пред}} \leq \frac{1}{\text{FPS}}. \quad (4.37)$$

Доказательство. Рассмотрим требование выдачи (и, при необходимости, отображения) прогнозируемых кадров с периодом Δt . При $T_{\text{декод}}^B + T_{\text{пред}} > \Delta t$ блок вычисления не способен формировать результаты с заданной периодичностью, вследствие чего выдача кадров на СО с шагом Δt становится невозможной. В этом режиме фактическая частота формирования кадров ограничивается сверху производительностью кодирования кадров на стороне БПЛА и составляет

$$\widehat{\text{FPS}} = \frac{10^3}{T_{\text{код}}^B} \text{ (к/с)}. \quad (4.38)$$

Следовательно, при $T_{\text{код}} > \Delta t$ модель функционирования с фиксированным периодом Δt неприменима. Для восстановления применимости требуется корректировка входного параметра Δt (эквивалентно – снижение требуемой частоты выдачи $\text{FPS} = \widehat{\text{FPS}}$) так, чтобы выполнялось $T_{\text{код}} \leq \Delta t$.

Далее рассмотрим ограничения, связанные с декодированием. Пусть два последовательных кадра x_i и x_{i+1} уже поступили на СО, однако к моментам, соответствующим началу «окна» декодирования, ещё не декодированы, а именно в моменты $t_{\text{buff}(i)} - T_{\text{декод}}^B$ и $t_{\text{buff}(i+1)} - T_{\text{декод}}^B$, где $t_{\text{buff}(k)}$ — момент, к которому кадр x_k должен быть доступен в декодированном виде (в буфере).

$$\hat{t}_{i+d} = (t_{\text{buff}(i)} - T_{\text{декод}}^B) + T_{\text{декод}}^B + T_{\text{пред}}, \quad (4.39)$$

$$\hat{t}_{i+1+d} = (t_{\text{buff}(i+1)} - T_{\text{декод}}^B) + T_{\text{декод}}^B + T_{\text{пред}}. \quad (4.40)$$

При постоянной входной интенсивности видеопотока FPS выполняется соотношение межкадрового интервала поступления:

$$\hat{t}_{i+1+d} = \hat{t}_{i+d} + \Delta t, \quad (4.40)$$

$$(t_{\text{buff}(i+1)} - T_{\text{декод}}^B) + T_{\text{декод}}^B + T_{\text{пред}} = (t_{\text{buff}(i)} - T_{\text{декод}}^B) + T_{\text{декод}}^B + T_{\text{пред}} + \Delta t. \quad (4.41)$$

Чтобы обеспечить декодирование каждого кадра до соответствующего момента $t_{buff}(\cdot)$ без накопления очереди, необходимо, чтобы длительность

декодирования не превышала межкадровый интервал, то есть $T_{\text{декод}} \leq \frac{1}{\text{FPS}}$. При

$T_{\text{декод}} > \frac{1}{\text{FPS}}$ указанное условие нарушается, очередь декодирования неизбежно растёт, и тем самым обеспечить своевременную доступность кадров для предсказания (и дальнейшей выдачи) невозможно.

В случае, когда декодирование выполняется с использованием графического ускорителя и тот же ускоритель последовательно выполняет операции декодирования (длительностью $T_{\text{декод}}$) и предсказания (длительностью $T_{\text{пред}}$), декодирование кадра x_{i+1} может начаться только после завершения предсказания, запущенного по результатам декодирования кадра x_i . Тем самым момент старта декодирования x_{i+1} сдвигается как минимум на величину $T_{\text{пред}}$, и необходимое условие своевременности принимает вид:

$$t_{buff(i+1)} - T_{\text{декод}} \geq t_{buff(i)} + T_{\text{пред}}. \quad (4.42)$$

С учётом

$$t_{buff(i+1)} - t_{buff(i)} = \frac{1}{\text{FPS}} \quad (4.43)$$

получаем усиленное ограничение (4.37). Следовательно, при последовательном использовании одного ускорителя для декодирования и предсказания декодирование кадра x_{i+1} сможет начаться только во время

$$\hat{t}_{i+d} = (t_{buff(i)} - T_{\text{декод}}^B) + T_{\text{декод}}^B + T_{\text{пред}} > t_{buff(i)} + \Delta t. \quad (4.44)$$

В этом случае для применения метода необходимо пересмотреть начальное условие:

$$\text{FPS} = \widehat{\text{FPS}} = \frac{10^3}{T_{\text{декод}}^B + T_{\text{пред}}} \quad (4.45)$$

Теорема доказана.

Экспериментальная верификация метода предсказания будущих кадров

Одним из ключевых этапов разработки и внедрения алгоритмов предсказания видеоданных является их экспериментальная верификация, позволяющая подтвердить эффективность метода в условиях, приближенных к реальной динамике FPV. Достоверность и воспроизводимость результатов моделирования во многом зависят от корректного выбора экспериментальных параметров, объективных метрик оценки качества, а также устойчивости модели к изменению характеристик FPV-видеопотока. В настоящем разделе представлена детализированная экспериментальная апробация предложенного метода на основе нейросетевой архитектуры DMVFN. Целью является количественная оценка перцептивного качества предсказанных кадров на различных временных интервалах и установление зависимости точности прогнозирования от уровня динамичности FPV-видео.

В рамках проведённого исследования была осуществлена экспериментальная верификация разработанного метода предсказания будущих кадров, включающая два этапа: оценку качества предсказанных кадров и анализ зависимости между динамикой сцены и точностью прогнозирования. Экспериментальные исследования имели целью подтвердить корректность функционирования нейросетевой модели DMVFN и выявить закономерности изменения объективных метрик качества изображения в зависимости от параметров эксперимента.

На первом этапе выполнялась серия экспериментов, направленных на количественную оценку качества предсказанных кадров по сравнению с реальными данными. Для этого на вход модели DMVFN подавались последовательности кадров x_{i-d} и x_i , на основе которых осуществлялось формирование прогнозируемых кадров $\hat{x}_{i+d}$ разрешением HD (1280×720) [455]. После генерации предсказанные изображения сравнивались с эталонными кадрами x_{i+d} , соответствующими состоянию сцены в момент времени $t_i + \Delta T$.

Исходные параметры модели и экспериментальные условия фиксировались и сохранялись неизменными на протяжении всех серий испытаний для обеспечения воспроизводимости полученных результатов:

$$FPS = 25, \Delta t = \frac{1000}{FPS} = 40(\text{мс}). \quad (4.46)$$

Параметры экспериментов:

$$\Delta T \in \{40, 80, 120, \dots, 1000\}(\text{мс}), d \in \{1, 2, 3, \dots, 25\}, B \in \{2, 3, 4, \dots, 26\}. \quad (4.47)$$

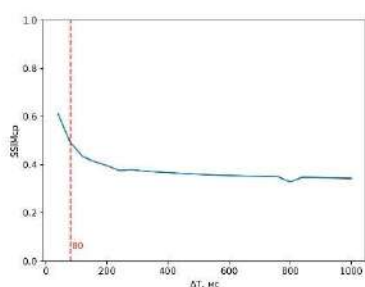
Оценка качества предсказанных кадров проводилась по трём стандартным объективным метрикам – SSIM, DISTS и PSNR. Для каждой метрики вычислялись средние значения и среднеквадратические отклонения по ключевым выборкам данных. Полученные результаты показали (табл. 4.4, рис. 4.17), что увеличение временного интервала ΔT приводит к снижению точности предсказаний: средние значения SSIM и PSNR демонстрируют уменьшение, а значения DISTS – возрастание. Данное поведение объясняется тем, что при больших значениях ΔT наблюдается возрастание динамичности сцены, что существенно затрудняет корректное восстановление структуры изображений и отрицательно влияет на качество синтезируемых кадров.

На втором этапе исследований проводился анализ взаимосвязи между динамикой видеопотока и качеством предсказаний. Было установлено, что между средними значениями метрик качества ($DISTS_{\text{ср}}$, $SSIM_{\text{ср}}$, $PSNR_{\text{ср}}$) и величиной ΔT существует устойчивая зависимость. При увеличении числа предсказываемых кадров наблюдается тенденция к асимптотическому выравниванию метрик по всему видеопотоку, что отражает достижение моделью предельных возможностей предсказания. Зафиксированные предельные значения составляют $SSIM \approx 0,34$, $DISTS \approx 0,2508$ и $PSNR \approx 28,00$ (рис. 4.17). При предсказании кадров видеопотока значения метрики DISTS порядка 0,2 уже являются большими и отражают плохое перцептивное качество предсказанных кадров. Таким образом, установлено, что при росте временного горизонта качество синтезированных кадров ухудшается, приближаясь к

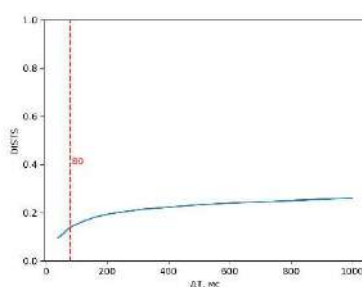
статистически устойчивым значениям, определяющим нижнюю границу точности используемого метода.

Таблица 4.4 – Изменение метрик качества в зависимости от ΔT

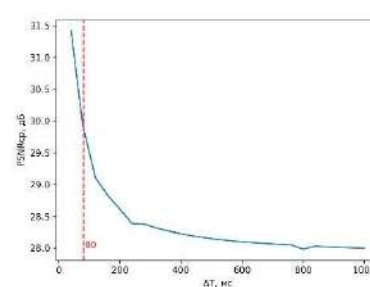
d	ΔT	SSIM _{ср}	σ_{SSIM}	DISTS _{ср}	σ_{DISTS}	PSNR _{ср}	σ_{PSNR}
1	40	0,61	0,17	0,0967	0,06	31,42	3,08
2	80	0,49	0,14	0,1400	0,06	29,89	2,38
3	120	0,43	0,11	0,1639	0,06	29,11	1,65
4	160	0,41	0,09	0,1819	0,05	28,83	1,29
5	200	0,40	0,08	0,1937	0,05	28,61	0,97
6	240	0,38	0,06	0,2023	0,05	28,38	0,49
7	280	0,38	0,06	0,2088	0,05	28,38	0,57
8	320	0,37	0,06	0,2161	0,05	28,31	0,51
9	360	0,37	0,06	0,2194	0,05	28,27	0,47
10	400	0,37	0,06	0,2237	0,04	28,23	0,43
11	440	0,36	0,05	0,2281	0,04	28,19	0,40
12	480	0,36	0,05	0,2319	0,04	28,16	0,37
13	520	0,36	0,05	0,2356	0,04	28,14	0,34
14	560	0,36	0,05	0,2382	0,04	28,12	0,33
15	600	0,35	0,05	0,2409	0,04	28,10	0,32
16	640	0,35	0,05	0,2432	0,04	28,08	0,31
17	680	0,35	0,05	0,2447	0,04	28,07	0,29
18	720	0,35	0,05	0,2468	0,04	28,06	0,29
19	760	0,35	0,05	0,2488	0,04	28,05	0,28
20	800	0,33	0,04	0,2508	0,04	27,98	0,11



а) SSIM



б) DISTS



в) PSNR

Рисунок 4.17 – Изменение среднего значения метрик качества

Следует отметить, что низкие значения SSIM указывают на существенное структурное искажение предсказанных кадров на уровне пикселей по сравнению с реальными. На диапазоне 40–120 мс (или 40-80 мс в зависимости от интенсивности видеопотока) мс значения метрики DISTS умеренны, но резко

возрастают. После этого значения DISTS выходят на высокий уровень, и предсказание кадров видеопотока становится затруднительным.

При фиксированном значении $\Delta T=40$ мс были построены зависимости (рис. 4.18) изменения метрик SSIM, DISTS и PSNR, отражающие различие между прогнозируемыми кадрами (между $\hat{x}_i$ и x_i), а также реальными кадрами (между x_i и x_{i-1}).

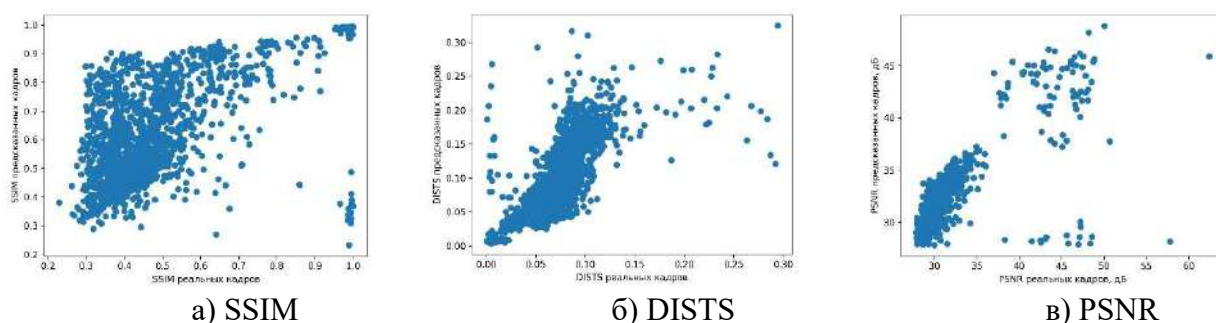


Рисунок 4.18 – Разброс значений метрик качества предсказанных и реальных видеокадров

Корреляционный анализ изменений указанных метрик показал наличие умеренной связи между динамикой сцен и качеством предсказаний. Вычисленные коэффициенты корреляции Пирсона составили 0,60 для SSIM, 0,74 для DISTS и 0,79 для PSNR. Полученные значения подтверждают существование статистически значимой зависимости между изменчивостью видеоряда и точностью предсказаний модели. В частности, при меньшей динамичности исходного видеоряда предсказанные кадры оказываются ближе к реальным, что подтверждает способность модели более точно воспроизводить менее изменяющиеся сцены. Напротив, повышение динамики приводит к заметному снижению метрик качества и, следовательно, к возрастанию расхождений между прогнозируемыми и действительными кадрами.

Таким образом, экспериментальная верификация разработанного метода подтвердила его работоспособность и позволила выявить ключевые факторы, ограничивающие точность прогнозирования. Результаты анализа могут быть использованы для адаптации параметров модели DMVFN к задаче FPV с учётом его динамических характеристик.

Похожий метод для предсказания тактильных ощущений в «Haptic-кодеках» рассмотрен в диссертационной работе Владимирова С. С. «Разработка и исследование комплекса методов уменьшения сетевой задержки и идентификации объектов для сетей связи пятого и последующих поколений» [471]. В данном методе рассматриваются три группы параметров: воздействия от оператора X , воздействия на оператора A и воздействия от объекта Y . Они образуются множеством сигналов: $x_i(t)$, $x_j(t)$ – сигналы изменения выходных и дополнительных параметров множества X со стороны оператора, и $y_i(t)$ и $y_j(t)$ – множества Y со стороны объекта. Предсказание тактильных ощущений сводится к аппроксимации тактильного отклика a_i на основе интерполяционной формулы Эрмита [471]:

$$a_i = F_i(y_i) \cdot \text{sync}(y_i) = F_i(y_i) \cdot \frac{\sin(k\pi y_i)}{k\pi y_i}$$

Между методом, представленным в данной работе, и методом уменьшения задержки в системах тактильного интернета существует несколько отличий.

1. Метод уменьшения задержки в системах тактильного интернета рассматривается с точки зрения аппроксимации сигнала тактильного ощущения. В свою очередь метод уменьшения задержки при FPV взаимодействии рассматривается с точки зрения пиксельного пространства кадров видеопотока.

2. Метод уменьшения задержки в системах тактильного интернета использует аппроксимацию сигнала тактильного ощущения на основе интерполяционной формулы Эрмита. В свою очередь предлагаемый метод использует нейронную сеть DMVFN.

3. Метод уменьшения задержки Владимирова С. С. применяется в системах тактильного интернета, в то время как метод, представленный в настоящей диссертации, – при взаимодействии оператора с беспилотной системой, где полиномиальной аппроксимации кадров FPV-видеопотока, представляющих собой трёхмерные тензоры, недостаточно.

4.3 Выводы по главе 4

1. Проведённый анализ корреляционных характеристик тензоров латентного пространства признаков вариационного автокодировщика нейросетевого кодека выявил закономерности пространственно-временной организации видеопоследовательностей. Коэффициенты автокорреляции значений тензоров видеокадров демонстрируют монотонное убывание с 0,52 при лаге $l=1$ и до 0,28 при лаге $l=10$, с резким спадом при $l \geq 5$, что свидетельствует о статистически значимой зависимости между последовательными кадрами FPV-видеопотока, представленными во внутреннем ЛПП. Выявлена пространственная корреляция значений ЛПП, максимальная для соседних элементов с расстоянием по метрике Манхэттена ≤ 3 в многомерном пространстве признаков.

2. Разработан метод предсказания будущих кадров, который впервые решает задачу уменьшения не только задержки сериализации и задержки в очередях, но и задержки распространения цифрового FPV-видеопотока в физической среде передачи, что является непреодолимым барьером традиционных технологий. Эксперименты по предсказанию кадров FPV-видеопотока показали, что в условиях высокодинамичного видеопотока с помощью нейросетевой модели DMVFN возможно уменьшение задержки видеопотока на 40 мс, а в относительно статические моменты времени до 80-120 мс.

3. Формализовано четыре теоремы (условие эффективности сокращения задержки, условие упреждающего взаимодействия оператора с беспилотной системой, формализация индексации и граничные условия), устанавливающие необходимые и достаточные условия эффективности разработанного метода.

4. Представленный метод позволяет сократить задержки передачи цифрового FPV-видеопотока на 18-40% через спутниковые сети на НОО и на 5-30% через спутниковые сети на ГСО. Достигнутый уровень

производительности (29,92 мс/кадр) обеспечивает практическую реализуемость в реальном времени на стандартных графических ускорителях.

5. Качество кадров FPV-видеопотока умеренно коррелирует с динамичностью FPV-видеопотока в соответствии с коэффициентами корреляции Пирсона. Наиболее коррелирует качество метрик DISTS (0,74) и PSNR (0,79), измеренных между: предсказанными и реальными кадрами; реальными и предыдущими реальными кадрами. Это подтверждает взаимосвязь между динамичностью FPV-видеопотока и перцептивным качеством предсказания. При этом PSNR целесообразно использовать по причине наиболее высокой корреляции с динамичностью FPV-видеопотока.

6. Проведённая экспериментальная апробация позволила подтвердить адекватность разработанного метода и определить факторы, влияющие на его предсказательную способность. Полученные результаты демонстрируют зависимость качества прогнозируемых кадров от временного интервала ΔT и степени динамичности FPV-видеопотока. Выявленные закономерности подтверждают, что нейросетевая модель DMVFN обеспечивает высокое качество прогнозирования на коротких временных отрезках и сохраняет приемлемую устойчивость при умеренной динамике сцены. При этом рост временного горизонта предсказания приводит к структурным искажениям и возрастанию ошибок, что согласуется с известными ограничениями методов краткосрочного предсказания видео.

ГЛАВА 5. СЖАТИЕ И АГРЕГАЦИЯ КОМАНД ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПЕРАТОРА С БЕСПИЛОТНЫМИ СИСТЕМАМИ В КАНАЛАХ С ОГРАНИЧЕННОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ

В рамках диссертационного исследования рассмотрены теоретические и прикладные аспекты оптимизации процессов передачи данных при взаимодействии оператора и беспилотной системы. В состав таких систем входят три ключевых информационных компонента: видеопоток, телеметрическая информация и команды взаимодействия оператора с беспилотной системой (команды движения БПЛА). Видеопоток, будучи наибольшим по объёму данных, требует значительной полосы пропускания канала, тогда как телеметрия и КВО занимают существенно меньшую полосу. Тем не менее, в условиях ограниченного радиочастотного и сетевого ресурса, характерного для БПЛА, целесообразно применение специализированных алгоритмов сжатия и помехоустойчивого кодирования даже для этих типов данных. Настоящая глава посвящена исследованию и обоснованию методов интеллектуального сжатия на базе нейросетевых моделей и кодов коррекции ошибок.

В процессе исследования разработаны два взаимосвязанных подхода:

- метод нейросетевого сжатия телеметрических данных с применением двоичных циклических кодов БЧХ (Боуза-Чоудхури-Хоквингема);
- нейросетевой кодек для сжатия и передачи команд взаимодействия оператора с применением недвоичных циклических кодов Риды-Соломона.

Оба подхода основаны на совмещении свойств нейросетевых автокодировщиков и помехоустойчивых кодов, что обеспечивает одновременное уменьшение объёма передаваемой информации за счет ее преобразование в ЛПП и повышение достоверности её приёма в условиях ошибок при восстановлении из ЛПП. Такая комбинация является особенно эффективной при передаче по каналам с ограниченной пропускной способностью, где процесс декомпрессии сильно сжатого ЛПП должен сопровождаться коррекцией искажений, накопленных за счет отсутствия

высокочастотной информации внутри ЛПП нейронной сети.

5.1 Метод сжатия и агрегации КВО

Передаваемая по каналам телеметрическая информация характеризуется высокой избыточностью, корреляцией параметров и зачастую избыточной частотой обновления. Это создает предпосылки для применения алгоритмов сжатия данных, обеспечивающих устранение избыточных компонент без потери ключевых характеристик, необходимых для принятия решений оператором. В работах [466-470] рассматривалось сжатие телеметрии БАС на основе совместного применения нейронных сетей (прямого распространения и Хэминга) и помехоустойчивых кодов БЧХ. Так при 1 нейроне в скрытом слое точность восстановления бит данных составил 72,31%, при 2 нейронах – 86,93%, 3 нейронах – 93,64% и 4 нейронов – 99,57% для кода БЧХ (15, 11).

Продолжая рассмотрение архитектур для сжатия данных телеметрии и КВО, в настоящем разделе представлено описание нейросетевого кодека команд взаимодействия оператора (НККВО), предназначенного для сжатия и последующего восстановления команд протоколов управления CRSF (*аббр. от англ. Crossfire Serial Protocol*) и MavLink (*аббр. от англ. Micro Air Vehicle Link*). Исследование направлено на повышение эффективности передачи КВО посредством внедрения нейросетевых механизмов компрессии с контролируемым уровнем потерь и коррекции ошибок.

5.1.1 Нейросетевой кодек КВО

На рисунке 5.1 представлены структурные схемы кодера и декодера нейросетевого кодека НККВО, которые реализуют предложенный метод преобразования.

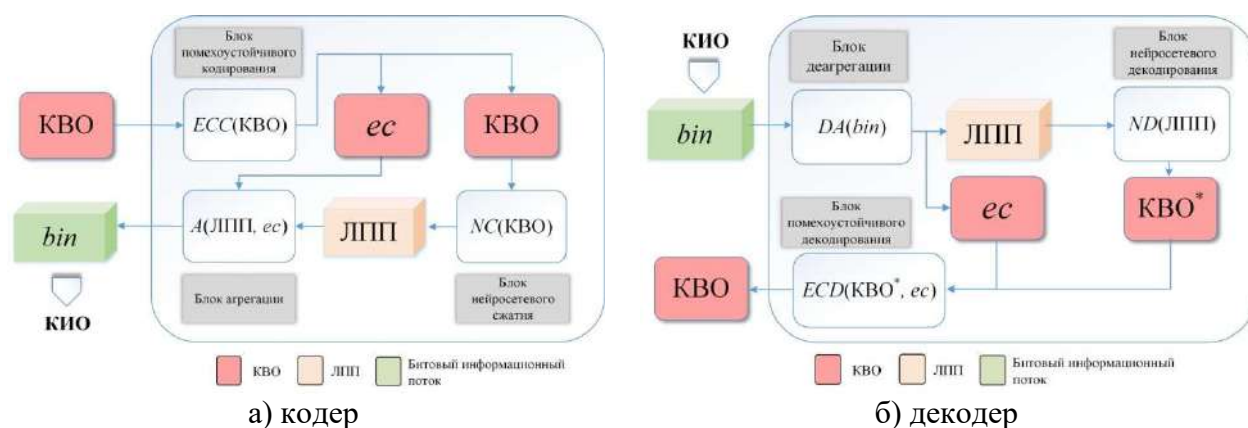


Рисунок 5.1 – Кодек НККВО

НККВО основан на комбинации трёх ключевых компонентов: нейросетевого автокодировщика, блока помехоустойчивого кодирования и механизма агрегации. Данная архитектура обеспечивает устойчивость передачи КВО при одновременном сокращении объёма передаваемых данных. Концептуальная основа метода заключается в кодировании КВО в компактное представление в ЛПП нейронной сети с механизмом защиты от ошибок помехоустойчивым кодом Рида-Соломона на передающей стороне с последующим восстановлением исходных параметров на борту БПЛА.

Модуль нейросетевого автокодировщика NC реализован на основе архитектуры нейронной сети типа «автокодировщик», что обеспечивает возможность обучения модели эффективному сжатию входных данных с заданной степенью потерь. В качестве входных параметров в блок автокодировщика NC подаются величина C_{len} – длина входных данных, и коэффициент сжатия K_{rate} , определяющий компромисс между степенью уменьшения объёма данных и допустимым уровнем ошибок. Бинарная последовательность КВО преобразуется в тензор значений типа $uint8$, после чего выполняется конвертация в формат $float16$ посредством масштабирования значений в диапазон $[-1; 1]$. Это позволяет адаптировать данные к диапазону активации нейронной сети, обеспечивая численную стабильность при обучении и инференсе. На выходе формируется тензор $LPP = NC(KVO)$, представляющий собой сжатое представление КВО во внутреннем ЛПП. Результирующий тензор преобразуется обратно в формат $uint8$ с масштабированием значений на

интервал $([0; 255])$, что обеспечивает совместимость формата данных с последующими блоками обработки. Экспериментальные данные показали, что варьирование параметра K_{rate} оказывает заметное влияние на степень сжатия и точность восстановления, формируя зависимость между метриками скорости кодирования и точности декодирования.

Ключевую роль в структуре кодера (рис. 5.1a) играет блок помехоустойчивого кодирования ECC , который обеспечивает надёжность преобразования бинарной последовательности КВО путём добавления избыточных данных, необходимых для последующего восстановления ошибок. Применение ECC обусловлено тем, что использование нейросетевых моделей компрессии неизбежно вызывает искажения данных, которые недопустимы при передаче сигналов взаимодействия оператора. На выходе блока ECC формируется два информационных потока: кодированная бинарная последовательность КВО, направляемая на блок нейросетевого кодирования NC , и тензор проверочных символов ec , передаваемый на блок агрегации A . Пример структуры кодовых слов, сформированных для различных протоколов взаимодействия оператора и беспилотной системы, представлен на рис. 5.2.

В ходе экспериментов бинарная последовательность КВО была представлена в виде тензоров типа $uint8$, где каждому элементу соответствовал один байт данных КВО соответствующего протокола. Для кодирования таких последовательностей использовался блочный подход с предположением независимости ошибок между блоками.

При этом было выявлено, что при длине КВО $C_{len}=K=64$ байта (например, в протоколе CRSF) и общей длине кода $N=255$ над полем Галуа $GF(2^8)$, целесообразно использовать укороченные коды Рида–Соломона [471], которые получаются из стандартных (N, K) кодов путем удаления старших информационных символов, что позволяет адаптировать длину кодового слова под размер данных без потери корректирующей способности $t = \frac{N - K}{2}$, где t – количество исправляемых кодом ошибок (рис. 5.2a):

$$(N - i, K - i), i = 2k - 1, \text{ где } k \in \mathbb{Z} \cap [1, t]. \quad (5.1)$$

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 параметрами $K=[60; 254]$, где $ecclen$ изменяется в диапазоне $[2; 190]$. Результаты экспериментов показали, что дальнейшее увеличение $ecclen$ нецелесообразно ввиду уменьшения степени сжатия КВО CR менее -200%.

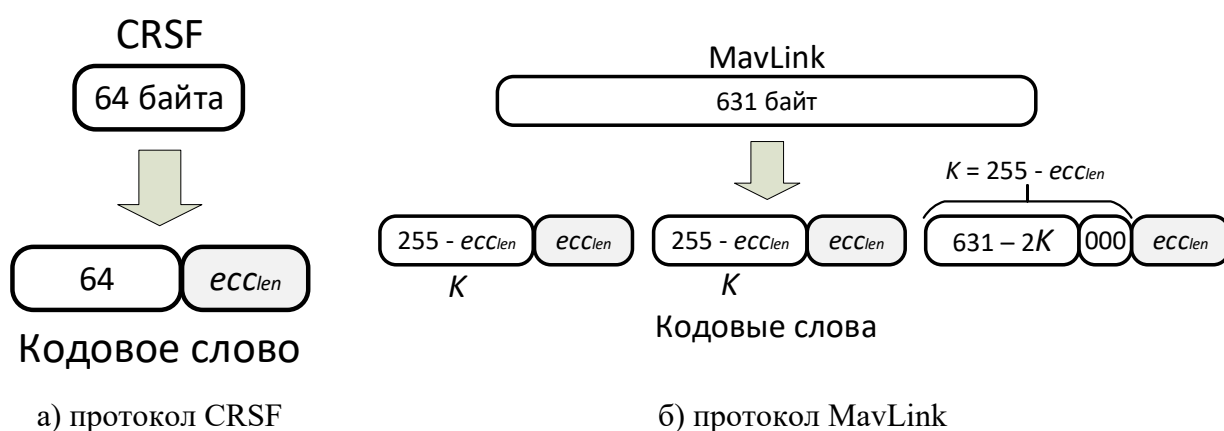


Рисунок 5.2 – Структура кодовых слов протоколов взаимодействия оператора и беспилотной системы при сжатии

В случаях, когда длина последовательности КВО превышает C_{len} , длина кодового слова фиксируется на уровне $N=255$. Если длина КВО короче, последовательность разбивается на блоки, при необходимости дополняемые нулями до требуемой длины K . На выходе блока помехоустойчивого кодирования ECC формируется бинарная последовательность КВО, которая далее поступает на блок нейросетевого кодирования NC , и тензор проверочных символов (байтов) кода Рида-Соломона $ec=ECC(KVO)$ (рис. 5.2б) (поступает на блок агрегации A).

Назначением блока агрегации A является объединение множества тензоров ЛПП и массивов байтов коррекции ошибок ec в единую бинарную последовательность агрегированных данных bin . Данный процесс обеспечивает структурированное формирование потоков передачи, минимизируя накладные

расходы при последующем декодировании. На выходе блока формируется бинарная последовательность агрегированных КВО $bin=A(ЛПП,ес)$, которая представляет собой объединение ЛПП и $ес$ в бинарном виде.

Рассматриваемый далее нейросетевой декодер КВО, размещённый на борту БПЛА (рис. 5.16), включает несколько функциональных компонентов: модуль деагрегации DA , нейросетевой декодер ND и блок помехоустойчивого декодирования ECD . В блоке деагрегации $DA(bin)$ выполняется обратное выделение компонентов из бинарных последовательностей агрегированных КВО bin : извлекаются тензоры ЛПП и массивы байтов коррекции ошибок $ес$. Полученные тензоры ЛПП направляются на блок нейросетевого декодирования ND , а тензоры $ес$ подаются в блок помехоустойчивого декодирования ECD .

Блок нейросетевого декодирования ND предназначен для восстановления исходных КВО из сжатого ЛПП. В данном модуле применяется декодирующая часть автокодировочной нейронной сети, обеспечивающая восстановление КВО с заданным уровнем точности. На вход ND поступает тензор ЛПП типа данных $uint8$, который предварительно преобразуется в формат $float16$ с масштабированием значений на интервал $([-1; 1])$, аналогично операции кодирования. На выходе формируется декодированный тензор КВО, приводимый к диапазону $([0; 255])$ и типу данных $uint8$.

Блок помехоустойчивого декодирования ECD предназначен для исправления ошибок, возникших на этапах сжатия и декомпрессии КВО блоком ND . При этом возможны случаи ошибок восстановления, возникающие в ситуациях, когда количество искажений превосходит корректирующие способности используемого помехоустойчивого кода. Входными данными ECD служат тензор декодированных команд КВО* и соответствующий тензор проверочных символов $ес$. На выходе формируется итоговая бинарная последовательность восстановленных КВО= $ECD(КВО^*,ес)$, обеспечивающая требуемый уровень достоверности. Анализ результатов декодирования показал, что использование помехоустойчивого кода Рида–Соломона позволяет

существенно снизить вероятность деградации КВО при высоких уровнях ошибок восстановления ЛПП.

В обобщённом виде входные параметры нейросетевого кодера НККВО включают: длину КВО C_{len} , длину проверочных символов $ecclen$, полную длину используемого кода N , а также параметр нейронной сети K_{rate} , определяющий степень сжатия. Аналитический анализ продемонстрировал, что данные параметры оказывают комплексное влияние на характеристики системы: время кодирования t_C (мс) и декодирования t_{DC} (мс), процентную долю необратимых ошибок LR (аббр. от англ. loss rate, доля ошибок) (%) и степень сжатия CR (аббр. от англ. compress rate, степень сжатия) (%). Наблюдается тенденция к возрастанию CR при увеличении K_{rate} с одновременным умеренным ростом ошибок восстановления, что свидетельствует о необходимости оптимального выбора компромисса между степенью сжатия и устойчивостью передачи.

5.1.2 Архитектура нейросетевой модели для сжатия КВО

В рамках настоящего исследования рассматривается архитектура НККВО, который обеспечивает сжатие КВО посредством переменной размерности ЛПП, зависящей от используемого протокола передачи. В частности, входными параметрами модели выступают длина КВО C_{len} и коэффициент сжатия K_{rate} , выбор которого задаётся диапазоном значений соответствующего интервала $K_{rate} \in \{[1; 2), [2; 4), [4; 8)\}$ и фиксированным значением $K_{rate}=8$. Архитектура нейронной сети вида «автокодировщик», предназначенной для сжатия и декомпрессии КВО (НСККВО – нейронная сеть кодирования команд взаимодействия оператора), представляет собой сеть с динамически генерируемыми размерностями (рис. 5.3).

НСККВО базируется на нейронной сети НСВБП (рис. 3.29), которая использовалась в восстановлении бинарной последовательности после маскирования (раздел 3.1.3).

Соответственно, входными параметрами модели являются параметр сжатия K_{rate} и длина КВО C_{len} . Таблица 5.1 устанавливает соответствие K_{rate} параметрам слоя максимального пулинга $k1$ и $k2$. Слой пулинга (от англ. Pooling Layer, слой пулинга) – это слой в сверточной нейронной сети, который используется для уменьшения пространственной размерности (ширины и высоты) карт признаков.

Таблица 5.1 – 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
$CR, \%$	0	50	75	87,5

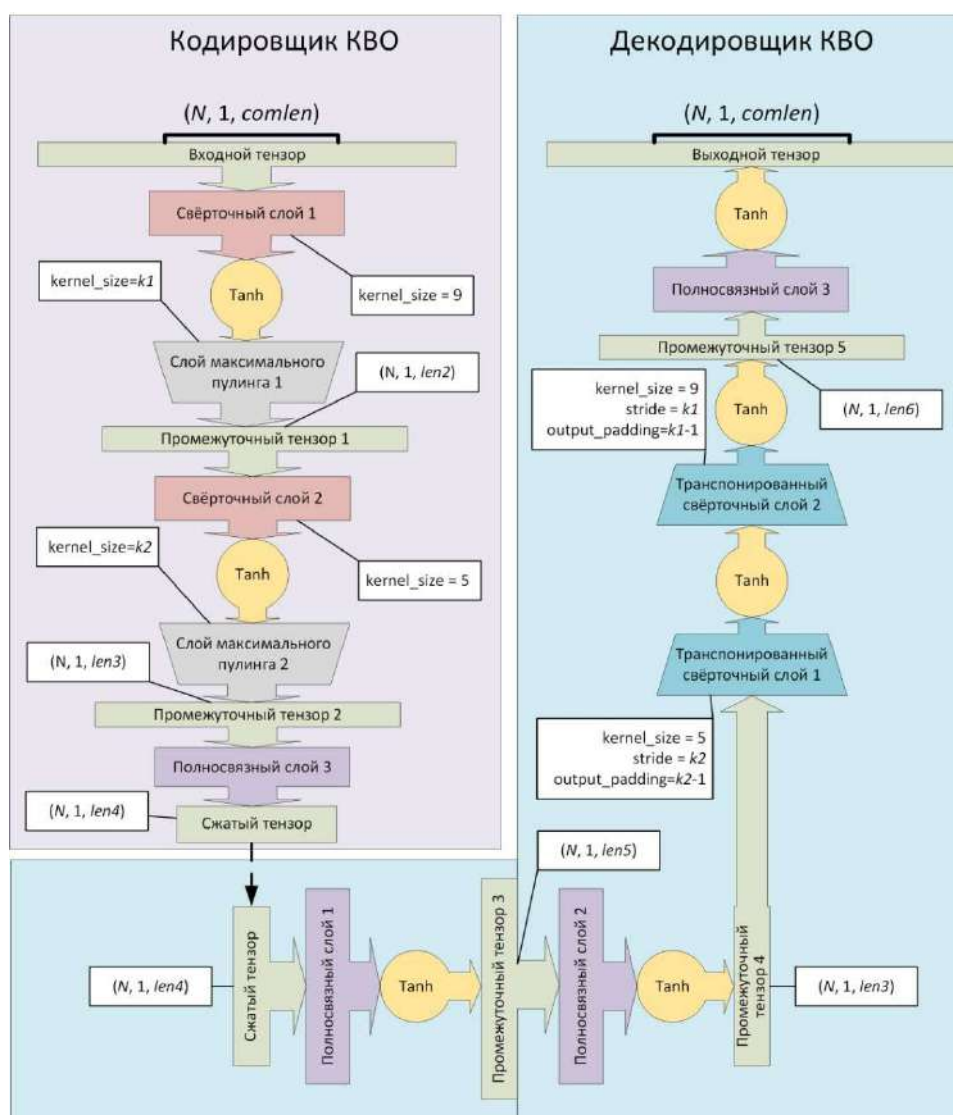


Рисунок 5.3 – Архитектура НСККВО

Пусть K_{rate} принадлежит одному из указанных интервалов; нижнюю границу интервала обозначим как $\underline{K_{rate}}$, верхнюю – $\overline{K_{rate}}$. Соответственно, коэффициенты $k1$ и $k2$ на нижней границе равны $\underline{k1}, \underline{k2}$, а на верхней – $\overline{k1}, \overline{k2}$.

Перед передачей тензора ЛПП к нему добавляются избыточные байты длиной ecc_{len} (в блоке агрегации A), что приводит к точной величине коэффициента сжатия CR , определяемого как отношение исходной размерности к размерности после сжатия, с учётом добавленных байт:

$$CR = \left(\left\lceil \frac{k_{p1} + k_{p2}}{\overline{K_{rate}} - \underline{K_{rate}}} \right\rceil \right) / (C_{len}) + \frac{ecc_{len}}{C_{len}}, \quad (5.2)$$

где

$$k_{p1} = \left\lfloor \left(\left\lfloor \frac{C_{len} - 8}{\underline{k1}} \right\rfloor - 4 \right) / \underline{k2} \right\rfloor \times (\overline{K_{rate}} - K_{rate}), \quad (5.3)$$

$$k_{p2} = \left\lfloor \left(\left\lfloor \frac{C_{len} - 8}{\underline{k1}} \right\rfloor - 4 \right) / \overline{k2} \right\rfloor \times (K_{rate} - \underline{K_{rate}}). \quad (5.4)$$

Далее, при обработке одномерного свёрточного слоя, входной тензор имеет размерность (BCH, CH_{in}, L_{in}) , где BCH – количество батчей (от англ. batch, пакет, порция), CH_{in} – входное число каналов, L_{in} – некоторое натуральное число. На выходе получается тензор размерности (BCH, CH_{out}, L_{out}) , где C_{out} – выходное число каналов, а L_{out} определяется соотношением параметров свёртки ($padding$, $stride$, $dilation$ и $kernel\_size$), согласно базовым формулам²⁹:

$$L_{out} = \left\lfloor \frac{L_{in} + 2 \times padding}{stride} + 1 \right\rfloor - \left\lfloor \frac{dilation \times (kernel\_size - 1) - 1}{stride} + 1 \right\rfloor \quad (5.5)$$

где $padding$ – число добавляемых значений по краям, $stride$ – шаг операции свёртки, $dilation$ – расстояние между значениями ядра, $kernel\_size$ – размер ядра.

²⁹ Conv1d // PyTorch. URL: <https://docs.pytorch.org/docs/stable/generated/torch.nn.Conv1d.html> (дата обращения: 05.01.2026).

В частности, для свёрточных слоёв нейронной сети НСККВО приняты значения $stride=1$, $dilation=1$ и $padding=0$, что упрощает размерности в соответствии с (5.5) до

$$L_{out} = \lfloor L_{in} - kernel\_size + 1 \rfloor = L_{in} - kernel\_size + 1. \quad (5.7)$$

Аналогично, для одномерного слоя максимального пулинга, который обеспечивает получение максимальных значений, применяется то же выражение (5.5)³⁰. Однако в НСККВО для слоёв максимального пулинга реализовано значение $stride=kernel$, что приводит к преобразованию (5.5) в

$$L_{out} = \left\lfloor \frac{L_{in} - kernel\_size}{kernel\_size} + 1 \right\rfloor = \left\lfloor \frac{L_{in}}{kernel\_size} \right\rfloor \quad (5.8)$$

В качестве операции, обратной одномерной свёртке и максимальному пулингу, применяется «транспонированная свёртка»³¹. Если на вход слоя транспонированной свёртки подаётся тензор размерности (N, CH_{in}, L_{in}) , то на выходе формируется тензор размерности (N, CH_{out}, L_{out}) с соответствующим изменением размерностей, описываемым выражением (5.9)³², где $output\_padding$ обозначает добавляемое количество значений по граничному индексу:

$$L_{out} = (L_{in} - 1) \times stride - 2 \times padding + dilation \times (kernel\_size - 1) + output\_padding + 1. \quad (5.9)$$

Параметры $stride$, $output\_padding$, $padding$, $dilation$ и $kernel\_size$ подбираются в зависимости от конкретных значений слоёв свёртки и слоёв максимального пулинга. В рамках НСККВО для транспонированных слоёв $padding$ устанавливается равным 0 и $dilation$ равным 1. Следовательно, выражение (5.9) упрощается:

$$L_{out} = (L_{in} - 1) \times stride + kernel\_size + output\_padding. \quad (5.10)$$

³⁰ MaxPool1d // PyTorch. URL: <https://docs.pytorch.org/docs/stable/generated/torch.nn.MaxPool1d.html> (дата обращения: 04.07.2025).

³¹ ConvTranspose1d // PyTorch. URL: <https://docs.pytorch.org/docs/stable/generated/torch.nn.Conv1d.html> (дата обращения: 04.07.2025).

³² ConvTranspose1d // PyTorch. URL: <https://docs.pytorch.org/docs/stable/generated/torch.nn.Conv1d.html> (дата обращения: 04.07.2025).

Из совокупности выражений (5.8), (5.9), (5.10) и требования согласованности размерности входа кодировщика и выхода декодировщика следует:

$$len3 = \left\lfloor \frac{\left\lfloor \frac{C_{len} - 8}{k1} \right\rfloor - 4}{k2} \right\rfloor. \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned} len6 &= ((len3 - 1) \times k2 + 5 + (k2 - 1)) \times k1 + 9 + (k1 - 1) = \\ &= len \times k2 \times k1 + 4 \times k1 + 8 \end{aligned} \quad (5.12)$$

Далее, по аналогии с моделью НСВБП, параметр $len4$ принимается равным фиксированному значению $len5 = len4 + len3$.

Описанные выше выражения подтверждают, что размерности входных и выходных тензоров по каждому слою соблюдают корректные преобразования в соответствии с параметрами свёрток и максимального пулинга, что обеспечивает корректное функционирование НСККВО как динамической архитектуры с контролируемой размерностью ЛПП и совместимостью между кодером и декодером. Следует отметить, что данная архитектура позволяет реализовать гибкое управление адаптивным сжатием КВО в рамках разных протоколов взаимодействия оператора и беспилотной системы без нарушения целостности данных, а также обеспечивает необходимую совместимость между слоями кодирования и декодирования в условиях заданных ограничений на K_{rate} и C_{len} .

5.2 Методика экспериментов и результаты

В данном подразделе рассматриваются методика проведения экспериментов и результаты анализа эффективности НККВО, включающего этапы сбора данных, обучения нейронных моделей, определения параметров кода Рида–Соломона и оценки характеристик разработанного метода. Основное внимание уделено фазам формирования экспериментальных данных, параметрам обучения нейронной сети, процедуре подбора оптимальной длины

избыточных символов и оценке интегральных характеристик предложенного метода. Экспериментальная схема установки представлена на рисунке 5.4.

На первом этапе эксперимента осуществлён сбор данных протоколов CRSF и MavLink. Команды взаимодействия оператора с беспилотной системой передавались с пульта оператора, где осуществлялось преобразование из формата UART в Ethernet и перехват пакетов, содержащих КВО, средствами ПО WireShark [472] (в составе ТО), что обеспечивает регистрацию передаваемых данных в условиях реального трафика. На стороне БПЛА используется модуль связи LTE/LTE adv, посредством которого обеспечивается передача КВО от пульта оператора к ТО, а затем к бортовой части системы через канал интернет. Полученные пакеты формируют исходные данные для последующей нейросетевой обработки.

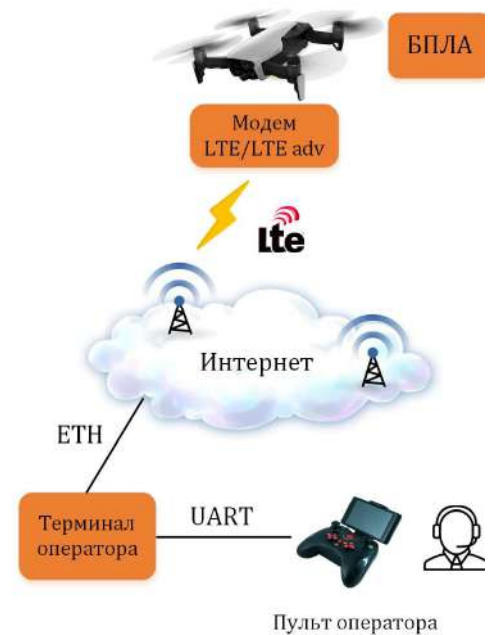


Рисунок 5.4 –
Экспериментальная
установка

На втором этапе выполняется обучение нейронной сети для двух конфигураций длины КВО: $C_{len}=64$ для протокола CRSF и $C_{len}=631$ для протокола MavLink. Общее количество обученных моделей составляет 284, включая по 71 модели кодера и 71 модели декодера на каждый из исследуемых протоколов при $K_{rate} \in \{1,0;1,1;.1,2;...;8,0\}$. Для каждой пары оцениваются показатели точности восстановления байтов исходных КВО и декодированных КВО* после обработки декодером НККВО. Ключевыми метриками служат доля совпадающих байтов sc и среднеквадратическая ошибка RMSE, характеризующая среднее отклонение прогнозируемого сигнала от исходного.

Обучение нейросетевых моделей осуществляется с использованием оптимизационного алгоритма *Adam* при размере батча, равном 1. Для тренировок применяется агрегированный набор данных объемом 2250 КВО. В качестве функции потерь используется RMSE, что позволяет минимизировать отклонение выходного вектора модели от эталонного. Обучающая выборка формируется в соотношении 80/20 между обучающими и тестовыми данными. Скорость обучения задается равной 0,001, продолжительность обучения составляет 100 эпох. Для обеспечения корректного масштабирования входных данных на интервале $([-1; 1])$ применяется функция активации гиперболический тангенс (*tanh*). Инициализация весов нейронной сети производится по методу Ксавье–Глоро [473], что способствует стабилизации распределения значений на начальных этапах обучения. Полученные результаты данного этапа свидетельствуют о достижении устойчивой сходимости моделей и стабильного снижения значения RMSE по мере увеличения количества эпох.

На третьем этапе проводится расчет оптимальной длины избыточных символов (байт) кода Рида–Соломона *ecclen* для каждой обученной пары моделей при $K_{rate} \in \{1, 0; 1, 1; 1, 2; \dots; 8, 0\}$, а также определение степени сжатия *CR*. В качестве реализации укороченного кода Рида–Соломона используется библиотека *reedsolo* [474], обеспечивающая вычисление коэффициентов коррекции в байтовом представлении. Как известно, коды Рида–Соломона функционируют на границе Рейгера [475], а для гарантированного исправления t ошибочных символов (например, при использовании алгоритма Бэрлекэмп–Мэсси) требуется $2t$ избыточных символов. Это условие используется для определения минимально необходимого объема избыточных символов при восстановлении исходных данных после нейросетевого декодирования.

Если после обработки нейросетевой моделью корректно восстанавливается sc (%) байтов из общего числа C_{len} , то для полного восстановления исходного кодового слова требуется объем избыточности, пропорциональный доле невосстановленных байтов.

$$ecclen_{sum} = 2 \times C_{len} \times \frac{(100 - sc)}{100} \text{ (байт)}, \quad (5.13)$$

где $ecclen_{sum}$ – суммарное количество избыточных символов для всех кодовых слов.

Следует отметить, что в случае построения потока из нескольких кодовых слов $bnum = \left\lceil \frac{C_{len}}{N - ecclen_{sum}} \right\rceil$, причём в каждом кодовом слове имеется равное количество байтов коррекции ошибок: $ecclen_{sum} = bnum \times ecclen$. Данная оценка сохраняет корректность при условии равномерного распределения ошибок между кодовыми словами.

На последующем этапе восстановленные байтовые последовательности поступают в КИО после блока агрегации A . В блоке агрегации осуществляется объединение бинарных последовательностей тензора ЛПП длиной $len4$ с тензором избыточных байтов длиной $ecclen$. На основе этого объединения вычисляется степень сжатия, определяемая как отношение исходного объема данных к суммарной длине результирующего кодового слова:

$$CR = 100 - 100 \times \frac{len4 + 2 \times C_{len} \times \frac{(100 - sc)}{100}}{C_{len}}. \quad (5.14)$$

Наилучшим методом сжатия КВО для рассматриваемого протокола с длиной команд C_{len} считаются такие значения K_{rate} и соответствующее ему $ecclen$, при которых достигается максимальное значение коэффициента CR :

$$C_{len}, K_{rate} : \begin{cases} \operatorname{argmax}(C_{len}(CR)), \\ \operatorname{argmax}(K_{rate}(CR)). \end{cases} \quad (5.15)$$

Данные анализа свидетельствуют о том, что для каждого из исследуемых протоколов наблюдается устойчивая тенденция роста эффективности при увеличении длины КВО, что проявляется в повышении доли совпадений байтов и снижении RMSE. Тем не менее, существуют алгоритмы, позволяющие восстанавливать с помощью кодов Рида-Соломона более t символов ошибок

[476], но они не рассматриваются в настоящем исследовании. При необходимости результаты данного этапа могут быть обобщены на данные алгоритмы, исходя из результатов второго этапа.

Проводится поиск зависимости LR от $ecclen$ при вариации $ecclen \in [2; N - C_{len}]$, где $ecclen$ принимает только чётные значения. Для CRSF $N - C_{len} = 190$ то есть, таким образом, как было указано выше, достигается исправление до $t=95$ ошибок.

На **четвёртом этапе** проводится оценка характеристик лучшего метода сжатия КВО и определяются средние значения ПФЭ CR, LR, t_C, t_{DC} .

Далее проводится проверка возможности применения метода при взаимодействии оператора и беспилотной системы в реальном времени между различными регионами Российской Федерации. В рамках проведённого исследования используются видеокарта Nvidia A100 и процессор Intel Xeon Gold 6226R@2.90 GHz. Реализация выполнена на языке Python версии 3.11 с применением библиотек *reedsolo* (коды Рида–Соломона) и PyTorch для обучения нейронных сетей. Выбор аппаратной конфигурации и ПО обосновывается необходимостью минимизации задержек обработки и обеспечения достаточной пропускной способности для передаваемых данных взаимодействия оператора и беспилотной системы.

В рамках первого этапа экспериментов сформированы наборы данных для протоколов CRSF и MavLink, содержащие соответственно 28671 и 66192 КВО. Пропускная способность канала информационного обмена между пультом взаимодействия оператора и беспилотной системы и БПЛА составила 59 Кбит/с для CRSF и 260 Кбит/с для MavLink. Максимальные размеры КВО составили $C_{len}=64$ байта для CRSF и $C_{len}=631$ байт для MavLink. Эти параметры определяют ограничительную рамку при разработке и обучении моделей восстановления КВО и, следовательно, влияют на итоговую эффективность системы.

На втором этапе проводилось обучение моделей для протоколов CRSF и MavLink при $K_{rate} \in \{1,0;1,1;1,2;...;8,0\}$. Реализация включала две серии испытаний: с передачей без промежуточного преобразования в тип данных *uint8* и с промежуточной конвертацией в *uint8*. Целью является оценка влияния промежуточного преобразования на потери КВО во время передачи по КИО, поскольку такие преобразования способны исказить восстанавливаемые значения. Результаты представлены на рис. 5.5 (CRSF) и рис. 5.6 (MavLink).

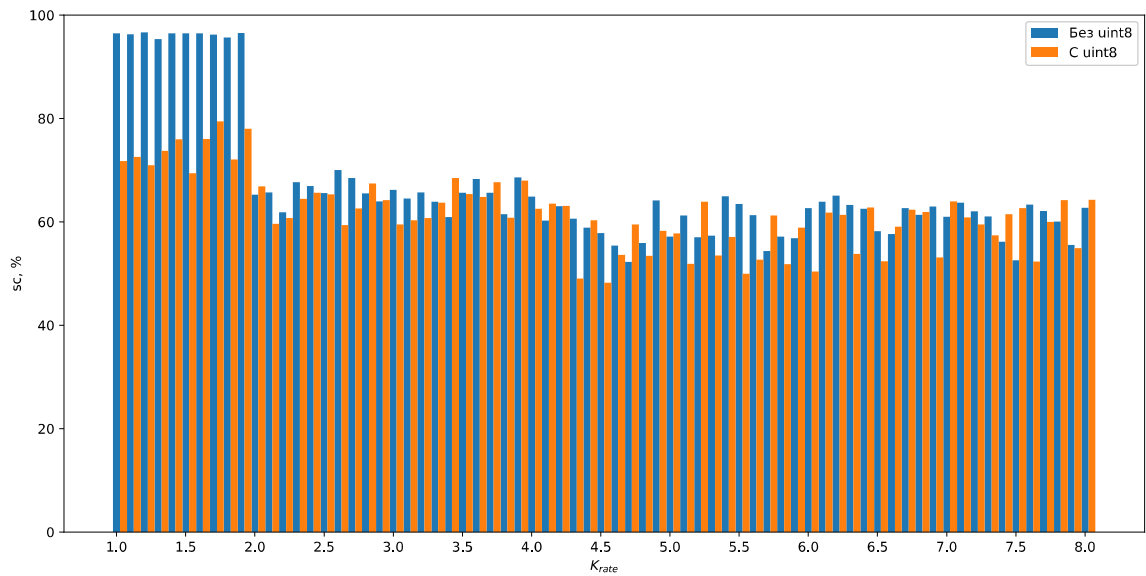


Рисунок 5.5 – График зависимости sc для моделей НСККВО (CRSF)

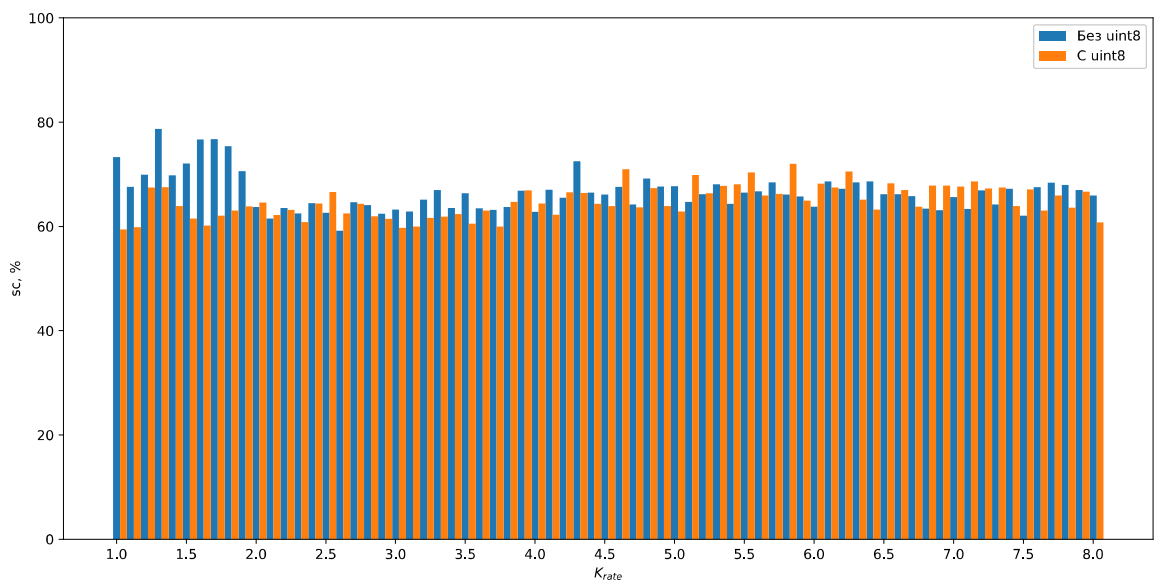


Рисунок 5.6 – График зависимости sc для моделей НСККВО (MavLink)

Для протокола CRSF при $K_{rate} \in [1;1,9]$ без промежуточной конвертации в *uint8* нейронная сеть НСККВО демонстрирует способность полностью

восстанавливать в среднем от 95,67% до 96,67% байт, в то же время отклонения в 1–5 байтовых значениях наблюдаются редко (рис. 5.30). Введение промежуточной конвертации в *uint8* существенно ухудшает результаты: фактор восстановления снижается до диапазона 69,42%–79,42%. Стохастическая инициализация весов при обучении вызывает флуктуации в получаемых величинах. Начиная с $K_{rate}=2$, результаты с промежуточной конвертацией и без неё становятся близкими по значениям и лежат в диапазоне примерно [48,20; 67,96]%, что при $K_{rate} \in [2,0;8,0]$ соответствует среднему значению *sc* около 61,91% без преобразования в *uint8* и 59,77% с преобразованием.

Для протокола MavLink наблюдаются сходные тенденции, однако в рамках условий $K_{rate} \in [1;1,9]$ НСККВО демонстрирует худшие коэффициенты восстановления из-за большего размера сообщений и большего числа часто изменяющихся независимых полей (рис. 5.31). В режиме без промежуточной конвертации в *uint8* восстановление составляет в среднем 67,58%–78,74% байт, а с промежуточной конвертацией – 59,43%–67,51%. Среднее значение *sc* $K_{rate} \in [2,0;8,0]$ по протоколу MavLink без конвертации в *uint8* составляет 65,50%, а с конвертацией – 65,13%, что превышает аналогичный показатель для CRSF. Таким образом, можно заключить, что протокол MavLink в рассматриваемых условиях демонстрирует более устойчивые результаты по восстановлению байтов по сравнению с CRSF.

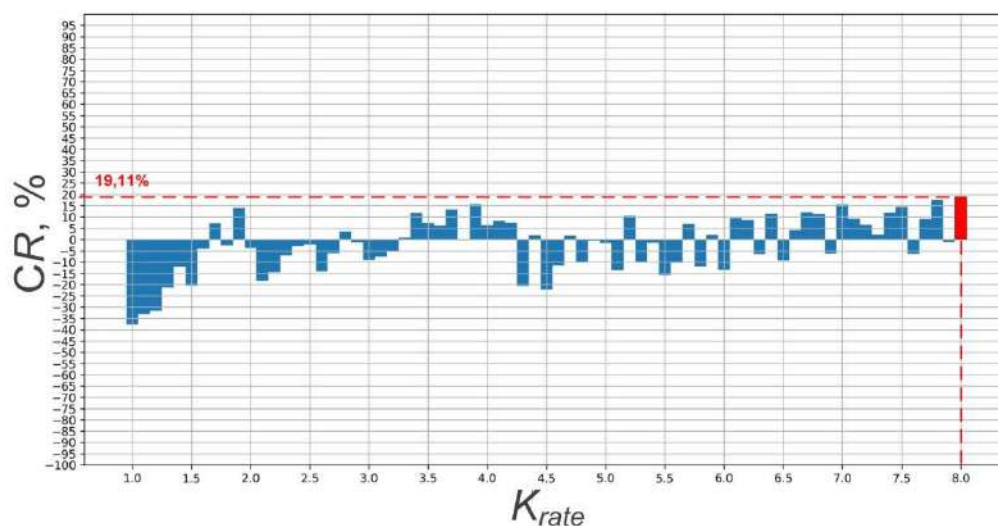
В рамках рассматриваемых условий доминируют группы часто повторяющихся символов в КВО, что позволяет НСККВО достигать точного восстановления даже при интенсивном сжатии (например, $K_{rate}=8$). Впрочем, абсолютное большинство значений байтов корректно восстанавливается только при $K_{rate} \in [1;1,9]$ и отсутствии промежуточного преобразования в *uint8*, что подчеркивает влияние преобразований на целостность восстановленных данных. Промежуточное преобразование в *uint8* приводит к искажению значений и снижению процента восстановленных байтов на примерно 20% для CRSF и на около 10% для MavLink при заданных условиях. При этом влияние

данного преобразования на процент восстановленных байтов становится менее выраженным при дальнейшем росте K_{rate} до больших значений, что свидетельствует о постепенной стабилизации поведения моделей в условиях более сильной корреляции и нежелательных артефактов кодирования. В рамках полученных данных можно предположить возможность дообучения моделей с целью дополнительного повышения точности восстановления и устойчивости к преобразованиям данных.

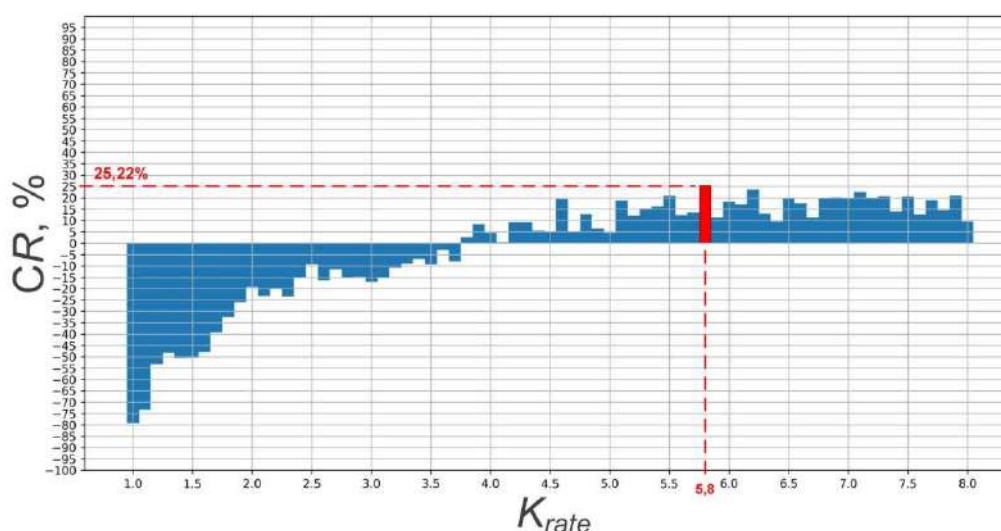
В результате третьего этапа рассматриваются результаты экспериментов, направленных на определение зависимостей CR и $ecclen$ для различных значений параметра K_{rate} в контексте работы нейросетевого кодека НККВО. Полученные экспериментальные данные и вычисленные зависимости представлены на рисунках 5.7 и 5.8.

Результаты анализа (рис. 5.7) 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). Следует отметить, что данная оценка носит приближённый характер в силу наличия множественных кодовых слов и неопределённого распределения ошибок между ними.

Данные, представленные на рисунке 5.8, демонстрируют зависимость уровня потерь КВО LR от $ecclen$ (в расчёте на одно кодовое слово). При этом красными маркерами обозначены значения коэффициента сжатия CR , а синими – значения потерь LR . 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.



а) протокол CRSF



б) протокол MavLink

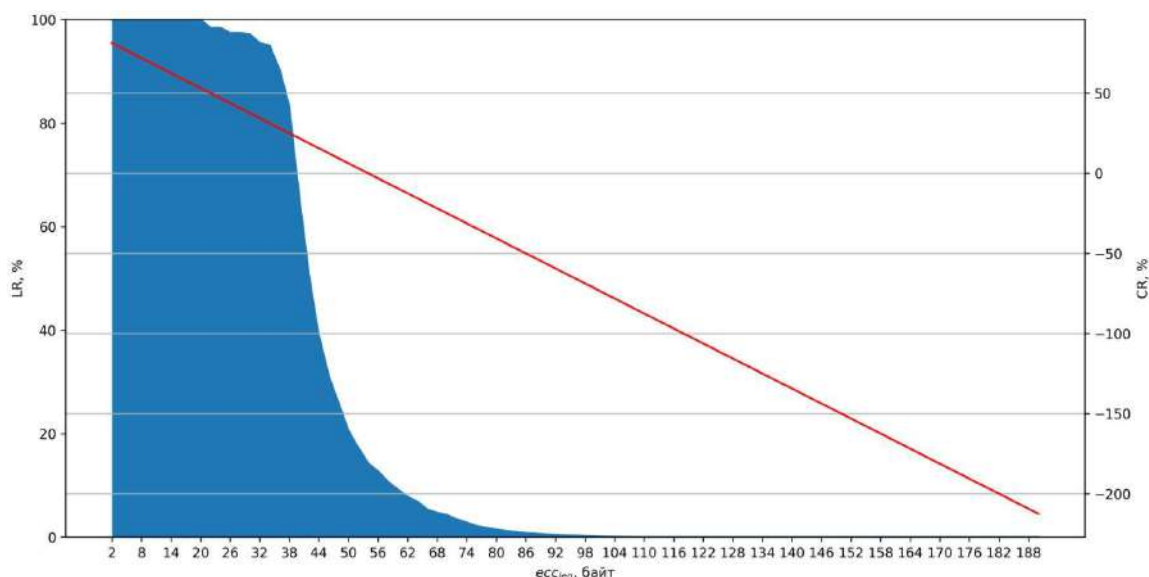
Рисунок 5.7 – График зависимости CR от K_{rate} для моделей НСККВО

Анализ диаграммы на рисунке 5.8а показывает, что для протокола CRSF при $K_{rate}=8$ сжатие КВО возможно при $ecclen < 58$. Так,

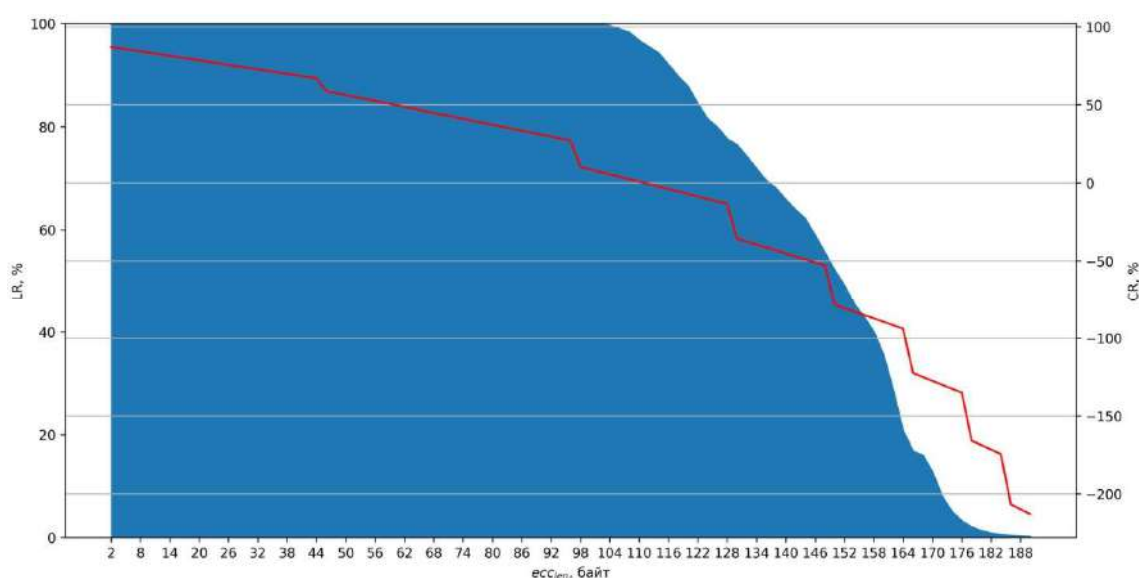
- при $ecclen=46$ наблюдались потери КВО $LR = 31,23\%$ и коэффициент сжатия $CR = 18,75\%$.

- при увеличении длины избыточной части 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 $CR=-43,75\%$, что указывает на полное отсутствие эффекта сжатия.



а) протокол CRSF



б) протокол MavLink

Рисунок 5.8 – График зависимости LR от $ecclen$

В свою очередь, анализ зависимости для протокола MavLink (рис. 5.8б) показывает, что при $K_{rate}=5,8$ сопоставимый уровень потерь $LR=33,41\%$ достигается при $ecclen=160$ байт (на одно кодовое слово) и числе кодовых слов $bnum=7$. 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.

Дополнительно установлено, что при восстановлении КВО различные их области обладают неодинаковой степенью точности восстановления. При превышении длиной КВО информационной части помехоустойчивого кода происходит разбиение данных на несколько кодовых слов, каждое из которых характеризуется собственным уровнем ошибок. Анализ полученных данных показывает, что неоднородность распределения ошибок между кодовыми словами в протоколе MavLink приводит к снижению точности восстановления и невосполнимым потерям информации. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость подбора различных параметров кодов Рида–Соломона, в частности, варьирования длины проверочных элементов ecc_{len} в зависимости от конкретных характеристик кодовых слов.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что применение НСККВО для протокола CRSF может быть оправдано при небольших значениях ecc_{len} , 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.

В случае отсутствия в составе НККВО блоков помехоустойчивого кодирования потери КВО достигают порядка 100%. Это объясняется двумя основными причинами. Во-первых, задача восстановления КВО формализована как задача регрессии: применение нейронной сети к задаче регрессии обеспечивает достаточно точные оценки байтов КВО, однако в ряде случаев восстановленные байты отличаются от исходных на 1–2 значения. Во-вторых, использование нейронных сетей, предназначенных для задач классификации, привело бы к значительному росту размерности данных (примерно в 255 раз) и существенным задержкам в вычислениях. Дополнительной причиной являются особенности данных внутри каждой КВО. Некоторые значения одних полей КВО слабо коррелируют с значениями других. Примером служит поле порядкового номера текущей КВО. Следовательно, применение НСККВО для

сжатия и восстановления КВО неизбежно приводит к потерям, тогда как помехоустойчивые коды позволяют восстанавливать КВО на стороне БПЛА. Иными словами, данный метод обеспечивает восстановление большей части КВО, однако неизбежно сопровождается значительным коэффициентом потерь.

В результате четвёртого этапа экспериментов проведена комплексная оценка производительности и точности восстановленных данных в зависимости от формата представления тензоров (*float16* и *float32*), что позволило установить оптимальные параметры работы НССКВО. Расчёт производился в соответствии с целевой функцией (5.15), а обобщённые экспериментальные данные приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Лучшие методы сжатия КВО

Протокол	K_{rate}	$ecclen$, байт	C_{len} , байт	t_C , мс	t_{DC} , мс
CRSF (<i>float32</i>)	8,0	46	64	0,731	2,948
CRSF (<i>float16</i>)	8,0	46	64	0,720	2,936
MavLink (<i>float32</i>)	5,8	160	631	2,224	75,740

Как показывают результаты, представленные в таблице 5.6, время выполнения модели НССКВО в режимах кодирования и декодирования не превышает 0,731 мс и 2,948 мс соответственно. При этом использование арифметики с пониженной точностью (*float16*) позволяет снизить время работы лишь на сотые доли миллисекунды (до 0,720 мс для кодера и 2,936 мс для декодера), что сопровождается повышением относительных потерь более чем на 1%. Следовательно, применение формата *float32* является оптимальным с точки зрения соотношения вычислительных затрат и качества восстановления данных.

Для оценки практической применимости предложенного метода выполнен анализ временных характеристик передачи данных, связанных с использованием протокола CRSF. В соответствии с требованиями стандарта 3GPP TS 22.829³³, предельная допустимая задержка передачи телеметрических данных для систем взаимодействия оператора и беспилотной системы

³³ 3GPP TS 22.829. Technical specification group services and system aspects; enhancements for unmanned aerial vehicles. 2018.

составляет 1 с, в то время как максимальная допустимая задержка передачи КВО ограничена значением 10 мс в условиях прямой видимости и 360 мс за ее пределами.

Пусть СО располагается в области прямой видимости БПЛА, а задержка передачи КВО не превышает 10 мс. В рамках исследования [388] приведены результаты измерений среднего времени задержки видеопотоков, передаваемых по сетям 3G и 4G (LTE/LTE adv) для различных направлений связи между г.Санкт-Петербург и другими регионами Российской Федерации. Размер полезной нагрузки для протокола CRSF, включающей КВО и телеметрические данные, составляет от 60 до 84 байт с учётом заголовков верхних уровней и от 28 до 64 байт без них, т.е. объем данных составляет менее 100 байт.

Согласно проведенным экспериментам, максимальная средняя задержка при передаче полезной нагрузки объёмом 100 байт наблюдается между г.Санкт-Петербург и г.Южно-Сахалинск (длина трассы 6660 км) и составляет 93,69 мс. Как было определено в разделе 2.2.6, распределение задержек принималось усечённым бета-распределением, адаптированным под заданные минимальные и максимальные значения, где параметры распределения α и β вычисляются в соответствии с выражением (2.44), а плотность вероятности бета-распределения $p(lat)$ можно оценить как в соответствии с (2.42).

Как было показано в главе 2, на расстоянии 6660 км при размере полезной нагрузки 100 байт параметры $\alpha = 6,56$, $\beta = 2,12$ и, согласно (2.43), $B(\alpha, \beta) \approx 0,01657$. Максимальная и минимальная задержки соответственно равны 78,18 и 203,50 мс. В соответствии с выражением (2.42) пороговое значение задержки $p(lat)$, ниже которого укладываются 99% всех наблюдений, оценивается как:

$$\begin{aligned}
 0,99 &= \int_0^{plat} p(lat) dlat = \\
 &= \int_0^{plat} \frac{(lat - 78,18)^{\alpha-1} \times (203,50 - lat)^{\beta-1}}{(125,32)^{\alpha+\beta-1} \times 0,01657} dlat
 \end{aligned} \tag{5.16}$$

$$\begin{aligned}
 0,99 &= \int_0^{plat} p(lat) dlat = \\
 &= \int_0^{plat} \frac{(lat - 78,18)^{5,56} \times (203,50 - lat)^{1,12}}{(125,32)^{7,68} \times 0,01657} dlat
 \end{aligned}
 \quad (5.17)$$

Задержка $p(lat)$ приблизительно оценивается как 200,43 мс. График оценки данного параметра приведён на рисунке 5.9.

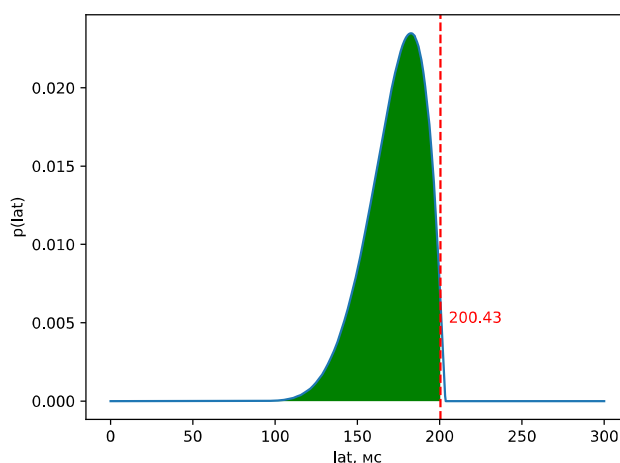


Рисунок 5.9 – Оценка значения $p(lat)$

Таким образом, даже в условиях максимальной протяжённости канала связи задержка не превышает нормативных ограничений, установленных стандартом 3GPP и применимых к FPV- и BVLOS-режимам взаимодействия оператора и беспилотной системы. Совокупное время работы кодера и декодера для протокола CRSF составляет порядка $0,72 + 2,936 = 3,659 < 149,68$ мс, тогда как для протокола MavLink этот параметр достигает $2,223 + 75,74 = 77,96 < 149,68$ мс. Данные таблицы 5.6 и результаты, представленные на рис. 5.9, позволяют сделать вывод о том, что предложенный метод сжатия КВО, реализованный на основе НСККВО, помехоустойчивого кодирования и метода агрегации, обеспечивает выполнение регламентированных требований по временной задержке и применим для взаимодействия оператора и беспилотной системы на всей территории Российской Федерации, включая межрегиональные направления и магистральные каналы связи.

Экспериментальное сравнение с существующими алгоритмами сжатия без потерь

Было 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) [477]. В качестве сравниваемого набора данных использован набор CRSF, включающий 28672 пакета протокола CRSF [478]. В целях объективного анализа применялись описанные выше метрики качества сжатия: доля потерь КВО LR и коэффициент сжатия CR , который вычисляется по формуле

$$CR = \frac{MSize}{LSize}, \quad (5.18)$$

где $MSize$ представляет собой размер сжатой бинарной последовательности, а $LSize$ – размер исходной бинарной последовательности (длина пакета протокола CRSF). В рамках данного подраздела следует отметить, что коэффициент CR выражается в процентах и характеризует изменение объёма данных после применения алгоритма сжатия.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что значительная часть классических алгоритмов без потерь не способна обеспечить положительную величину CR для протокола CRSF. В частности, для алгоритма LZMA наблюдается минимальная величина CR , равная примерно $-107,35\%$, что означает увеличение объёма данных в результате «сжатия» более чем в два раза (табл. 5.3).

Таблица 5.3 – Характеристики методов сжатия КВО

Метод	CR , %	LR , %	Метод	CR , %	LR , %
Deflated	-4,16	0,00	LZ4H5	-34,51	0,00
LZMA	-107,35	0,00	LZW	-6,35	0,00
GZip	-27,16	0,00	LZF	-2,70	0,00
BZip2	-56,80	0,00	LZFSE	-23,00	0,00
ZSTD	-17,25	0,00	AEC	4,54	0,00
Brotli	9,03	0,00	HKKBO(1) _{ecclen=46}	18,75	31,23
LZ4	-3,83	0,00	HKKBO(2) _{ecclen=50}	12,50	20,61
LZ4F	-44,09	0,00	HKKBO(3) _{ecclen=56}	3,12	12,72

В рамках проведённых тестов такие отрицательные значения CR иллюстрируют неэффективность применения данных алгоритмов к данному набору данных. Эти выводы отражают несостоятельность большинства стандартных алгоритмов сжатия без потерь по отношению к спецификации протокола CRSF (рис. 5.10).

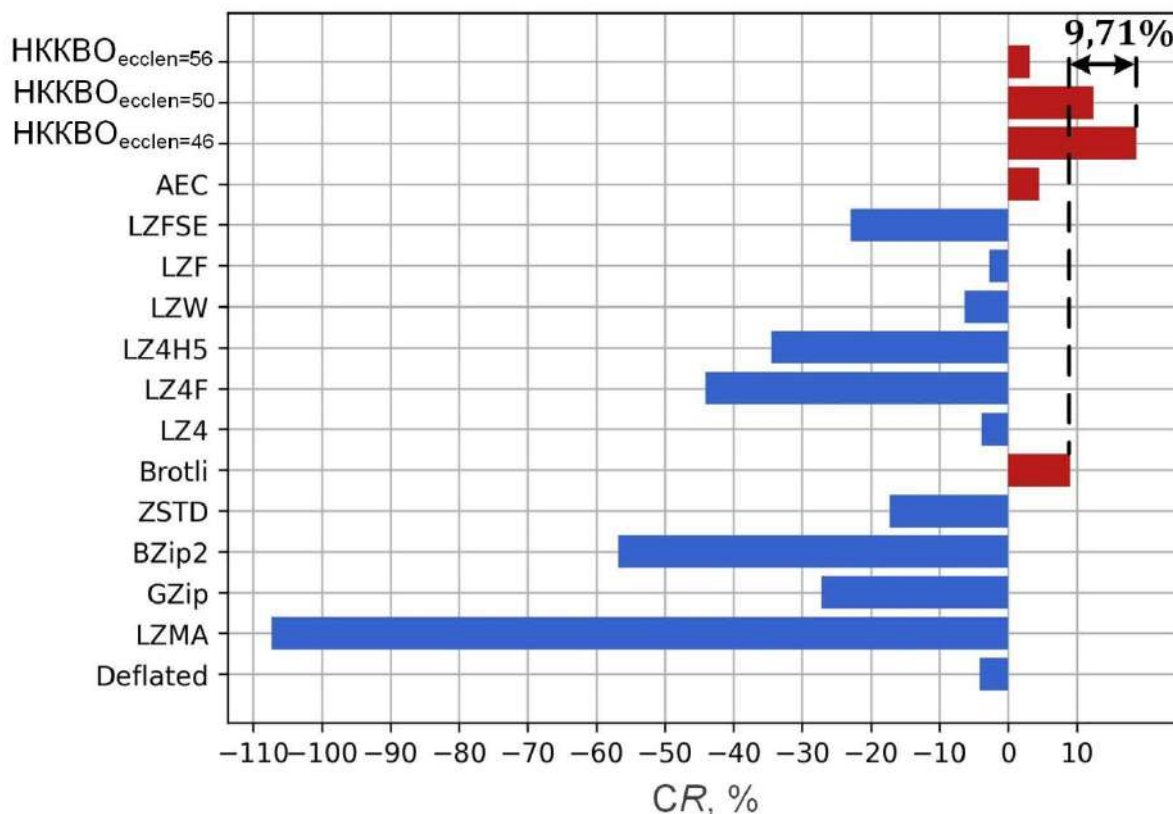


Рисунок 5.10 – Результаты экспериментов

Помимо этого, анализ таблицы 5.3 демонстрирует, что лишь два алгоритма без потерь обеспечивают положительную эффективность сжатия: Brotli достигает $CR=9,03\%$, а алгоритм AEC – $CR=4,54\%$. Остальные методы приводят к снижению CR , что выражается в отрицательных значениях CR . При этом следует учитывать, что, т.к. для CRSF предельный размер кадра составляет 64 байта, это задаёт жёсткие ограничения на объём полезной нагрузки и, как следствие, на потенциальную эффективность универсальных алгоритмов сжатия на коротких блоках. Полученные зависимости представлены на рисунке 5.11: красными линиями показаны значения CR для HKKBO и Brotli (правая ось ординат), а синими столбцами – соответствующие

потери LR (левая ось ординат). Данные (рис. 5.11) 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 . Так при $ecclen=52$ достигается уровень сжатия 18,75%.

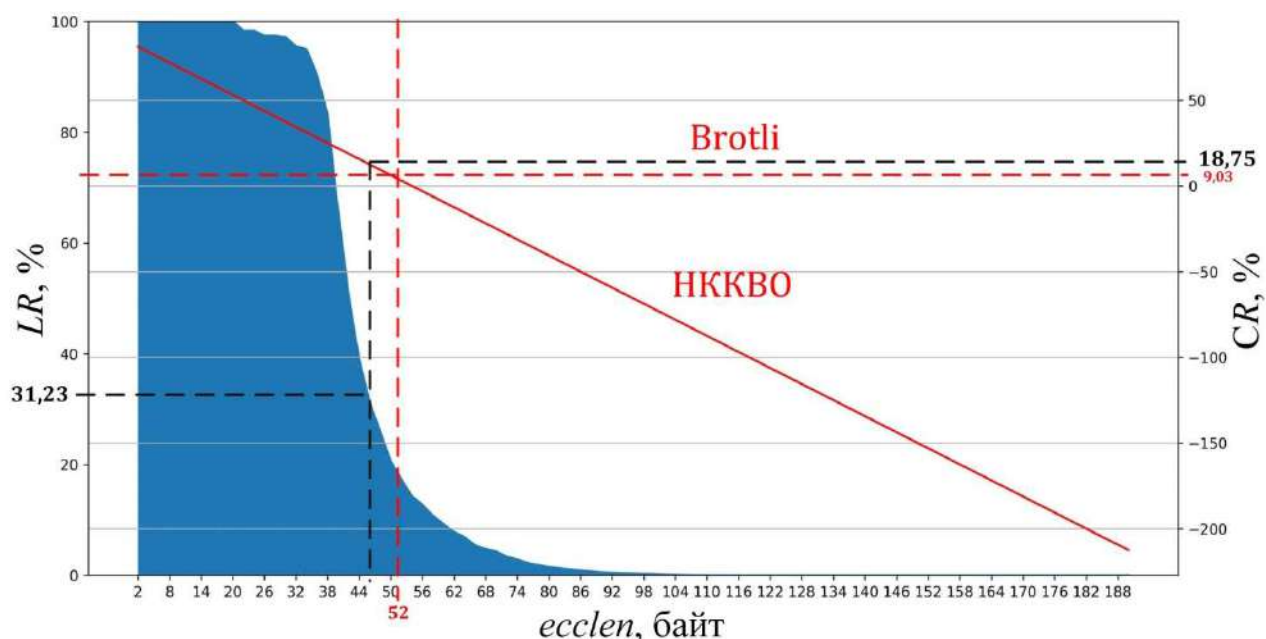


Рисунок 5.11 – Зависимость CR от LR потерь КВО

Анализ экспериментальных точек показывает наличие порогового эффекта: при уменьшении числа избыточных символов $ecclen$ меньше 52 наблюдается резкое возрастание потерь КВО, что указывает на ухудшение качества потока КВО при чрезмерном уменьшении кодовой избыточности. В прикладном контексте команды взаимодействия оператора (например, «газ» и «поворот») передаются последовательностями по несколько КВО (для протокола CRSF в секунду отправляется в среднем 91 КВО), а частоты обновления в системах Crossfire/CRSF³⁴ в зависимости от режима могут достигать десятков и сотен герц, что в ряде сценариев делает потерю части команд (3 или 5 КВО) менее критичной для субъективного восприятия взаимодействия оператора и беспилотной системы. Вместе с тем данное допущение не является универсальным и требует дополнительной проверки на

³⁴ <https://www.team-blacksheep.com/media/files/tbs-crossfire-manual.pdf>

уровне метрик устойчивости контура взаимодействия оператора и беспилотной системы и субъективной оценки взаимодействия в различных режимах полёта.

Дополнительно установлено, что большинство классических алгоритмов сжатия данных без потерь не обеспечивают сжатие КВО протокола CRSF, что согласуется со спецификой входных данных: малым размером пакетов (в пределах 64 байт), ограниченной повторяемостью значений и накладными расходами, возникающими при работе словарных методов на коротких сообщениях. Среди исследованных методов сжатия без потерь только АЕС и Brotli демонстрируют положительный эффект сжатия, однако он ограничен величинами порядка 4,54% и 9,03% соответственно (табл. 5.4). Полученные результаты позволяют сделать вывод, что НККВО в ряде конфигураций обеспечивает более высокую степень сжатия по сравнению с АЕС и Brotli, однако ключевым ограничением данного подхода является неизбежное внесение потерь КВО LR , величина которых определяется выбором параметра кода *ecclen*.

Следует отметить, что 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 основным недостаток НККВО состоит в введении дополнительных потерь LR . В связи с этим применение НККВО целесообразно в условиях взаимодействия оператора и беспилотной системы 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 ГОНСС. При этом устойчивость взаимодействия может снижаться в зависимости от параметров НККВО, которые определяют степень сжатия CR и связанные с этим потери LR : рост CR сопровождается ростом LR (табл. 5.4).

Таблица 5.4 – Сравнение *CR* и *LR*

Метод/ конфигурация	<i>CR</i> , %	<i>LR</i> , %	Примечание
Brotli (без потерь)	9,03	0,00	Базовый ориентир среди безпотерьных методов.
АЕС (без потерь)	4,54	0,00	Положительное, но меньшее сжатие.
НККВО(1) _{ecclen=46}	18,75	31,23	Максимальный <i>CR</i> в эксперименте; наибольшие потери.
НККВО(2) _{ecclen=50}	12,50	20,61	Компромиссный режим: <i>CR</i> выше Brotli, <i>LR</i> ниже чем при <i>ecclen=46</i> .
НККВО(3) _{ecclen=56}	3,12	12,72	<i>CR</i> ниже безпотерьного Brotli; потери остаются ненулевыми.

5.3 Выводы по главе 5

1. Разработан и апробирован метод сжатия и восстановления команд взаимодействия оператора, а также соответствующая нейронная сеть для сжатия КВО протокола CRSF, отличающийся использованием архитектуры автокодировщика в качестве энкодера/декодера сжатия в комбинации с укороченным помехоустойчивым кодом Рида-Соломона, функционирующим в режиме исправления ошибок. Данная конфигурация обеспечивает принципиально иное соотношение эффективности сжатия и надежности восстановления по сравнению с традиционными подходами, где нейронные сети применяются изолированно или без интеграции с блочными кодами коррекции ошибок. Для протокола MavLink используются полный помехоустойчивый код Рида-Соломона над полем Галуа GF(2⁸).

2. Экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что интеграция помехоустойчивых кодов Рида-Соломона позволяет достигать уровня восстановления КВО на отметке 68%, одновременно снижая требования к необходимой пропускной способности КИО для их передачи на 18,75% для протокола CRSF. Полученные результаты подчеркивают потенциал дальнейшей оптимизации: производительность может быть повышена за счет внедрения альтернативных архитектур нейронных сетей (например, вариационных автокодировщиков) и других схем помехоустойчивого

кодирования, таких как каскадные или турбокоды, с учетом специфики распределения ошибок при декодировании ЛПП нейронной сети.

3. Исследовано влияние зависимости полей в пакетах КВО протокола CRSF на качество декомпрессии: установлена повышенная вероятность искажения отдельных байтов (в частности, независимых полей вроде порядкового номера КВО), обусловленная отсутствием контекстной информации во входных данных нейросетевой модели. Рекомендуется устранение указанного ограничения путем модификации входного пространства нейросетевых модулей сжатия и декомпрессии, включающей последовательности предшествующих КВО, что позволит моделировать временные корреляции и повысить робастность восстановления в условиях потерь пакетов.

4. В сценариях отсутствия блоков помехоустойчивого кодирования в нейросетевом кодеке КВО наблюдается практически полная потеря КВО ($\approx 100\%$), что подтверждает критичность интеграции помехоустойчивых кодов для обеспечения частичного восстановления. Применение помехоустойчивого кодирования снижает уровень потерь КВО, преобразуя сценарий полной неработоспособности в частично восстанавливаемый режим функционирования системы взаимодействия оператора с беспилотной системой.

5. В результате сравнительного анализа получены оптимальные параметры сжатия для протокола CRSF, где наилучшая производительность достигается при коэффициенте сжатия равном 8, длине команд 64 байта и длине избыточных символов кода Рида-Соломона равной 46, обеспечивая при этом степень сжатия в 18,75% при уровне ошибок восстановления 31,23%. Указанная конфигурация демонстрирует применимость метода для протокола CRSF по критерию сжатия, с возможностью снижения вероятности ошибок восстановления КВО до 12,72% при компромиссном уменьшении степени сжатия до 3,12%, что актуально для баланса между надежностью и эффективностью пропускной способности КИО.

6. Проведенное исследование классических алгоритмов сжатия без потерь выявило их низкую эффективность для КВО протокола CRSF, обусловленную малой длиной пакетов (64 байта), низкой энтропийной повторяемостью значений и большим объемом словарей в словарных методах (например, LZ-подобных). Среди тестируемых алгоритмов лишь AEC и Brotli демонстрируют небольшую положительную компрессию (до 9%), что обусловлено их адаптивностью к коротким последовательностям с низкой избыточностью.

7. Разработанный метод сжатия команд взаимодействия оператора превосходит существующие методы AEC и Brotli по степени сжатия на 14,21% и 9,71% соответственно, подтверждая превосходство нейросетевых подходов в захвате нелинейных зависимостей данных КВО. Однако ключевым компромиссом разработанного метода выступает введение дополнительных потерь КВО (ошибок восстановления КВО), коррелирующих со степенью сжатия, что требует параметрической оптимизации под конкретные условия ЛПП.

8. Целесообразность применения разработанного метода сжатия КВО обоснована для взаимодействия оператора с беспилотной системой в сетях связи с экстремально низкой пропускной способностью (например, спутниковые системы с ограниченным ресурсом), где компрессия Brotli (~9%) недостаточна. Стабильность взаимодействия при этом зависит от выбранных параметров кодека: нелинейный рост потерь КВО при увеличении степени сжатия говорит о необходимости адаптивного подхода к применению помехоустойчивых кодов с различными параметрами. Полученные выводы закладывают основу для дальнейших разработок в области нейросетевого помехоустойчивого кодирования для систем FPV в реальном времени.

ГЛАВА 6. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БАС В КАНАЛАХ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

В данной главе будет представлено детальное описание методики оценки эффективности функционирования БАС в каналах информационного обмена, а также результаты её практической апробации в реальных каналах связи наземного и орбитального сегментов ГОНСС.

6.1 Анализ существующих подходов

Как отмечено в параграфе 2.2, методика многокритериальной оценки эффективности взаимодействия между оператором и беспилотными системами в гибридных сетях связи включает последовательность этапов: определение параметров СИО и требований к ПЭФ; нахождение плотности вероятности распределения ПЭФ СИО $f(T_3^B, T_3^K, SSIM, DIST_S, P_{сбоя})$; вычисление вероятности вхождения параметров в область заданных требований. Однако, до настоящего момента в рамках данного направления исследований отсутствовали формализованные эталонные методы вычисления характеристик взаимодействия, а также стендовые решения, обеспечивающие измерение и анализ ПЭФ на уровне физической реализации.

В рамках настоящего исследования разработана и апробирована обновлённая методика многокритериальной оценки эффективности функционирования БАС, являющаяся развитием методики, изложенной в [479]. В усовершенствованную версию включён расширенный набор параметров, адаптированный к совокупности систем FPV, а также КИО. В данном контексте система взаимодействия рассматривается в парадигме «чёрного ящика», что обеспечивает возможность анализа её выходных характеристик без прямого доступа к внутренним алгоритмам функционирования. Вместе с тем в данной главе приводятся эталонные способы и экспериментальный стенд, предназначенные для вычисления прикладных характеристик системы FPV и

проведения сопоставительных испытаний между различными конфигурациями каналов информационного обмена.

Анализ доступной научно-технической литературы и существующих методических подходов к оценке качества FPV [480] показывает, что большинство известных методик ориентировано преимущественно на измерение характеристик качества только видеопотока и фокусируется на параметрах передачи пакетов на сетевом уровне либо на параметрах радиолинии на физическом уровне (между БПЛА и ТО). Такой подход оказывается недостаточным и методически ограниченным в условиях использования нейросетевых видеокодеков, для которых традиционные метрики качества не отражают специфики возникающих артефактов и их влияния на эффективность взаимодействия оператора и беспилотной системы.

В рамках проводимого исследования научная новизна разрабатываемой методики заключается в переходе к оценке систем FPV преимущественно на прикладном уровне, то есть через оценку вероятности удовлетворения требований к ПЭФ FPV в различных условиях функционирования КИО сегментов ГОНСС. Предлагаемый подход предусматривает совместный учёт перцептивного качества и задержки восстановленного видеопотока, а также задержек передачи и исполнения КВО, что позволяет сформировать более полную картину влияния параметров информационного обмена на результат достижения цели функционирования БПЛА.

Ключевым положением разработанной методики является её ориентированность на практическую применимость к системам FPV с учётом конкретных типов КИО ГОНСС, в которых функционирует рассматриваемая система [481]. В рамках комплексного анализа параметров качества взаимодействия рассматриваются как аспекты передачи видеокадров (качество, задержка, стабильность видеопотока), так и аспекты передачи КВО (время доставки, вариативность задержки, вероятность своевременного исполнения). Это создаёт основу для формирования интегральной оценки качественных характеристик FPV, основанной на совместной оценке задержек видеопотока и

КВО, а также вероятности удовлетворения заданных требований к перцептивному качеству восстановленного видеопотока в типовых и экстремальных режимах работы.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что предложенная методика поддерживает проведение сопоставительного анализа различных реализаций систем FPV при их функционировании в разнообразных (в т.ч. гибридных) КИО, включая различные конфигурации наземных и космических сегментов ГОНСС. Существенным преимуществом подхода является возможность оценки эффективности функционирования систем FPV на уровне приложения, без необходимости глубокой модификации нижележащих уровней протокольной архитектуры, что упрощает интеграцию методики в существующие испытательные стенды. Дополнительной сильной стороной является высокая гибкость методики в части использования различных типов сетей передачи данных (включая гибридные и неоднородные сети), что обеспечивает её пригодность для анализа перспективных архитектур систем FPV в условиях развития сетевых технологий.

6.2 Этапы методики оценки эффективности функционирования БАС

В рамках разрабатываемой методики оценки эффективности функционирования систем FPV при функционировании в КИО предлагается последовательная процедура, включающая ряд взаимосвязанных этапов, ориентированных на комплексную оценку ПЭ FPV (рис. 6.1). Структура методики организована таким образом, что результаты, полученные на ранних этапах, последовательно используются на последующих стадиях, что обеспечивает целостность и согласованность итоговой оценки.

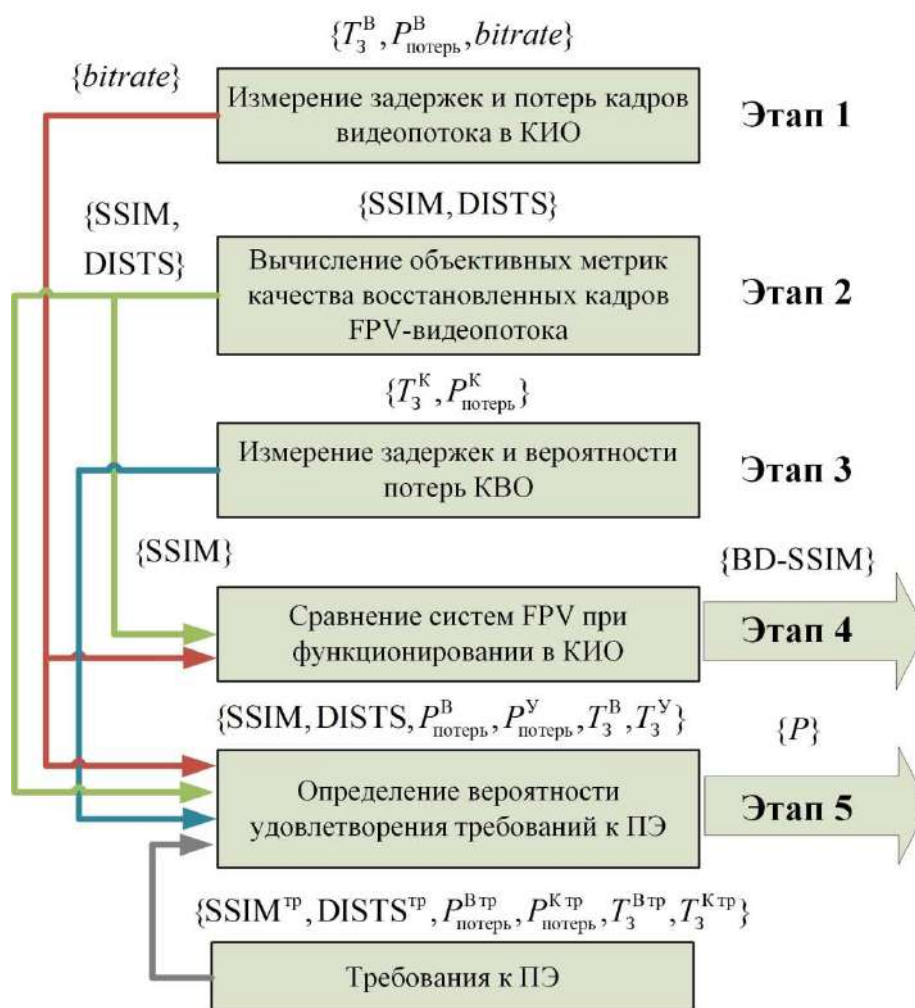


Рисунок 6.1 – Структурная схема комплексной методики

На **первом этапе** осуществляется измерение односторонних задержек кадров видеопотока в рассматриваемом КИО, то есть определяется время прохождения каждого кадра от источника (бортовой камеры БПЛА) до приёмной стороны (ТО), без учета обратного канала. Данный этап направлен на получение статистики задержек, необходимой для последующей оценки влияния временных характеристик канала на качество FPV-видеопотока и устойчивость взаимодействия оператора с беспилотной системой.

На **втором этапе** проводится измерение качества восстановленных кадров FPV-видеопотока на стороне приёмника. В рамках данного этапа применяются объективные метрики качества, такие как DISTS, SSIM и PSNR, позволяющие количественно оценить степень структурных искажений восстановленных кадров по сравнению с эталонной видеопоследовательностью, формируемой на борту БПЛА или в моделирующей среде.

Третий этап посвящён измерению задержек и вероятности потерь КВО, передаваемых от ТО к БПЛА. На этой стадии формируется статистика временных характеристик доставки команд (задержка, вариация задержки) и вероятности их потери в КИО, что позволяет оценить способность системы обеспечивать требуемый уровень оперативности и надёжности при реализации взаимодействия оператора с беспилотной системой.

Четвёртый этап методики предусматривает сравнение различных систем FPV при их функционировании в заданных моделях КИО. Данный этап является опциональным и применяется при необходимости выполнить сравнительный анализ альтернативных реализаций. Для реализации данного этапа формируются множества значений метрик качества восстановленного видеопотока (прежде всего SSIM) и соответствующих им значений необходимой пропускной способности (*bitrate*), на основе которых вычисляется метрика Бьёнтегора (Bjontegaard Delta, BD), в частности BD-SSIM, характеризующая относительное преимущество одной системы по качеству при одинаковых или сопоставимых ресурсах пропускной способности.

Пятый этап также является опциональным и связан с определением вероятности удовлетворения требований к ПЭ FPV для конкретного КИО. На данной стадии, опираясь на результаты предыдущих измерений, рассчитывается интегральная вероятность того, что совокупность ключевых показателей (задержки и потери видеок кадров, качество восстановленного видеопотока, задержки и потери КВО) будет находиться в пределах заданных требований, которые формируются исходя из достижения цели функционирования беспилотной системы.

Каждый из перечисленных этапов комплексной методики может рассматриваться как самостоятельная подчинённая методика, реализующая отдельную часть общей процедуры оценки (что отражается в соответствующей структурной схеме) (рис. 6.1). Комплексный характер подхода проявляется в том, что на первых трёх этапах измеряются различные ПЭФ: односторонние

задержки T_3^B и вероятность потерь $P_{\text{потерь}}^B$ кадров FPV-видеопотока, качество восстановленных кадров (по метрикам SSIM и DISTS), задержки T_3^K и вероятность потерь КВО $P_{\text{потерь}}^K$, требуемая пропускная способность *bitrate*, а при необходимости – время рассинхронизации FPV T_r . На заключительных четвёртом и пятом этапах указанные ПЭФ используются, соответственно, для сравнения систем FPV и для получения интегрального показателя – вероятности удовлетворения требований к ПЭ FPV P .

Процедура сравнительного анализа систем FPV может быть реализована на двух различных уровнях: на четвёртом этапе – с использованием критерия соотношения качества восстановленного видеопотока к показателям пропускной способности КИО (через анализ SSIM и BD-метрик), и на пятом этапе – с применением критерия вероятности удовлетворения требований к ПЭ. Пятый этап рекомендуется использовать только при определении требуемых значений ПЭФ $(T_3^{B\text{тр}}, T_3^{K\text{тр}}, \text{SSIM}^{\text{тр}}, \text{DISTS}^{\text{тр}}, P_{\text{потерь}}^{B\text{тр}}, P_{\text{потерь}}^{K\text{тр}})$ для заданных сценариев эксплуатации и КИО, а также при необходимости формального обоснования соответствия системы FPV установленным требованиям к качеству.

Этап 1. Измерение задержек и потерь кадров видеопотока в КИО

Под задержкой передачи видеоизображения в настоящей работе понимается интегральная характеристика сквозной задержки типа G2G (рис. 2.1), отражающая суммарное время прохождения видеопотока от источника (исходной видеокамеры) до устройства отображения оператора.

На рассматриваемом этапе проводится серия натурных экспериментов по передаче видео с цифровой камеры БПЛА на приёмный терминал оператора через эмулятор КИО сегмента фрагмента ГОНСС. Методика ориентирована на применение в системах FPV и, при сохранении общей структуры измерительного стенда, допускает использование современных стандартов видеокодирования (AVC/H.264, HEVC/H.265, AV1), а также перспективных

нейросетевых методов сжатия FPV-видео. Структурная схема стенда представлена на рисунке 6.3.



Рисунок 6.2 – Пример кадров видеопотока различной динамики: а) высокая; б) средняя; в) низкая

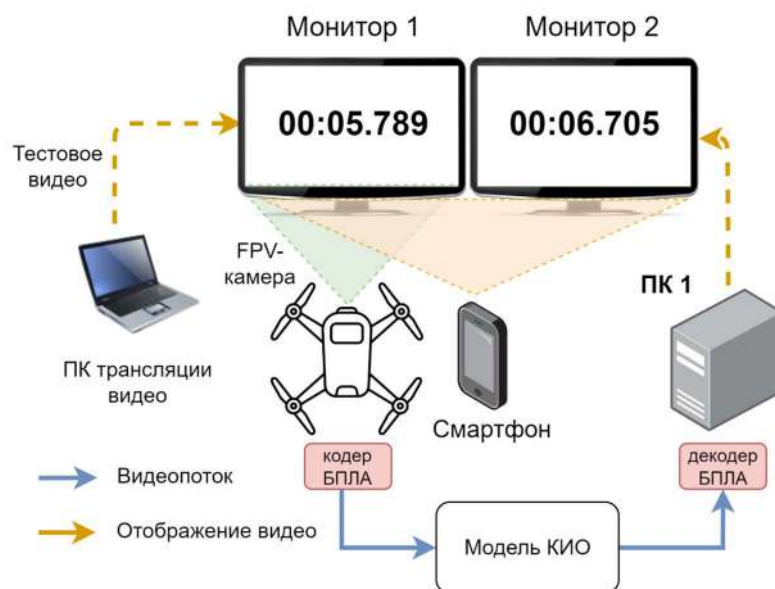


Рисунок 6.3 – Структурная схема стенда измерения задержек видео взаимодействия оператора и беспилотной системы

Измерительная схема (рис. 6.3) предусматривает параллельное отображение видеопотоков на двух дисплеях: на мониторе 1 воспроизводится исходный видеоматериал, имитирующий динамику полета БПЛА (рис. 6.2), а на мониторе 2 – видеопоток после декодирования на приемной стороне оператора.

Процедура оценки задержки передачи FPV-видео на уровне приложения реализуется на основе технологии оптического распознавания символов OCR (*аббр. от англ. Optical Character Recognition* – оптическое распознавание символов) по двум временным маркерам OCR1 и OCR2, формируемым на стороне источника и приёмника (рис. 6.4). Видеорегистрация осуществляется одной камерой (подключённой к вычислительному блоку обработки либо реализованной на базе мобильного устройства), обеспечивающей одновременную фиксацию изображений с обоих мониторов (мониторы 1 и 2) в

пределах одного видеокадра. Указанная организация измерений принципиально важна, поскольку в каждом кадре присутствуют две временные метки – исходная (до кодирования и передачи) и итоговая (после прохождения через КИО и декодирования), что исключает необходимость синхронизации времени между узлами стенда и тем самым снижает методическую погрешность.



Рисунок 6.4 – Моменты времени измерения задержки передачи видеопотока

Полученная видеозапись поступает на вычислительный блок обработки, где выполняется покадровый анализ с применением нейросетевой модели *easyocr* для распознавания текстовых временных меток формата *MM:SS:mmm* (минуты:секунды:миллисекунды). После корректной идентификации обеих меток в пределах одного и того же кадра величина задержки определяется как арифметическая разность соответствующих временных координат (итоговой и исходной). Для обеспечения устойчивости вычислений из дальнейшего рассмотрения исключаются кадры, в которых распознанные значения временных меток совпадают со значениями на смежных кадрах записи, что интерпретируется как отсутствие обновления видеоряда на мониторах (то есть отсутствие информативного изменения кадра).

С целью повышения достоверности статистической оценки задержки и исключения аномальных наблюдений применяется квартильный критерий выявления выбросов:

$$\begin{cases} L > Q1 - 1,5 \times IQR \\ L < Q3 + 1,5 \times IQR \end{cases} \quad (6.1)$$

Введём множество оценок задержки LAT и обозначим отдельное значение задержки как $L \in LAT$, первый квартиль как $Q1$, третий квартиль как $Q3$, а межквартильный размах как $IQR=Q3-Q1$. Тогда выбросами считаются значения, удовлетворяющие условию (6.1), после чего такие наблюдения исключаются из дальнейшего анализа.

Задержки, не удалённые по результатам применения квартильного критерия, формируют множество «просеянных» значений $LAT_{\text{итог}}$. Итоговая оценка задержки видеопередачи рассчитывается как среднее арифметическое по множеству $LAT_{\text{итог}}$ согласно выражению:

$$L_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{L \in LAT_{\text{итог}}} L, \quad (6.2)$$

где N – мощность множества $LAT_{\text{итог}}$. Полученные результаты позволяют сделать вывод о типичном (репрезентативном) уровне задержки для рассматриваемого режима передачи при сниженной чувствительности оценки к единичным аномальным ошибкам распознавания и/или нестандартным режимам обновления видеокадров.

Этап 2. Вычисление объективных метрик перцептивного качества восстановленных кадров видеопотока

Для измерения качества видеопотока производится расчет объективных метрик перцептивного качества DISTS и SSIM (2.2).

Этап 3. Измерение задержек и потерь команд взаимодействия оператора

Определение ПЭ T_3^k и $P_{\text{потерь}}^k$ осуществляется на прикладном уровне с использованием специализированного испытательного стенда (рис. 6.5). В качестве опорного события (эталоны) для измерения задержки распространения команды использовался интервал, связанный с регистрацией активации светоизлучающего диода, обеспечивающий однозначную фиксацию момента достижения исполнительного воздействия и его наблюдаемость в видеопоследовательности.

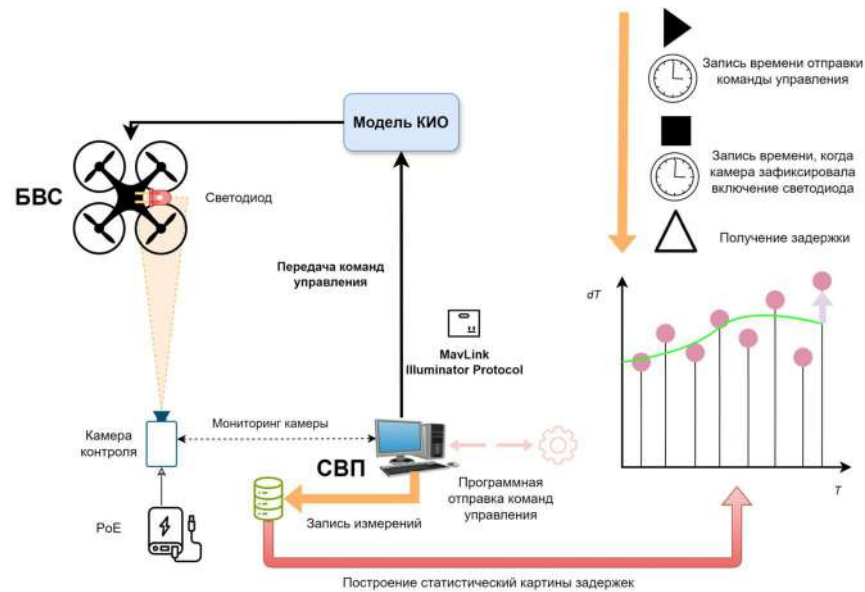


Рисунок 6.5 – Стенд измерения задержек КВО

Экспериментальная процедура базируется на поэтапной регистрации временных меток, формируемых на стороне передачи КВО и на стороне её фактического проявления в наблюдаемом восстановленном видео. На первом шаге со стороны терминала оператора на БПЛА передается КВО, конкретная реализация которой определяется особенностями тестируемой архитектуры системы FPV (в частности, может применяться передача по протоколу MavLink с расширением Illuminator Protocol). В момент отправки команды фиксируется временная метка T_1 , при этом команда инициирует включение светоизлучающего диода как целевого индикатора исполнения.

Далее осуществляется запись видеопотока с камеры с последующим анализом, направленным на детектирование момента визуально наблюдаемой активации диода; соответствующая временная метка обозначается как T_2 . На основе указанных меток временная задержка распространения КВО определяется как $\Delta T = T_1 - T_2$, то есть как интервал между моментом отправки команды и моментом её визуально подтверждённого исполнения в кадре. При отсутствии активации диода в течение интервала наблюдения длительностью 5 сек соответствующая команда классифицируется как потерянная, что используется при последующем расчёте ПЭ $R_{\text{потерь}}^K$. Для исключения наложения эффектов последовательных воздействий и обеспечения воспроизводимости

условий эксперимента через 2 сек после завершения фиксации результата передается команда деактивации диода, а ещё через последующие 2 сек осуществляется возврат к повторению процедуры, начиная с передачи очередной КВО или набора КВО.

С целью получения статистически обоснованных оценок реализуется серия из 1000 передач команд активации светоизлучающего диода. Итоговое значение задержки определяется с учётом исключения аномальных наблюдений по межквартильному критерию согласно выражению (6.1), что позволяет снизить чувствительность результатов к выбросам, обусловленным эпизодическими нарушениями передачи, декодирования либо визуального детектирования события. Параллельно на основе доли команд, классифицированных как потерянные по правилу 5 сек, вычисляется вероятность потерь КВО $P_{\text{потерь}}^K$ как второй целевой показатель.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о необходимости унификации наблюдаемого события при сравнительном анализе различных систем FPV в рамках заданного КИО. В частности, архитектура отдельных систем может не предусматривать наличие сигнального светоизлучающего диода; в этом случае рекомендуется измерять временной интервал между поступлением команды и моментом детектирования в восстановленном видеопотоке начала ротационного движения воздушного винта. Следует учитывать, что такой интервал потенциально включает дополнительные физические и исполнительные задержки (запуск привода, инерционность механики), вследствие чего может систематически превосходить задержку, фиксируемую по событию активации диода. Поэтому для обеспечения корректности сопоставления двух систем в рамках одного КИО целесообразно применять единообразный способ вычисления ПЭ T_3^K и $P_{\text{потерь}}^K$: либо по активации светоизлучающего диода, либо по детектированию инициации вращения воздушного винта для обеих сравниваемых систем.

На рассматриваемом этапе исследования также предусматривается дополнительная (опциональная) оценка временной рассинхронизации видеопотока T_p в соответствии с выражением (2.25), что позволяет расширить интерпретацию результатов.

Этап 4. Сравнение систем FPV при функционировании в КИО

Сравнение систем FPV в некотором КИО проводится при помощи BD-метрик [482] (от англ. Bjøntegaard Delta, дельта Бьёнтегора). Применяется метрика BD-SSIM.

Пусть сравнивается две системы FPV – A и B . Тогда для их сравнения необходимо.

1. Варьируя настройками пропускной способности *bitrate*, измерить среднее качество восстановленных кадров с помощью метрики SSIM для A и B .
2. Найти промежуточный параметр A_D как интеграл разности *bitrate* (рис. 6.7) [482]:

$$A_D = \int_{R_{min}}^{R_{max}} \Delta D(R) dR = \int_{R_{min}}^{R_{max}} D_A(R) - D_B(R) dR, \quad (6.3)$$

где 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).

Вычисление параметра AD (6.3) (рис. 6.6 – на примере PSNR) может производиться при помощи методов численного программирования, таких как: формула трапеций, формула Симпсона, правило 3/8, формула Милна (Боде), формула Вэддла (Уэддла) [406].

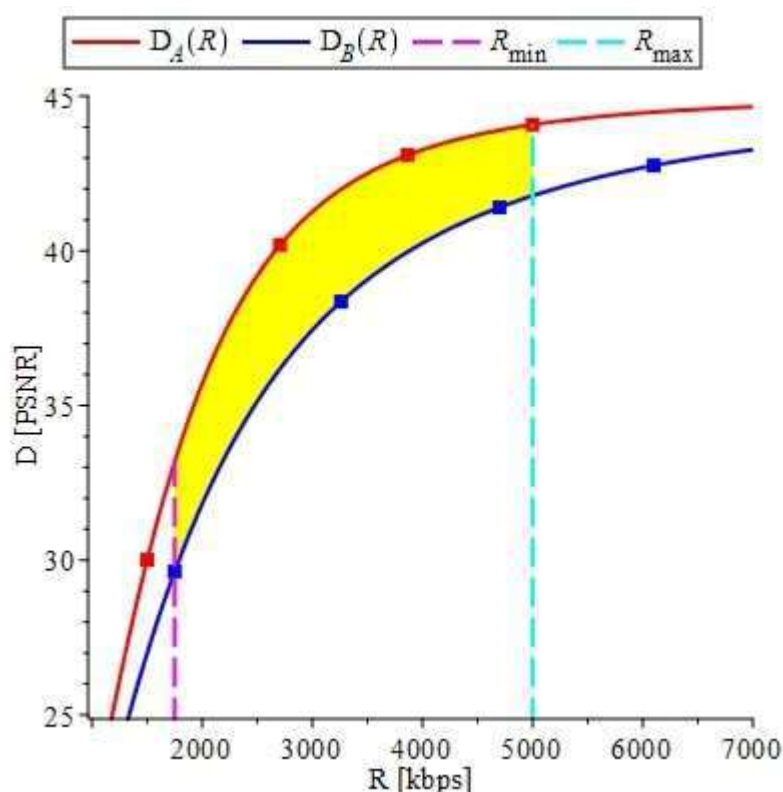


Рисунок 6.6 – Нахождение промежуточного параметра A_D

Пусть есть первичные множества требуемых значений пропускной способности для системы A $R'_A \in \{R'_{A0}, R'_{A1}, R'_{A2}, \dots, R'_{An}\}$ (Кбит/с) и B $R'_B \in \{R'_{B0}, R'_{B1}, R'_{B2}, \dots, R'_{Bm}\}$ (Кбит/с) такие, что выполняются условия: $R'_{A(i-1)} < R'_{Ai} < R'_{A(i+1)}$, $R'_{B(i-1)} < R'_{Bi} < R'_{B(i+1)}$.

Из первичных множеств выводятся вторичные множества требуемых значений пропускной способности для системы A $R_A \in \{R_{A0}, R_{A1}, R_{A2}, \dots, R_{Ap}\}$ (Кбит/с) и B $R_B \in \{R_{B0}, R_{B1}, R_{B2}, \dots, R_{Bs}\}$ (Кбит/с) пересчётом элементов в следующем порядке:

1. Если выполняется условие $R'_{A0} = R'_{B0}$, то пересчёт начальных элементов не выполняется.

2. Если $R'_{A0} < R'_{B0}$, то необходимо выполнить пересчёт начальных элементов множества R'_A . Из множества R'_A удаляются все элементы, которые удовлетворяют условию $\forall i: R'_{Ai} < R'_{B0}$, и, если $R'_{B0} \notin R'_A$, в множество R'_A добавляется элемент R'_{B0} .

3. Если $R'_{B0} < R'_{A0}$, то необходимо выполнить пересчёт начальных элементов множества R'_B . Из множества R'_B удаляются все элементы, которые удовлетворяют условию $\forall i: R'_{Bi} < R'_{A0}$, и, если $R'_{A0} \notin R'_B$, в множество R'_B добавляется элемент R'_{A0} .

4. Если выполняется условие $R'_{Ap} = R'_{Bs}$, то пересчёт конечных элементов не выполняется.

5. Если $R'_{Ap} > R'_{Bs}$, то необходимо выполнить пересчёт конечных элементов множества R'_A . Из множества R'_A удаляются все элементы, которые удовлетворяют условию $\forall i: R'_{Ai} > R'_{Bs}$, и, если $R'_{Bs} \notin R'_A$, в множество R'_A добавляется элемент R'_{Bs} .

6. Если $R'_{Bs} > R'_{Ap}$, то необходимо выполнить пересчёт конечных элементов множества R'_B . Из множества R'_B удаляются все элементы, которые удовлетворяют условию $\forall i: R'_{Bi} > R'_{Ap}$, и, если $R'_{Ap} \notin R'_B$, в множество R'_B добавляется элемент R'_{Ap} .

Определим также множества соответствующих им средних значений SSIM восстановленных кадров для системы A $D_A \in \{D_A(R_{A0}), D_A(R_{A1}), D_A(R_{A2}), \dots, D_A(R_{Ap})\}$ и для системы B $D_B \in \{D_B(R_{B0}), D_B(R_{B1}), D_B(R_{B2}), \dots, D_B(R_{Bs})\}$. Если по причине добавления элементов при составлении множеств R'_A и R'_B в результатах измерений нет соответствующих пропускным способностям средних SSIM $D_A(R_{Ak})$ и $D_B(R_{Bk})$, то такие значения интерполируются, например, полиномом Лагранжа.

Пусть при составлении вторичного множества требуемых значений пропускной способности R_A из первичного множества требуемых значений пропускной способности R'_A добавлен элемент R_{Ak} . Составим полином Лагранжа как [406]

$$L_n(R) = \sum_{i=0}^n D_A(R'_{Ai}) \times I_{ni}(R'_{Ai}), \quad (6.4)$$

$$\text{где } I_{ni}(R'_{Ai}) = \prod_{\substack{s=0 \\ s \neq i}}^n \frac{R - R'_{As}}{R'_{Ai} - R'_{As}} = \frac{(R - R'_{A0}) \dots (R - R'_{A(i-1)}) (R - R'_{A(i+1)}) \dots (R - R'_{An})}{(R'_{Ai} - R'_{A0}) \dots (R'_{Ai} - R'_{A(i-1)}) (R'_{Ai} - R'_{A(i+1)}) \dots (R'_{Ai} - R'_{An})}.$$

Тогда добавленное значение находится по формуле (6.4):

$$D_A(R_{Ak}) = L_n(R_{Ak}). \quad (6.5)$$

Определим также множества шагов

$$H_A = \{h_{A1}, h_{A2}, \dots, h_{Ap}\} = \{R_{A1} - R_{A0}, R_{A2} - R_{A1}, \dots, R_{An} - R_{A(p-1)}\}, \quad (6.6)$$

$$H_B = \{h_{B1}, h_{B2}, \dots, h_{Bs}\} = \{R_{B1} - R_{B0}, R_{B2} - R_{B1}, \dots, R_{Bm} - R_{B(s-1)}\}. \quad (6.7)$$

Вычислим A_D с помощью формулы Симпсона с переменным шагом [406]:

$$A_A \approx \sum_{i=1}^n \frac{h_{Ai}}{6} \times (D_A(R_{A(i-1)}) + 4D_A(R_{A(i-1/2)}) + D_A(R_{Ai})), \quad (6.8)$$

где

$$D_A(R_{A(i-1/2)}) = \frac{D_A(R_{A(i-1)}) + D_A(R_{Ai})}{2}, \quad (6.9)$$

$$A_B \approx \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{6} \times (D_B(R_{B(i-1)}) + 4D_B(R_{B(i-1/2)}) + D_B(R_{Bi})), \quad (6.10)$$

$$A_D = A_A - A_B. \quad (6.11)$$

Тогда BD-SSIM вычисляется по формуле [482]:

$$\text{BD-SSIM} = \frac{A_D}{(R_{\max} - R_{\min})}. \quad (6.12)$$

3. Определить абсолютную погрешность измерений. Погрешность величин A_A и A_B равна погрешности формулы Симпсона и оценивается как [406]:

$$\Delta(A_A) \leq \left| \frac{M_{A4} \times (R_{\max} - R_{\min})}{2880} \times h_{\max}^4 \right|, \quad (6.13)$$

$$\Delta(A_B) \leq \left| \frac{M_{B4} \times (R_{\max} - R_{\min})}{2880} \times h_{\max}^4 \right|, \quad (6.14)$$

где M_{A4} – максимальное значение модуля четвёртой производной функции $D_A^{(4)}(R)$, а $M_{B4} = D_B^{(4)}(R)$.

Погрешность разницы равна сумме погрешностей. Следовательно,

$$\Delta(A_D) = \Delta(A_A) + \Delta(A_B) \leq \left| \frac{(M_{A4} + M_{B4}) \times (R_{max} - R_{min})}{2880} \times h_{max}^4 \right|. \quad (6.15)$$

Тогда

$$\Delta(\text{BD-SSIM}) = \left| \frac{\Delta(A_D)}{(R_{max} - R_{min})} \right|, \quad (6.16)$$

$$\Delta(A_D) \geq 0 \Rightarrow \left| \frac{\Delta(A_D)}{(R_{max} - R_{min})} \right| = \frac{\Delta(A_D)}{|R_{max} - R_{min}|}, \quad (6.17)$$

$$\Delta(\text{BD-SSIM}) \leq \left| \frac{(M_{A4} + M_{B4})}{2880} \times h_{max}^4 \right|. \quad (6.18)$$

Возможны три варианта:

1. $\text{BD-SSIM} \in [-\Delta(\text{BD-SSIM}); \Delta(\text{BD-SSIM})]$ – системы FPV A и B принимаются приблизительно равными по соотношению качества и требуемого *bitrate*.

2. $\text{BD-SSIM} > \Delta(\text{BD-SSIM})$ – соотношение качества и необходимой пропускной способности системы A больше, чем системы B . Соответственно, система A лучше системы B по соотношению качества и требуемого *bitrate*.

3. $\text{BD-SSIM} < -\Delta(\text{BD-SSIM})$ – соотношение качества и необходимой пропускной способности системы A меньше, чем системы B . Соответственно, система B лучше системы A по соотношению качества и требуемого *bitrate*.

В случае, если необходимо сравнить две приблизительно равные по соотношению качества и необходимого *bitrate* системы, причём максимальный шаг h_{max} достаточно мал, требуется использовать формулу Вэддла с переменным шагом [406]:

$$A_A \approx \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{840} \times \left(41D_A(R_{A(i-1)}) + 216D_A\left(R_{A(i-1)} + \frac{h_i}{6}\right) + 27D_A\left(R_{A(i-1)} + \frac{h_i}{3}\right) + 272D_A(R_{A(i-1/2)}) + 27D_A\left(R_{Ai} - \frac{h_i}{3}\right) + 216D_A\left(R_{Ai} - \frac{h_i}{6}\right) + 41D_A(R_{Ai}) \right), \quad (6.19)$$

$$A_B \approx \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{840} \times \left(41D_B(R_{A(i-1)}) + 216D_B\left(R_{A(i-1)} + \frac{h_i}{6}\right) + 27D_B\left(R_{A(i-1)} + \frac{h_i}{3}\right) + 272D_B(R_{A(i-1/2)}) + 27D_B\left(R_{Ai} - \frac{h_i}{3}\right) + 216D_B\left(R_{Ai} - \frac{h_i}{6}\right) + 41D_B(R_{Ai}) \right), \quad (6.20)$$

погрешность которой значительно ниже формулы Симпсона при достаточно малых максимальных шагах h_{max} [406]:

$$\Delta(\text{BD-SSIM}) \leq \left| \frac{(M_{A8} + M_{B8})}{1567641600} \times h_{max}^8 \right| \ll \left| \frac{(M_{A4} + M_{B4})}{2880} \times h_{max}^4 \right|. \quad (6.21)$$

4. Для оценки максимального значения k -производной функции зависимости SSIM от *bitrate* Mk для некоторой системы X можно применять формулы численного дифференцирования. Следует найти на графике (рис. 6.8) такое R_m , что $D_X(R)$ в этой точке максимален при монотонном возрастании $R_m = R_{max}$.

Далее необходимо итеративно применять формулы некоторого порядка точности (в частности, при использовании в п. 3 формулы Симпсона – второго порядка, формулы Вэббла – седьмого порядка). Для второго порядка [406]:

$$D_X^{(k)} = \frac{-3D_X^{(k-1)}(R_m) + 4D_X^{(k-1)}(R_m + h) - D_X^{(k-1)}(R_m + 2h)}{2h}. \quad (6.22)$$

$$D^{(0)} = D. \quad (6.23)$$

При переменном шаге $h \notin \text{Const}$, когда не удаётся получить требуемые значения, эти формулы неприменимы, допускается применение интерполяционной формулы численного дифференцирования первого порядка [406]:

$$D_X^{(k)} = \frac{D_X^{(k-1)}(R_m) - D_X^{(k-1)}(R_m - h)}{h}. \quad (6.24)$$

Этап 5. Определение вероятности удовлетворения требований к ПЭ

Под вероятностью удовлетворения требований к ПЭ взаимодействия оператора и беспилотной системы от первого лица понимается вероятность того, что значения ПЭ входят в области требуемых $\{T_3^{Втр}, T_3^{Ктр}, SSIM^{тр}, DISTS^{тр}, P_{потерь}^{Втр}, P_{потерь}^{Ктр}\}$. Если ограничения на показатель нет, то областью требуемых значений является вся область значений показателя.

Для объективной оценки перцептивного качества восстановленных видеок кадров возможно применение либо метрики DISTS, либо метрики структурного сходства SSIM. Вместе с тем, в случае необходимости одновременного анализа, как восприятия изображения человеческим глазом, так и степени сохранения структурных характеристик изображения на пиксельном уровне, допустимо использование обеих метрик в совокупности. Такой комбинированный подход представляется особенно целесообразным в ситуациях, когда локальные искажения пиксельных значений не сопровождаются нарушением глобальной структуры кадра, однако процесс восстановления кадра может привести к возникновению артефактов, которые вызывают деградацию структурных особенностей восстановленного кадра.

В качестве альтернативы параметрам может рассматриваться задержка рассинхронизации взаимодействия и беспилотной системы T_p (2.31) и область её требуемых значений $T_p^{тр}$.

Определение вероятности удовлетворения требований к ПЭ определяется поэтапно.

Эффективность проектирования КИО между БПЛА и ТО во многом определяется корректностью выбора и настройки видеокодека [483]. Этот выбор, в свою очередь, должен базироваться на четко сформулированных, количественно обоснованных требованиях к перцептивному качеству восстановленного на стороне оператора. Традиционный подход, основанный на субъективных экспертных оценках, не всегда способен обеспечить необходимую адекватность и объективность, что обуславливает высокую

актуальность разработки формализованных методик [484]. Более того, нейросетевые кодеки вносят в изображение специфические артефакты (структурные, цветовые искажения, размытие), которые не всегда адекватно оцениваются стандартными объективными метриками качества, такими как SSIM [485]. Это создает еще одну, не менее важную проблему: существующие шкалы, используемые в процессе оценки приемлемого качества видео, которые разработаны для стандартных кодеков, оказываются неприменимыми для нейросетевых решений. Это, в свою очередь, требует разработки новых инструментов оценки и интерпретации.

Таким образом, возникает комплексная научная задача, состоящая из двух взаимосвязанных частей, которую сформулируем следующим образом.

Во-первых, необходимо разработать научно-методический аппарат, позволяющий количественно обосновывать требования к перцептивному качеству восстановленного видеопотока, исходя из целей функционирования беспилотной системы и приемлемых уровней риска.

Во-вторых, требуется создать и верифицировать инструментарий для адекватной оценки качества FPV-видео, сжатого НВК, и установить корректное соответствие между объективными численными метриками и субъективным восприятием качества оператором [486].

По мнению автора, решение данной комплексной задачи позволит существенно повысить эффективность проектирования и эксплуатации беспилотных систем.

Ключевым недостатком существующих подходов к формированию требований к перцептивному качеству FPV-видео является их преимущественно экспертный характер. Для устранения этого недостатка предлагается формализованный, многоэтапный подход, сущность которого заключается в анализе эмпирических данных, полученных в ходе контролируемых экспериментов, и последующем вычислении требуемых значений показателей перцептивного качества на основе статистической обработки видеопотоков, способных обеспечить успешное выполнение целевых

задач. Структурно-логическая схема предлагаемого подхода детально представлена на рис. 6.7.

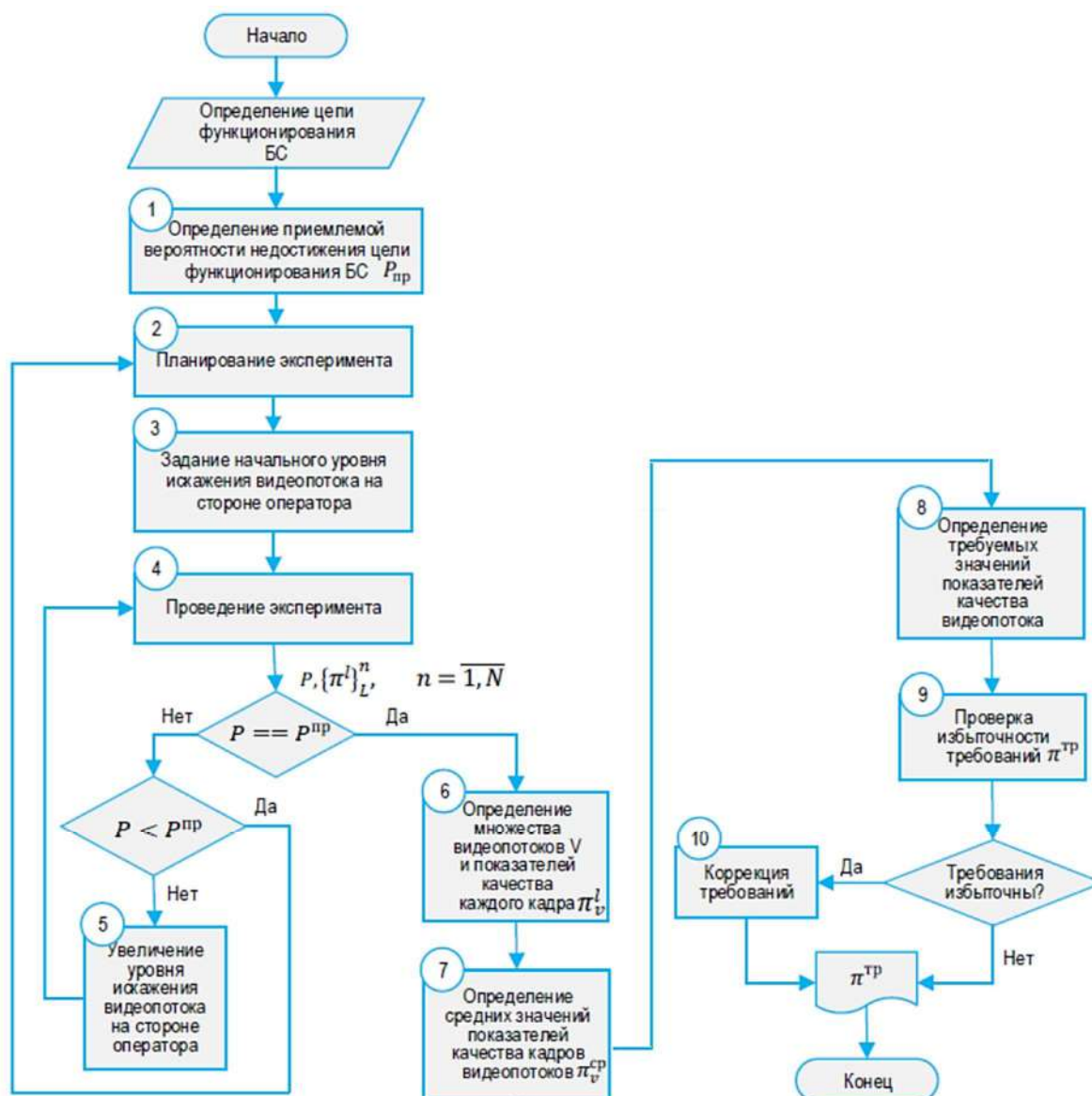


Рисунок 6.7 – Структурно-логическая схема подхода к обоснованию требований к перцептивному качеству восстановленного FPV-видеопотока

Представляется, что данный подход позволит перейти от субъективных оценок к объективным, количественно измеримым критериям, которые напрямую связаны с эффективностью функционирования системы БАС.

Рассмотрим содержание и логическую взаимосвязь ключевых этапов представленного подхода.

Этап 1: Формализация цели функционирования БС и определение приемлемого уровня риска.

Первоочередной задачей является четкая и однозначная формулировка цели функционирования беспилотной системы. Цель должна быть измеримой и иметь конкретные критерии достижения. Например, «безаварийное прохождение БПЛА заданного динамического маршрута между точками А и Б за время, не превышающее T » или «обнаружение N объектов заданного типа на площади S в течение времени T » [487]. От точности и полноты формализации цели непосредственно зависит адекватность всех последующих этапов.

После формализации цели необходимо определить приемлемый уровень риска ее недостижения. Поскольку процесс взаимодействия оператора и беспилотной системы подвержен влиянию множества стохастических факторов (изменение условий освещенности, появление внезапных препятствий, флуктуации в канале связи), достижение цели со стопроцентной вероятностью является весьма проблематичным. Поэтому вводится понятие приемлемой вероятности недостижения цели, которая выступает в качестве порогового значения риска [488]. Для количественной оценки этого показателя предлагается использовать метод вероятностной оценки риска (Probabilistic Risk Assessment, PRA), регламентированный, в частности, в стандарте ГОСТ Р ИСО 11231-2013. Процедура PRA включает идентификацию всех потенциальных сценариев, ведущих к срыву миссии, и расчет вероятности каждого из них. Вероятность i -го сценария P_i определяется как произведение вероятностей последовательных нежелательных событий, формирующих данный сценарий:

$$P_i = p(A_i^1)p(A_i^2|A_i^1) \dots p(A_i^{J_i}|A_i^1 \dots A_i^{J_i-1}), \quad (6.25)$$

где $p(A_i^1)$ - вероятность инициирующего нежелательного фактора (например, резкое падение пропускной способности канала), а $p(A_i^J| \dots)$ - условные вероятности последующих событий в случае наступления предыдущих.

Эти вероятности могут быть определены на основе статистического анализа данных эксплуатации или с помощью экспертных методов. Итоговая вероятность недостижения цели $P_{\text{общ}}$ рассчитывается путем суммирования вероятностей по всем I идентифицированным сценариям:

$$P_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^I P_i, \quad (6.26)$$

Полученное значение $P_{\text{общ}}$ служит основой для установления порогового значения приемлемого риска $P_{\text{нр}}$.

Этап 2: Планирование эксперимента. В рамках данного этапа осуществляется детальное планирование эксперимента, который должен максимально точно воспроизводить условия достижения ранее поставленной цели. Эксперимент включает как натурную, так и вычислительную компоненты. Натурная часть заключается в выполнении операторами полетного/наземного задания на реальном или виртуальном стенде. Для этого разрабатывается специальный динамический маршрут, насыщенный различными элементами, требующими от оператора концентрации и быстрой реакции (препятствия, узкие проходы, меняющиеся условия освещения). Успешным исходом считается достижение цели (например, прохождение маршрута без столкновений за заданное время). Важнейшим элементом планирования является определение необходимого и достаточного количества опытов N , которое обеспечивает статистическую значимость и репрезентативность результатов. Для расчета N следует использовать вероятностные методы, учитывающие ожидаемую дисперсию результатов и требуемый уровень доверительной вероятности.

Этап 3: Задание начальных условий искажения видеопотока. Этот этап необходим для того, чтобы определить начальный уровень искажений, вносимых в FPV-видеопоток на стороне оператора. Это позволяет имитировать воздействие неблагоприятных факторов реального канала информационного обмена. Для этой цели предлагается использовать специализированное программное обеспечение, такое как эмулятор сети NetDisturb [489]. Данный инструмент позволяет вносить в IP-поток пакетов дозированные искажения, связанные с задержками, джиттером, дублированием и потерями пакетов, а также искусственно ограничивать полосу пропускания. Моделирование этих факторов на сетевом уровне позволяет адекватно воспроизвести их влияние на качество итогового изображения, декодированного на уровне приложения. Как

показано в [369] количество потерянных пакетов является доминирующим фактором, влияющим на качество восстановленного видеопотока.

Этап 4: Проведение эксперимента. На данном этапе проводится основная серия из N запланированных экспериментов. По итогам каждого опыта фиксируются два ключевых результата: бинарный исход (цель достигнута/не достигнута) и полная запись видеопотока, который видел оператор. На основе полученных данных вычисляется фактическая, наблюдаемая в ходе эксперимента вероятность недостижения цели:

$$P_{\text{факт}} = \frac{N_{\text{неуд}}}{N}, \quad (6.27)$$

где $N_{\text{неуд}}$ – общее количество опытов, в которых цель не была достигнута.

Полученное значение $P_{\text{факт}}$ – сравнивается с целевым показателем $P_{\text{нр}}$ для принятия решения о дальнейших действиях.

Этап 5: Коррекция уровня искажений. Этот этап является частью итеративного цикла и выполняется в случае, если на предыдущем шаге было установлено, что $P_{\text{факт}} > P_{\text{нр}}$.

Рассмотрим три возможных варианта:

- $P_{\text{факт}} > P_{\text{нр}}$: фактический риск превышает допустимый. Это означает, что установленный уровень искажений видеопотока является чрезмерным и не позволяет операторам эффективно выполнять задачу. В этом случае осуществляется переход на третий этап – уровень искажений в эмуляторе сети уменьшается, после чего вся серия экспериментов (этап 4) проводится заново;

- $P_{\text{факт}} < P_{\text{нр}}$: фактический риск значительно ниже допустимого. Это может свидетельствовать о том, что условия эксперимента (например, сложность маршрута) были некорректно определены и не создают достаточной нагрузки на систему. В этом случае необходимо вернуться на второй этап для пересмотра плана эксперимента;

- $P_{\text{факт}} \approx P_{\text{нр}}$: наблюдаемая в эксперименте вероятность сбоя соответствует приемлемому уровню риска. Это означает, что найден именно

тот пороговый уровень качества видео, который находится на границе эффективного выполнения миссии. Достижение этого условия является сигналом для перехода к следующей фазе анализа.

Этап 6: Определение множества успешных видеопотоков. После того как итерационная процедура на четвертом и пятом этапах завершена, из общего массива экспериментальных данных выделяется подмножество V , которое включает в себя все видеопотоки из тех экспериментов, которые завершились успешно. Именно эти видеопотоки содержат информацию о минимально достаточном уровне качества, необходимом для достижения цели функционирования.

Этап 7: Определение средних значений показателей качества кадров. Этот этап предполагает проведение детальной обработки видеопотоков из множества V . Для каждого кадра каждого «успешного» видеопотока вычисляются объективные показатели качества, в первую очередь DISTS и SSIM. Для анализа полученных распределений и вычисления их статистических характеристик предлагается использовать метод ядерной оценки плотности Парзена-Розенблатта [490]. Этот метод позволяет восстановить функцию плотности вероятности для показателя качества π для каждого v -го видеопотока. На основе полученной функции плотности вычисляется первая мода (наиболее вероятное) показателя перцептивного качества для данного восстановленного видеопотока:

$$\pi_v^{\text{HB}} = \int_{-\infty}^{\infty} \pi_v f_v(\pi_v) d\pi_v, \quad (6.28)$$

Этап 8: Определение требуемых значений показателей перцептивного качества. На данном этапе вычисляются итоговые требуемые значения показателей перцептивного качества восстановленного видеопотока. Они определяются как среднее арифметическое от наиболее вероятных значений, рассчитанных на предыдущем этапе для всех V «успешных» видеопотоков:

$$\pi_{\text{тр}} = \frac{\sum_{v=1}^V \pi_v^{\text{HB}}}{V}, \quad (6.29)$$

Полученные таким образом значения $\text{SSIM}^{\text{тр}}$ и $\text{DISTS}^{\text{тр}}$ представляют

собой объективные, подтвержденные экспериментом минимальные уровни перцептивного качества, которые необходимы для успешного достижения цели функционирования беспилотной системы.

Этап 9: Проверка требований на избыточность. Финальным шагом разработанной методики является проверка выработанных требований на избыточность. Возможна ситуация, когда полученные пороговые значения π^{TP} окажутся недостаточно строгими. В таком случае требованиям будет удовлетворять большое количество различных конфигураций СИО, что затруднит процесс выбора оптимального проектного решения. Для проведения такой проверки предлагается использовать имитационное моделирование процесса информационного обмена, структурно-логическая схема которого представлена на рисунке 6.5.

В ходе моделирования для широкого спектра различных вариантов реализации СИО (например, для множества W различных нейросетевых кодеков w_{θ}) оценивается совместная вероятность выполнения всех установленных требований к качеству:

$$P_k(w_{\theta}) = P[(SSIM(w_{\theta}) \geq SSIM^{\text{TP}}) \cap (DISTS(w_{\theta}) \geq DISTS^{\text{TP}})]. \quad (6.30)$$

Результатом является зависимость $P_k(w_{\theta})$, пример которой представлен на рисунке 6.8.

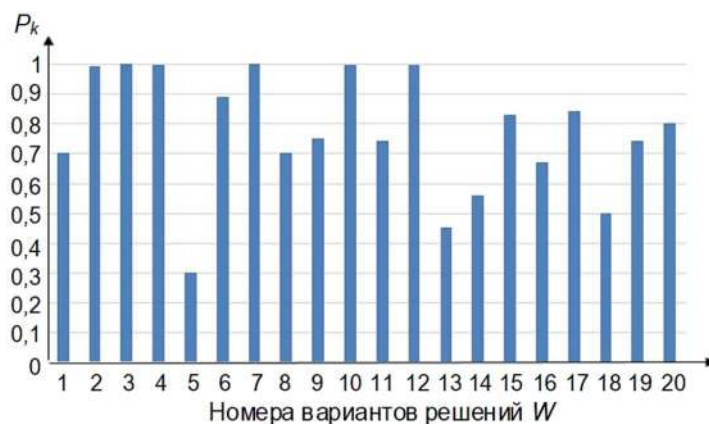


Рисунок 6.8 – Зависимость вероятности достижения всех требований к показателям перцептивного качества видеопотока от вариантов решений по созданию КИО

Этап 10: Коррекция требований. Данный этап выполняется в случае, если на предыдущем шаге была выявлена избыточность требований (то есть, существует несколько вариантов w_θ , для которых вероятность P_k близка к единице). Суть коррекции заключается в итеративном ужесточении требований (например, увеличении значения DISTS^{TP} и SSIM^{TP} , и повторном проведении имитационного моделирования до тех пор, пока не будет получен единственный или строго ограниченный набор оптимальных решений, удовлетворяющих новым, более строгим критериям (как показано на рис. 6.9, где после коррекции единственным оптимальным решением остался вариант w_7).

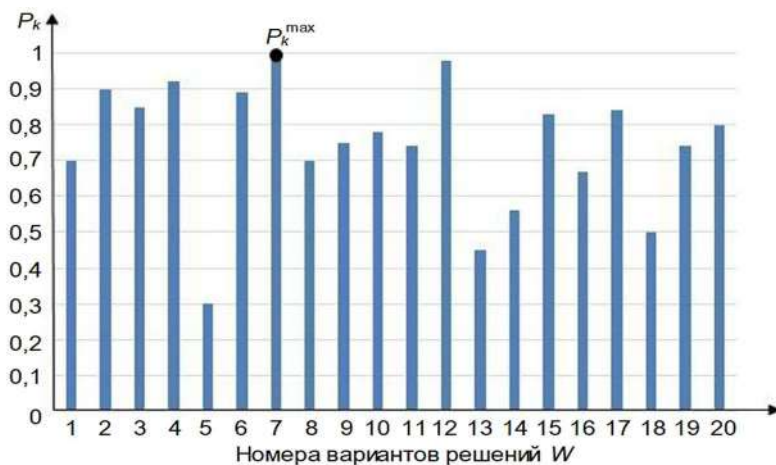


Рисунок 6.9 – Зависимость вероятности достижения всех требований к показателям качества от вариантов решений по созданию КИО при уменьшении требуемого значения показателя DISTS или SSIM

Таким образом, предложенная методика позволяет не только первично обосновать требования к перцептивному качеству, но и выполнить их настройку, обеспечивая при этом однозначность и обоснованность выбора наилучших технических решений при проектировании СИО для беспилотных систем.

Для апробации представленной методики количественного обоснования требований к перцептивному качеству восстановленного видеопотока использовалось беспилотное наземное транспортное средство (БНТС). Проведение экспериментальных исследований было направлено на выявление

закономерностей изменения эффективности FPV управления в зависимости от параметров ухудшения видеопотока при варьировании условий передачи данных в беспроводных каналах связи.

Структурная схема экспериментального поля приведена на рисунке 6.10. Испытательное поле включало семь стационарно расположенных объектов и шесть динамических препятствий, представленных в виде автономных мобильных платформ – роботов-пылесосов, перемещающихся по случайной траектории (рис. 6.11). Конфигурация подобной экспериментальной среды обеспечивает возможность оценки восприятия оператором видеопотока при различных уровнях помех и сложности сцены.

Управление БНТС (рис. 6.12) осуществлялось оператором в режиме «от первого лица», на основании видеопотока, поступающего с бортовой камеры в реальном времени. Задачей оператора являлось преодоление заданной полосы препятствий без столкновений с объектами окружающей среды. По результатам каждого испытания фиксировался бинарный показатель выполнения миссии: «успех» при отсутствии столкновений и «неуспех» в случае контакта с любым статическим либо динамическим препятствием. Такая схема регистрации результатов позволила провести количественную оценку влияния перцептивного качества восстановленного видеопотока на успешность взаимодействия оператора и беспилотной системы.

Получаемый видеопоток формировался при помощи камеры, установленной на борту БНТС и подключённой через интерфейс MIPI-CSI. Сжатие видеоданных выполнялось стандартным видеокодеком AVC/H.264. Передача видеопотока осуществлялась по беспроводному каналу Wi-Fi, пропускная способность которого искусственно ограничивалась до 300 Кбит/с. В качестве ключевого фактора, воздействующего на качество видеопотока, в процессе экспериментов изменялся параметр потерь пакетов *loss*, определяемый для каждой конфигурации испытаний. Данное варьирование обеспечивало регулируемое ухудшение видеопотока, позволяя исследовать критические границы восприятия информации оператором при различных

условиях передачи. Управление процессом передачи осуществлялось с применением протокола RTP, а для передачи КВО БНТС использовался независимый канал связи на основе технологии Bluetooth.

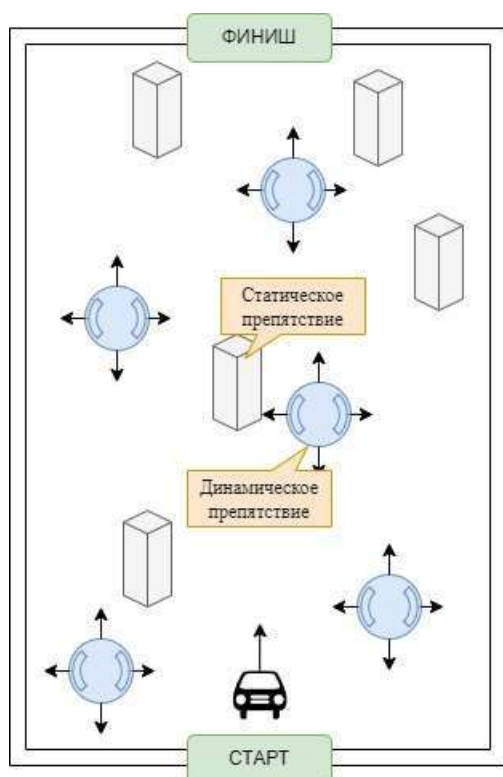


Рисунок 6.10 – Конфигурация экспериментов



Рисунок 6.11 – Фото зоны эксперимента

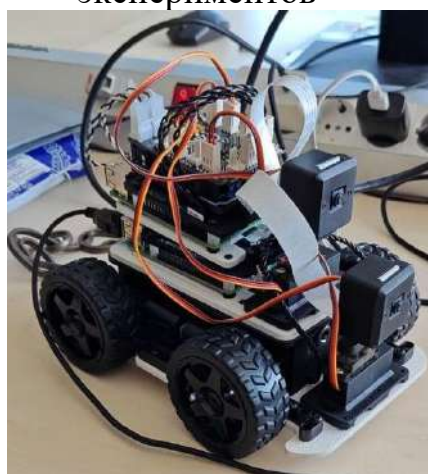


Рисунок 6.12 – Беспилотное наземное транспортное средство

Таблица 6.1 – Конфигурации натуральных экспериментов при 100 заездах

Номер конфигурации	$loss$, %
1	0
2	1
3	5
4	10
5	15
6	20

Выбор единственного варьируемого параметра $loss$ обоснован наличием прямой зависимости между уровнем потерь пакетов и объективными метриками качества видеопотока при применении кодека AVC/H.264 [491]. Таким образом, изменение данного параметра позволяет достоверно

моделировать деградационные процессы, характерные для каналов беспроводной передачи данных в реальных условиях эксплуатации.

Данные, полученные в ходе испытаний, свидетельствуют о выраженном влиянии потерь пакетов на функциональную устойчивость системы FPV. Наблюдается отчётливая тенденция снижения вероятности успешного прохождения маршрута при росте значения параметра *loss*. Это указывает на критическую зависимость эффективности FPV от стабильности и целостности видеопотока, сжатого кодеком AVC/H264. Полученные результаты позволяют сделать вывод о валидности предложенной методики для количественного анализа требований к перцептивному качеству восстановленного видеопотока в каналах передачи данных беспилотных систем, а также о её применимости при проектировании и оценке надёжности каналов.

Эксперименты выполнялись в шести различных конфигурациях передачи видеопотока, различающихся по величине параметра потерь пакетов (*loss*) в беспроводном канале связи (табл. 6.1). В каждой конфигурации проводилось по 100 заездов, что обеспечило статистически достоверную выборку объёмом 600 наблюдений. Такая организация экспериментов позволила проанализировать закономерности изменения показателей успешности FPV при постепенном ухудшении качества видеосвязи.

Для объективной оценки параметров видеопотока осуществлялась одновременная запись двух видеопоследовательностей: исходной – на борту БНТС, и восстановленной – на ТО. Данный подход позволил сопоставить исходный и переданный видеопотоки и вычислить объективные метрики качества SSIM и DISTS. Испытания проводились как в дневных условиях освещённости (рис. 6.13), так и в ночных (рис. 6.14), что позволило учесть влияние различных уровней освещённости и шума сенсора на общие характеристики видеосигнала и надёжность восприятия оператором визуальной информации.

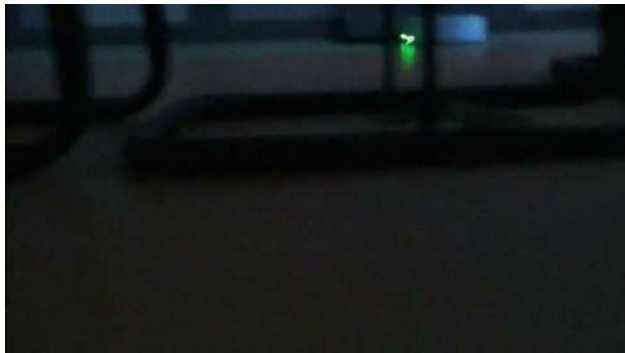


а) исходный кадр



б) восстановленный кадр

Рисунок 6.13 – Пример кадров видеопотока в дневное время суток



а) исходный кадр



б) восстановленный кадр

Рисунок 6.14 – Пример кадров видеопотока в ночное время суток

Каждый отдельный заезд завершался фиксацией бинарного признака успеха *success*, который принимал значение 1 при успешном прохождении маршрута без столкновений либо 0 при контакте БНТС с любым препятствием. Для каждой конфигурации испытаний вычислялась вероятность успешного прохождения динамического маршрута P как доля заездов, завершившихся без ошибок. Параллельно определялись средние значения метрик SSIM, DISTS и PSNR для каждой серии экспериментов. Данные таблицы 6.1 отражают используемые уровни потерь пакетов и структуру экспериментальных серий. На основе этих значений в соответствии с [491] предъявляются требования к минимальным значениям метрик SSIM, DISTS и PSNR для взаимодействия оператора и БПЛА при различных значениях P .

На основании полученных данных установлено, что вероятность успеха P имеет выраженную зависимость от объективных метрик перцептивного качества восстановленного видеопотока (рис. 6.15). С ростом доли потерянных пакетов в канале передачи наблюдается закономерное снижение SSIM и

увеличение DISTS, сопровождающиеся падением вероятности успешного достижения цели функционирования БНТС. Так, согласно таблице 3.2, при отсутствии потерь ($loss=0\%$) вероятность успеха составляет $P=1$, а средние значения SSIM, DISTS и PSNR равны 0,79, 0,23 и 34,67 дБ соответственно. При уменьшении пропускной способности канала вследствие роста потерь до $loss=20\%$ вероятность успеха снижается до $P=0,15$, а соответствующие значения метрик изменяются до SSIM=0,61, DISTS=0,33 и PSNR=28,90 дБ.

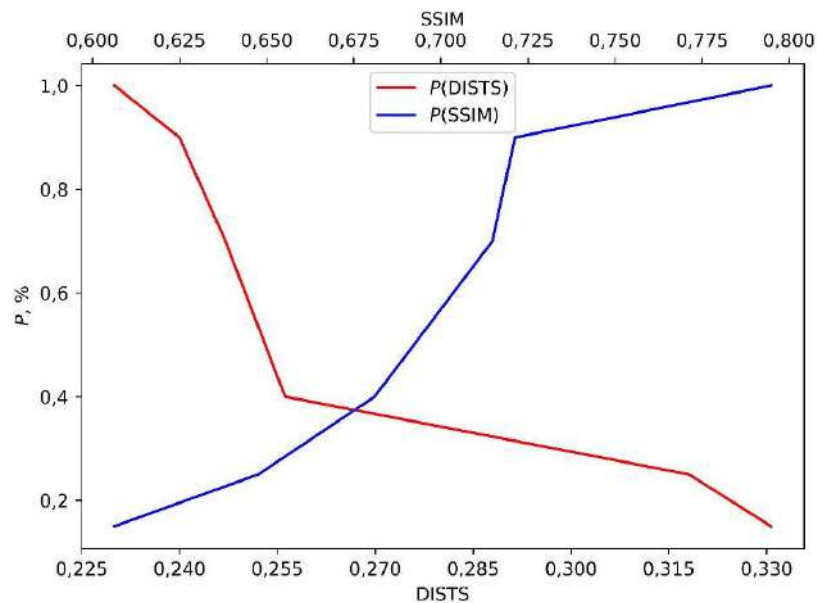


Рисунок 6.15 – Зависимость вероятности успеха выполнения задания при FPV от объективных метрик качества восстановленного видеопотока

Данные таблицы 6.2 свидетельствуют о выраженной корреляции между объективными метриками качества видеопотока и вероятностью успешного прохождения маршрута. Наблюдается устойчивая тенденция к снижению значений как SSIM и DISTS, так и PSNR при росте уровня потерь $loss$, что сопровождается увеличением дисперсии распределений показателей (увеличение σ с 0,08 до 0,15 по SSIM; с 2,29 до 2,44 по PSNR и с 0,2250 до 0,3460 по DISTS). Данный эффект отражает возрастание нестабильности восстановленного видеопотока при ухудшении качества канала связи и подтверждает наличие нелинейной зависимости восприятия оператором визуальной информации от параметров ухудшения видеопередачи.

Таблица 6.2 – Результаты экспериментов по значениям метрик перцептивного качества восстановленного видеопотока

№ эксп.		1	2	3	4	5	6
<i>P</i>		1,00	0,90	0,70	0,40	0,25	0,15
SSIM	СЗ	0,79	0,72	0,71	0,68	0,65	0,61
	МЕД	0,80	0,73	0,72	0,69	0,64	0,61
	σ	0,08	0,11	0,11	0,14	0,15	0,12
	НВ	0,81	0,73	0,72	0,70	0,63	0,61
PSNR	СЗ	34,67	34,39	32,28	31,70	29,87	28,90
	МЕД	34,97	34,42	31,93	31,20	29,48	28,65
	σ	2,29	2,32	2,44	2,22	1,78	0,95
	НВ	35,56	34,47	31,17	30,67	29,46	28,58
DISTS	СЗ	0,2300	0,2400	0,2471	0,2562	0,3181	0,3307
	МЕД	0,2264	0,2359	0,2446	0,2552	0,3162	0,3357
	σ	0,0396	0,0547	0,0414	0,0583	0,0718	0,0654
	НВ	0,2250	0,2300	0,2430	0,2540	0,3140	0,3460

В результате экспериментов были получены характеристики законов распределения метрик перцептивного качества восстановленного видеопотока для различных конфигураций испытаний (табл. 6.2, где СЗ – среднее значение; МЕД – медиана; σ – среднеквадратическое отклонение; НВ – наиболее вероятное значение). Для анализа распределений значений SSIM и DISTS использовался метод непараметрической оценки плотности вероятности Парзена–Розенблатта с выбором ширины окна по правилу Стёрджеса [491], что обеспечило сглаженную аппроксимацию эмпирических распределений.

На рисунке 6.16 приведён пример оценки распределений для первой конфигурации экспериментов при $loss=0\%$. Анализ полученных кривых показал, что при отсутствии потерь плотность распределения метрик имеет ярко выраженный пик с симметричным профилем, тогда как при увеличении параметра $loss$ распределение приобретает асимметричный характер, демонстрируя смещение моды в сторону меньших значений и расширение диапазона отклонений.

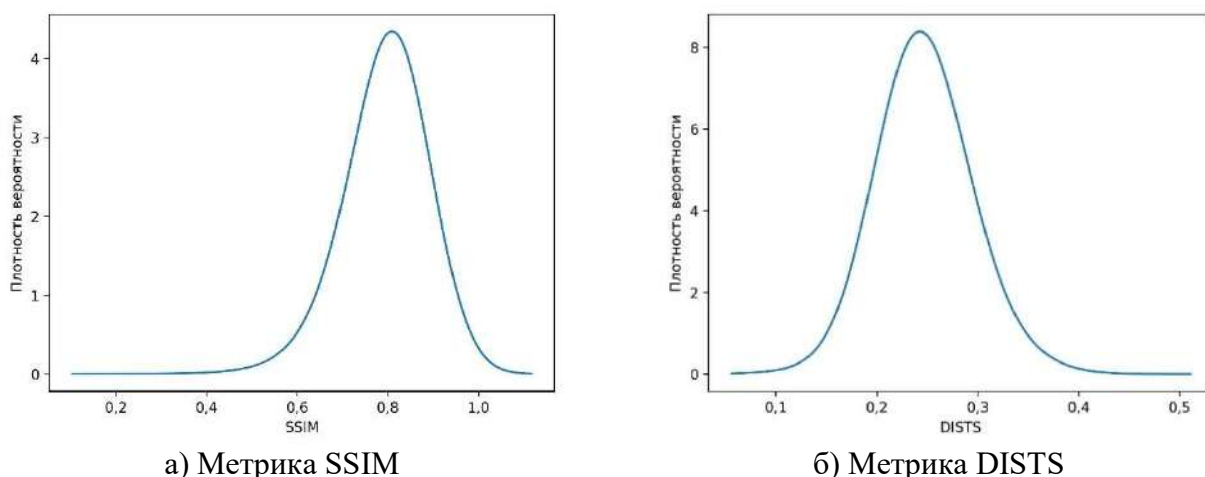


Рисунок 6.16 – Распределение плотности вероятности метрик качества на примере первой конфигурации эксперимента

Для определения количественных требований к метрикам качества $DISTS^{тр}$, $SSIM^{тр}$ и $PSNR^{тр}$ были вычислены наиболее вероятные значения данных метрик исключительно для успешных прогонов в каждой конфигурации (табл. 6.3).

Таблица 6.3 – Наиболее вероятные значения успешных заездов и требования

№	1	2	3	4	5	6
P	1,00	0,90	0,70	0,40	0,25	0,15
$SSIM_{HB}$	0,81	0,73	0,72	0,70	0,64	0,62
$PSNR_{HB}$	35,56	34,47	31,00	30,49	29,16	28,62
$DISTS_{HB}$	0,23	0,23	0,24	0,26	0,32	0,33

На основе полученных данных были определены требуемые значения метрик $DISTS^{тр}$, $PSNR^{тр}$ и $SSIM^{тр}$, обеспечивающие заданную вероятность достижения цели функционирования БПЛА. Для вероятности успеха 90% установлены следующие значения: $SSIM^{тр} \geq 0,77$, $DISTS^{тр} \geq 0,23$, $PSNR^{тр} \geq 35,02$. При вероятности $P=95\%$ соответствующие требуемые значения составляют $SSIM^{тр} \geq 0,81$, $DISTS^{тр} \geq 0,23$ и $PSNR^{тр} \geq 35,56$.

Совокупность полученных результатов подтверждает, что для обеспечения устойчивого FPV взаимодействия требуется поддержание минимальных значений $DISTS \geq 0,23$, $SSIM \geq 0,75$ и $PSNR \geq 33$ дБ. При таких параметрах обеспечивается стабильная вероятность успешного прохождения маршрута, превышающая ($P=0,7$), что соответствует допустимым границам

эксплуатационной надёжности системы FPV.

Таким образом, результаты натурных экспериментов подтверждают справедливость исходной гипотезы о зависимости эффективности взаимодействия оператора с беспилотной системой от характеристик перцептивного качества восстановленного видеопотока. Полученные значения метрик DISTS и SSIM могут рассматриваться в качестве количественных критериев для формирования требований к перцептивному качеству восстановленного видеопотока при проектировании систем FPV.

6.3 Результаты испытаний

На основе НВК и адаптивной системы информационного обмена, ориентированных на реализацию FPV, в рамках проведённого исследования был разработан специализированный программно-аппаратный комплекс (ПАК), структурная схема которого приведена на рисунке 6.17. Разработка указанного ПАК осуществлялась в составе работ по реализации особо значимого проекта индустриального центра компетенций (ИЦК) «Спутниковая связь» и была направлена на решение прикладной задачи «Разработка программно-аппаратного комплекса управления БАС в гибридных орбитально-наземных сетях связи», что обусловило требования к модульности, вариативности каналов передачи и воспроизводимости экспериментальной конфигурации.

Функциональная структура ПАК предусматривает разнесение вычислительных и коммуникационных компонентов между ТО и БПЛА, при этом внешний вид терминалов и модулей расширения представлен на рисунке 6.18. На стороне ТО используется терминал на базе персонального компьютера, на котором размещено программное обеспечение нейросетевого декодера НВК. Модуль БПЛА включает в себя модем передачи данных, терминал БПЛА (выполненный в виде мини-ПК) для размещения нейросетевого кодера НВК, а также FPV-модуль расширения, обеспечивающий исполнение нейронных сетей. С учётом принятой архитектуры ГОНСС применяемый модем может функционировать как в спутниковом (космический сегмент), так и в сотовом

(наземный сегмент) варианте, что позволяет обеспечить сопоставимость измерений при смене сегментов без изменения логики кодирования и декодирования видеопотока.



Рисунок 6.17 – Структурная схема ПАК



а) комплект терминала БПЛА



б) комплект терминала оператора

Рисунок 6.18 – Фото ПАК

В настоящей главе выполняется исследование характеристик разработанного НВК (см. главу 3) при передаче FPV-видеопотока через различные сегменты фрагмента ГОНСС. В качестве наземного сегмента в экспериментальной постановке используется сотовая сеть связи общего пользования стандарта LTE/LTE adv. В качестве космического сегмента применяется геостационарная система спутниковой связи «Ямал-601» (АО «Газпром – космические системы») и система спутниковой связи специального назначения «Благовест». В качестве исследуемых ПЭФ рассматриваются: T_3^B и $P_{\text{потерь}}$, что обеспечивает возможность сопоставления качества работы кодека в

условиях принципиально различных по задержкам и доступной пропускной способности сегментов фрагмента ГОНСС.

6.3.1. Испытания в моделируемой среде в ФГБУ «16 ЦНИИИ» Минобороны России

Целью испытаний являлось изучение технических аспектов применения разработанной технологии сжатия видеопотока, включая оценку параметров пропускной способности и качества изображения, с целью определения её потенциала, эффективности и целесообразности использования в автоматизированных системах Министерства обороны Российской Федерации. Испытания проводились в нормальных климатических условиях на стенде, развернутом на территории ФГБУ «16 ЦНИИИ» Минобороны России (г.Мытищи). Внешний вид испытательного стенда представлен на рисунке 6.19. Схема испытательного стенда представлена на рисунке 6.20.

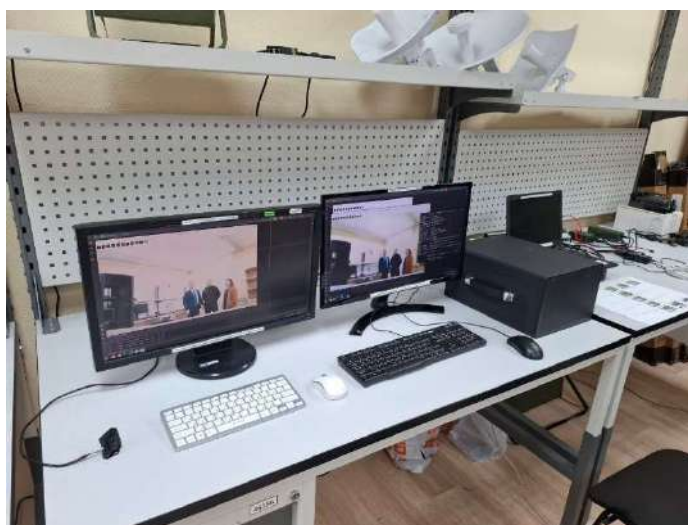


Рисунок 6.19 – Внешний вид испытательного стенда

Функционирование технологии НВК проверялось в двух режимах: прямое соединение оборудования с подключением эмулятора сетей *Network Emulator II* (рис. 6.20) и в работе по реальному низкоскоростному спутниковому каналу связи через станции спутниковой связи (ССС) Р-444-ПТН (см. параграф 6.3.2.2).

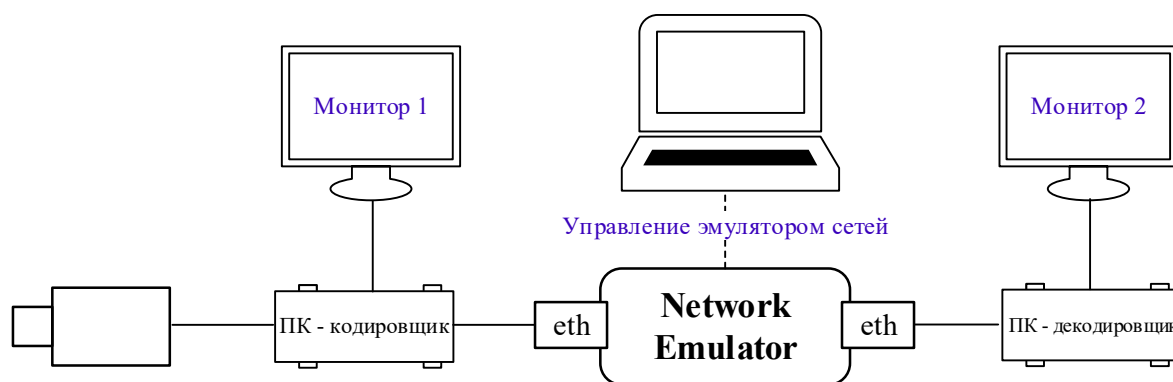


Рисунок 6.20 – Схема испытательного стенда с подключением эмулятора сетей Network Emulator II

Состав испытательного стенда:

- ПК-кодировщик (терминал БПЛА): ОС Linux Mint 22.1 x86_64; CPU Ryzen 7 8845HS; GPU NVIDIA GeForce RTX 4080M.
- ПК-декодировщик (терминал СО): ОС: Linux Mint 22.1 x86_64; CPU Intel Core i7 13700K; GPU NVIDIA GeForce RTX 4080 SUPER.
- USB-камера с MJPEG видеопотоком и разрешением 1280x720, 30 FPS.
- Эмулятор сетей *Network Emulator II*.

Для оценки качества получаемых кадров после декодирования (H264, H265, H266) в режиме прямого соединения ПК-кодировщик и ПК-декодировщик были соединены кабелем Ethernet, через эмулятор сетей *Network Emulator II*. Далее был последовательно запущен видеопоток с IP-видеокамеры в различных режимах. Для каждого кодека проведены отдельные серии измерений в идентичных условиях со следующими сочетаниями параметров сети:

- 0% потерь пакетов, задержка 0 мс;
- 2% потерь пакетов, задержка 6 мс;
- 10% потерь пакетов, задержка 6 мс.

По результатам испытаний была проведена экспертная оценка качества видеоизображения и значений битрейта на основании данных, полученных с эмулятора сетей *Network Emulator II*, а также сформированы сравнительные

таблицы с информацией о битрейте и качестве изображений, полученных разными кодеками (AVC/H264, HEVC/H265, HBK).

Результаты испытаний в моделируемой среде

Значения битрейта и данные о качестве видеоизображения представлены в таблице 6.4. Подробные графики и рисунки с демонстрацией видеокодеков в различных условиях представлены в приложении Б.

Зафиксирована значительная экономия полосы пропускания без нарушения качества видеоизображения. Практический выигрыш составил до 144% при 10% потерь пакетов и задержке 6 мс и до 491% при отсутствии ограничения качества канала.

Таблица 6.4 – Значения битрейта и данные о качестве видеоизображения проверяемых видеокодеков в различных режимах испытаний

№ п/п	Заданные параметры сети	Значение битрейта (Кбит/с)			Данные об изображении
		H.264	H.265	HBK	
1.	0% потерь пакетов; задержка 0 мс	12058,93	8341,02	2040,73	Видеоизображение высокого качества
2.	2% потерь пакетов; задержка 6 мс	845,84	694,44	415,95	H.264, H.265 – в видеоизображении присутствуют незначительные артефакты, качество удовлетворительное, HBK – изображение высокого качества
3.	10% потерь пакетов; задержка 6 мс	925,23	830,52	379,25	H.264, H.265 – в видеоизображении присутствуют значительные артефакты, качество изображения неудовлетворительное, HBK – изображение высокого качества

Качество изображения оценивалось по метрикам SSIM, PSNR, MSE и DISTS, что позволило провести сравнительную оценку применения стандартных кодеков (AVC/H264, HEVC/H265) и видеокодека HBK (табл. 6.5). Измерения метрик проведено на основе кадров, полученных за минуту записи видеопотока HD качества.

Таблица 6.5 – Сравнение метрик качества

Кодек	SSIM	PSNR	MSE	DISTS
AVC/H264	0.61	29.81	68.28	0.48
HEVC/H265	0.71	30.62	57.78	0.35
HBK	0.96	35.58	19.2	0.08

Изменение объективных метрик качества SSIM, PSNR, MSE, DISTS в зависимости от используемого видеокодека продемонстрировано на рис. 6.21.

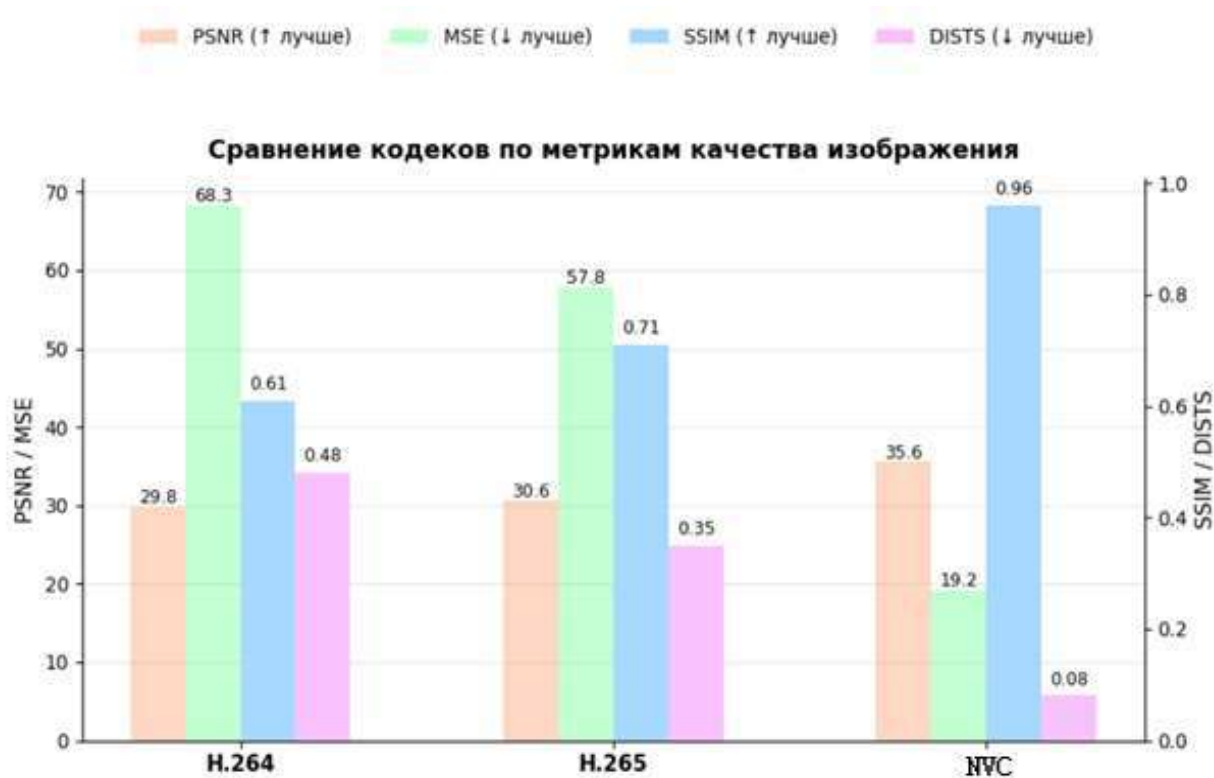


Рисунок 6.21 – Метрики качества для стандартных кодеков (AVC/H264, HEVC/H265) и видеокодека HBK

6.3.2. Космический сегмент ГОНСС

6.3.2.1 Геостационарная спутниковая система связи «Ямал-601»

В рамках проведённого исследования для испытания характеристик HBK при передаче через геостационарные каналы связи была произведена замена блока модели КИО экспериментальной установки (рис. 6.22) реальным спутниковым каналом связи. В качестве экспериментального канала применён

спутниковый канал, организованный с использованием абонентского терминала «РС-30М» производства АО «РЕШЕТНЕВ» (рис. 6.23) на базе модема Gilat SkyEdge II CPE. «Терминал БПЛА» осуществлял кодирование тестового видеопотока как стандартными видеокодеками (AVC/H.264, HEVC/H.265, AV1), так и нейросетевым видеокодеком НВК с цифровой видеокамеры, функционирующей в режиме MJPEG сжатия с максимальным качеством. Цифровая камера использовалась для оцифровки видео взаимодействия оператора и беспилотной системы с частотой кадров 30 кадр/с и передачи оцифрованных кадров с минимальным сжатием MJPEG в терминал БПЛА для последующего кодирования исследуемыми кодеками и передачи по КИО. Как следует из архитектуры, данная конфигурация канала формирует гибридный КИО космического сегмента ГОНСС (рис. 2.14а).

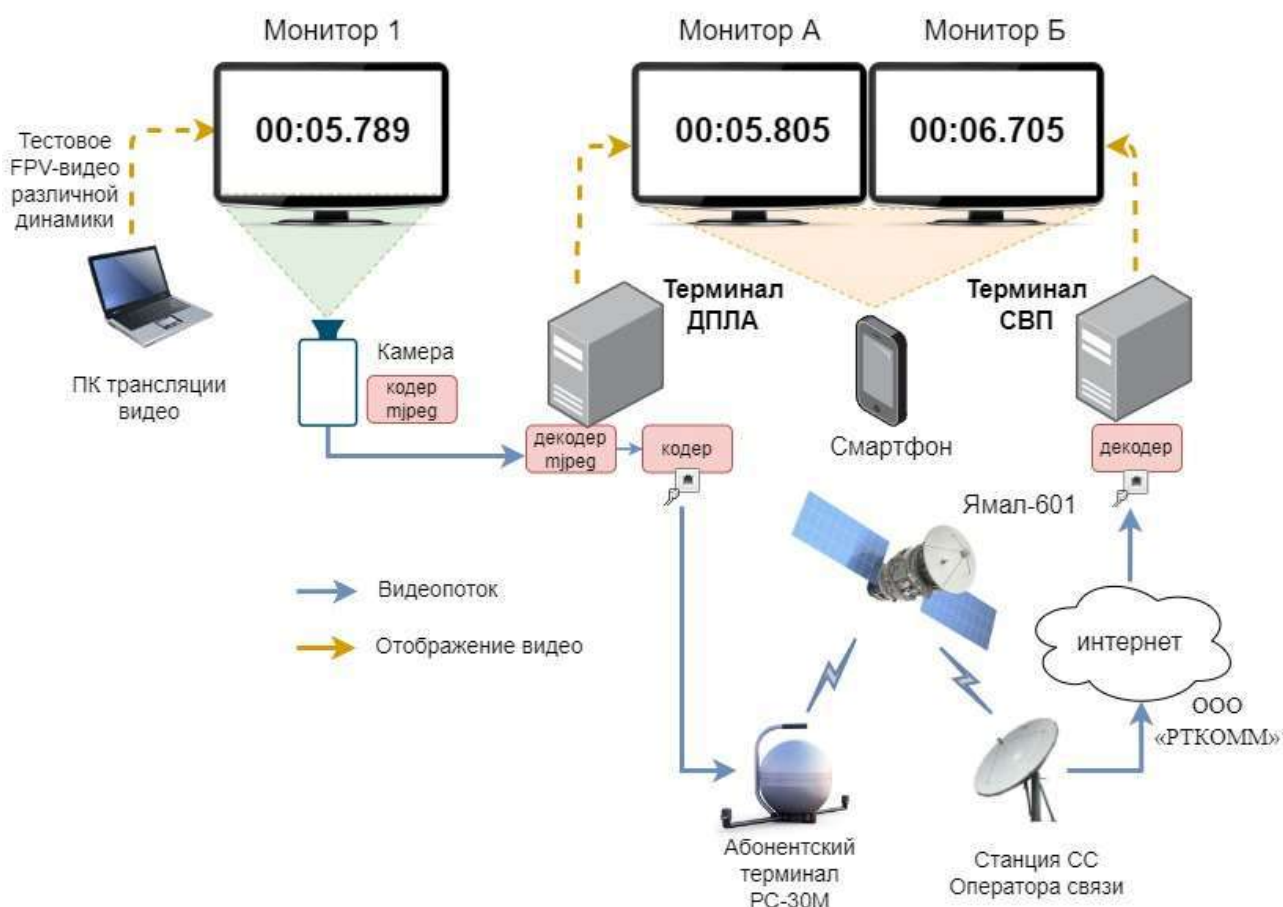


Рисунок 6.22 – Экспериментальная установка (ГСО)

Параметры спутникового канала связи приведены ниже:

- скорость передачи видеопотока – 1,76 Мбит/с (Upload);
- сетевая задержка (ping) – 651 мс;
- джиттер (jitter) – 329 мс;
- уровень приёма сигнала – 4,6 дБм при эталонном уровне 6,3 дБм;
- мощность передачи – 65,3 дБм на фоне потолка в 68,3 дБм.



Рисунок 6.23 – Абонентский терминал PC-30M

Климатические условия испытаний: температура окружающей среды +3°C, сплошная облачность, осадки в виде дождя.

Для проведения испытаний подготовлены три видео файла, эмулирующих полёт БПЛА с различной динамикой (высокая, средняя, низкая) с частотой кадров 25 кадр/с. Примеры кадров видео взаимодействия оператора и беспилотной системы различной динамики представлены на рисунке 6.24.



а) высокая



б) средняя



в) низкая

Рисунок 6.24 – Пример кадров видео взаимодействия оператора и беспилотной системы различной динамики

Видеоматериал высокой динамики характеризуется быстрой сменой полётной обстановки городского типа, резкими поворотами БПЛА и наличием множества мелких разноцветных деталей на изображении (рис. 6.24а). Видеоматериал средней динамики демонстрирует умеренную смену полётной обстановки в условиях облачности и содержит сцены плавного полета над сельской местностью с элементами инфраструктуры сельского аэродрома (рис. 6.24б). Видеоматериал низкой динамики отражает медленное

прямолинейное движение над лесным массивом без резких поворотов и изменений высоты (рис. 6.24в).

На первом этапе методики была проведена серия экспериментов по передаче полезной нагрузки *payload* различного размера, эмулирующих передачу кадров видеопотока различного размера, сжатых нейросетевым видеокодеком, между передающей и принимающей сторонами через спутниковый канал связи с целью измерения ПЭФ: T_3^B и $P_{\text{потерь}}$. Результаты представлены в таблице 6.6.

Таблица 6.6 – Результаты измерения T_3^B и $P_{\text{потерь}}$ в КИО

Размер кадров, байт	$P_{\text{потерь}}, \%$		T_3^B							
			$Mx, \text{мс}$		σ		Мин.		Макс.	
	СПБ	Мск	СПБ	Мск	СПБ	Мск	СПБ	Мск	СПБ	Мск
100	0,08	0,00	340	361,77	32,39	39,97	312,73	322,97	450,41	455,22
300	0,58	0,00	341,65	363,94	45,54	54,47	311,89	321,68	488,46	514,20
500	1,01	2,00	339,89	361,17	54,58	76,91	317,21	316,76	525,44	570,28
700	2,11	1,00	601	508,12	96,63	105,49	313,20	317,51	689,71	679,70
1 000	1,01	1,00	694,96	516,92	87,80	105,65	388,51	326,43	772,62	704,62
2 000	0,67	2,00	778,29	584,21	55,91	120,43	558,81	356,06	873,52	815,49
3 000	1,75	10,00	801,66	754,85	183,82	38,06	322,71	625,94	978,07	827,93
4 000	1,23	3,00	756,57	781,07	90,42	45,16	495,61	679,84	931,29	876,35
5 000	2,88	15,00	814,68	815,19	53,19	45,67	610,12	705,14	897,38	895,59
7 000	2,48	3,00	778,49	791,78	45,76	21,38	634,67	735,13	897,68	825,38
10 000	2,14	34,00	796,17	825	147,96	33,57	353,00	730,39	958,35	876,05
15 000	3,28	3,00	803,9	822,47	167,60	37,27	318,74	740,24	977,46	906,55

В рамках проведённого исследования была проанализирована зависимость T_3^B от размера полезной нагрузки *payload* (размер кадра НВК) в условиях функционирования системы спутниковой связи, результаты которой представлены в таблице 6.3 и на рисунке 6.25. В качестве основы для анализа использовались экспериментальные данные, полученные в двух локациях – Санкт-Петербург и г.Москва, что позволило учесть влияние территориальных и инфраструктурных факторов на характеристики канала связи.

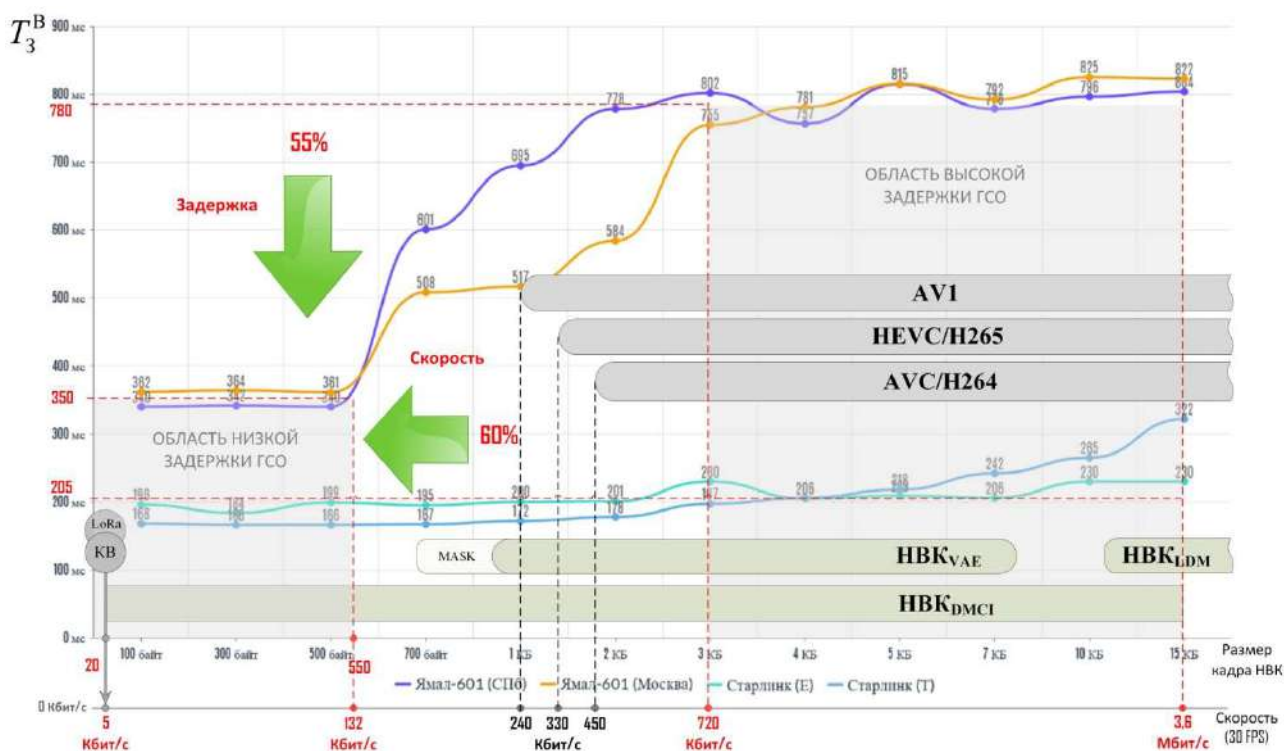


Рисунок 6.25 – Зависимость T_3^B от размера полезной нагрузки

Из рисунка 6.25 следует, что при размере полезной нагрузки, лежащей в диапазоне [100; 550] байт, наблюдаются лишь незначительные колебания задержки T_3^B , средние значения которой варьируются в интервале [339,89; 363,94] мс. При этом стандартное отклонение ПЭ не превышает диапазон [32,39; 76,91] мс, что свидетельствует о стабильности характеристик канала в указанных пределах размера *payload*. Увеличение размера полезной нагрузки до диапазона (500; 3000] байт приводит к росту задержки приблизительно в два раза (с 361,17 мс до 778,29 мс), сопровождающемуся умеренным увеличением среднеквадратического отклонения (до 120,43 мс). В области значений полезной нагрузки свыше 3000 байт фиксируются флуктуации задержки, обусловленные загрузкой сети передачи данных и влиянием переменных факторов среды. В указанных условиях наиболее вероятное значение задержки колеблется в диапазоне [754,85; 825] мс при умеренном уровне дисперсии до 183,82 мс, что указывает на рост нестабильности передачи при существенном увеличении объёма *payload*. Кроме того, анализ показал, что для минимизации T_3^B достаточно обеспечить скорость передачи не более 132 Кбит/с при

использовании нейросетевого видеокодека. Кроме того, потенциал уменьшения T_3^B при использовании нейросетевого видеокодека составляет 55% относительно стандартных видеокодеков.

Для оценки T_3^B реального видеопотока взаимодействия оператора и беспилотной системы была проведена серия натурных испытаний по передаче видеопотоков различного разрешения (HD и Full HD) и динамики (высокой, средней и низкой) (рис. 6.25) через гибридный КИО космического сегмента. Канал включал геостационарную спутниковую систему связи «Ямал-601» и наземный интернет-сегмент. Передача осуществлялась с использованием как классических видеокодеков (AVC/H.264, HEVC/H.265, AV1) по протоколу RTP, так и разработанного в рамках данного исследования нейросетевого видеокодека НВК, функционирующего по протоколу FPV-CTVP (рис. 6.26). Для реализации процессов кодирования и декодирования стандартными видеокодеками использовалась программная среда *ffmpeg* версии 7.1, обеспечивающая унификацию параметров эксперимента.

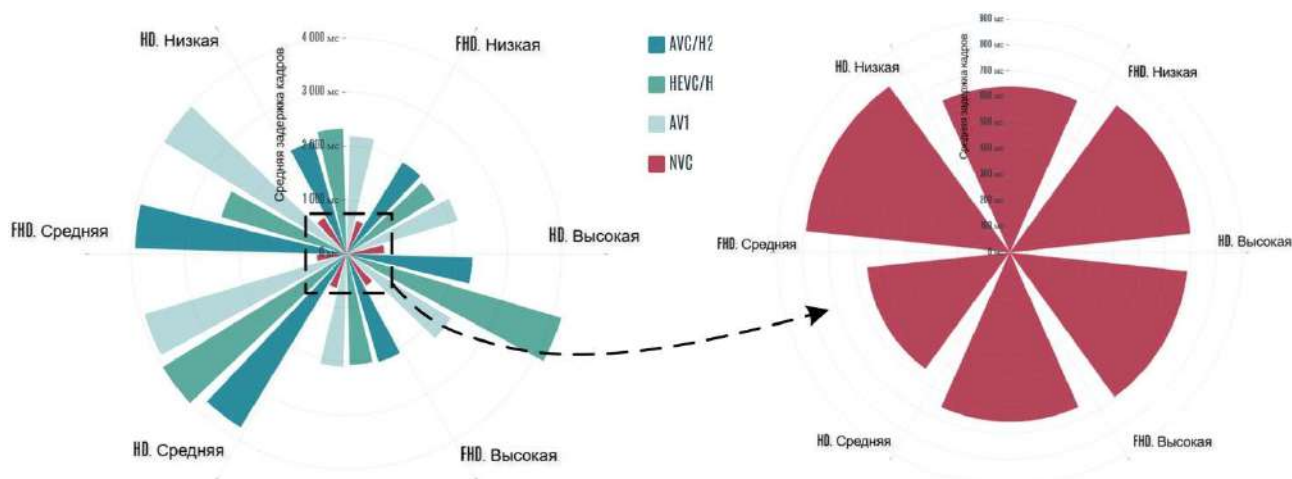


Рисунок 6.26 – Задержка кадров HD и FHD видеопотока различной динамики при передаче через гибридный КИО космического сегмента ГОНСС

Результаты испытаний показали, что применение стандартных видеокодеков сопровождается высокими значениями задержки T_3^B при передаче видеопотока через гибридный КИО, включающий в себя сегмент геостационарного канала связи. Так, при использовании кодека AVC/H264

задержка изменялась от 2342 мс (низкая динамика/HD) до 3933 мс (средняя динамика/FHD). Для кодека HEVC/H265 данный показатель варьировался от 1930 мс (низкая динамика/FHD) до 4163 мс (низкая динамика/HD). В свою очередь, использование кодека AV1 показало значения задержки от 2185 мс (высокая динамика/HD) до 3981 мс (средняя динамика/FHD). Полученные результаты согласуются с величиной задержки стандарта спутникового цифрового видеовещания DVB-S2, где задержка передачи цифрового видеопотока составляет от 2 до 5 секунд.

Применение нейросетевого видеокодека НВК совместно с протоколом управления FPV-CTVP позволило существенно снизить значение ПЭФ T_3^B . Установлено, что время задержки варьируется в пределах от 555 мс (средняя динамика/HD) до 793 мс (средняя динамика/FHD), что демонстрирует существенное преимущество разработанной архитектуры видеосжатия и передачи данных в условиях спутниковой связи (рис. 6.27). Средние значения задержки видеопотока и требуемой пропускной способности канала для различных разрешений приведены на рисунке 6.27 и в таблице 6.4.

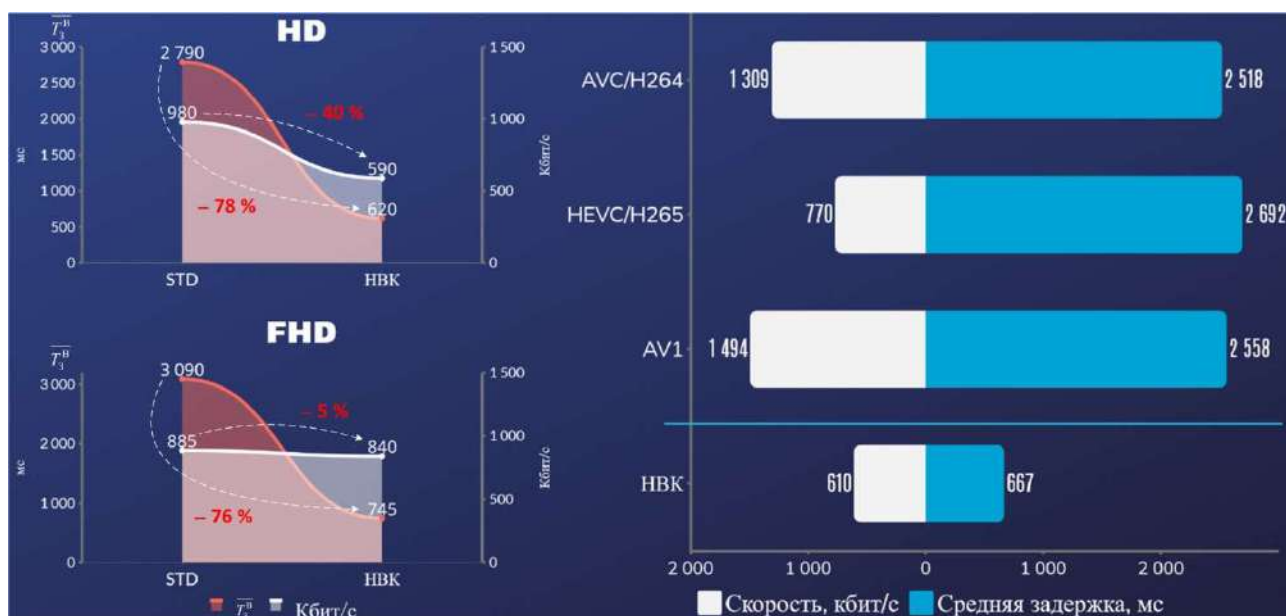


Рисунок 6.27 – Средняя задержка кадров видеопотока и необходимая пропускная способность канала связи при передаче через ССС «Ямал-601»

Таблица 6.7 – Результаты стендовых испытаний передачи видео («Ямал-601»)

Кодек	Средняя задержка видеокадров, мс		Скорость, <i>kbps</i>		Коэффициент сжатия	
	HD	FHD	HD	FHD	HD	FHD
Высокая						
AVC/H264	2180,26	2088	549	1015	22,38	12,11
HEVC/H265	2331,21	2058,28	969	594	12,68	20,69
AV1	2185,38	2090,72	983	1017	12,50	12,08
HBK	641,02	653,38	657	582	18,70	21,11
Средняя						
AVC/H264	3772,33	3933,91	1689	1196	7,28	10,27
HEVC/H265	4011,19	2431,35	671	1035	18,31	11,87
AV1	3921,45	3981,08	1750	1789	7,02	6,87
HBK	555,24	793,33	474	1521	25,92	8,08
Низкая						
AVC/H264	2342,07	1994,95	1689	443	7,28	27,74
HEVC/H265	4163,31	1930,58	671	1033	18,31	11,90
AV1	2272,81	2158	1750	1079	7,02	11,39
HBK	689,46	702,48	700	839	17,55	14,65

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что использование нейросетевого видеокодека HBK при передаче видеопотока взаимодействия оператора и беспилотной системы через геостационарную систему спутниковой связи «Ямал-601» способствует снижению задержки в среднем на 80% для HD-видеопотоков и на 76% для FHD-видеопотоков по сравнению со стандартными видеокодеками. Дополнительно установлено, что применение предлагаемого метода обеспечивает уменьшение требуемой полосы пропускания канала в среднем на 65% для HD-разрешения и на 5% для Full HD. Полученные данные подтверждают целесообразность применения нейросетевых видеокодеков в системах реального времени при передаче видео взаимодействия оператора и беспилотной системы потоков через спутниковые каналы связи. Протокол испытаний представлен в Приложении Б.

6.3.2.2 Геостационарная спутниковая система связи «Благовест»

Проведены испытания по проверке видеокожека НВК в работе по реальному низкоскоростному спутниковому каналу связи через ССС Р-444-ПТН. Схема испытательного стенда представлена на рисунке 6.28.



Рисунок 6.28– Схема испытательного стенда в режиме работы
через станции спутниковой связи

Внешний вид применяемых ССС и их настройка представлены на рисунке 6.29.



Рисунок 6.29 – Внешний вид станций спутниковой связи Р-444-ПТН

На станциях спутниковой связи был установлен режим прямой ретрансляции «ПР-МК», скорость в образованном канале спутниковой связи составляла 64 Кбит/с, работа осуществлялась через КА «Благовест» по стыку

«Ethernet». Захват видеотрафика, поступающего на ПК-декодировщик от ПК-кодировщика, осуществлялся с помощью ПО *Wireshark*. Фактическая пропускная способность определялась с помощью встроенной команды ОС Linux (capinfos).

Качество видеоизображения, а также значение битрейта, зафиксированного в ходе трансляции видеопотока, представлены на рисунке 6.30.

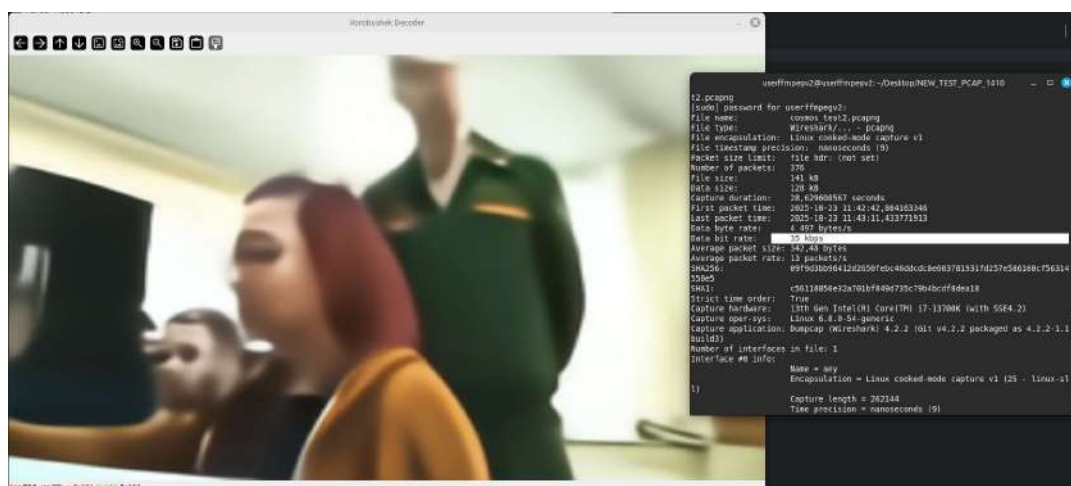


Рисунок 6.30 – Визуальное качество видеоизображения (КА «Благовест»)

Пропускная способность, зафиксированная во время испытаний в режиме передачи видеопотока по низкоскоростному каналу спутниковой связи, составила 35 Кбит/с. Экспертами ФГБУ «16 ЦНИИ» МО РФ был сделан вывод о том, что визуально лица и мелкие детали объектов не различимы, но сохраняются цвета, силуэты объектов и целостная структура изображения. Кроме этого была зафиксирована значительная экономия полосы пропускания без нарушения качества видеоизображения во всех проверяемых режимах функционирования системы. Протокол испытаний представлен в Приложении Б.

6.3.3 Наземный сегмент ГОНСС

Для оценки значений ПЭФ T_3^B в наземном сегменте ГОНСС была выполнена серия натурных экспериментов по передаче потоков FPV-видео через мобильную сеть стандарта LTE/LTE adv. Эксперимент проводился как с

использованием классических видеокодеков (AVC/H.264, HEVC/H.265, AV1), работающих по протоколу RTP, так и с применением разработанного нейросетевого видеокодека НВК, функционирующего по протоколу FPV-CTVP. Структурная схема экспериментальной установки представлена на рисунке 6.31. Передача видеопотока, закодированного стандартными видеокодеками, осуществлялась с использованием мультимедийного фреймворка *GStreamer*. Частота кадров видеопотока составляла 30 кадр/с при искусственно установленном ограничении полосы пропускания до 100 Кбит/с, что соответствовало условиям реальной эксплуатации при ограниченных ресурсах канала связи.

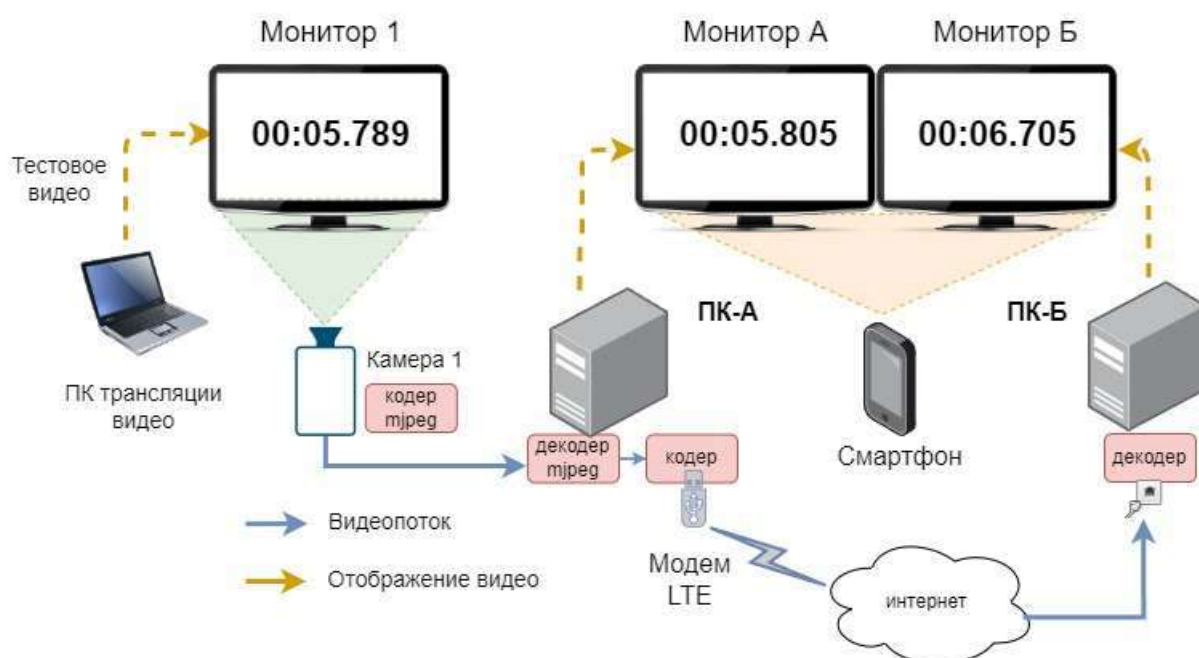


Рисунок 6.31 – Экспериментальная установка для мобильной сети LTE/A

В результате экспериментов получены количественные зависимости T_3^B различного разрешения (HD и FHD), а также различной динамики сцен (высокой, средней и низкой). Обобщённые данные представлены в таблице 6.8.

Анализ показал, что стандартные методы передачи видео взаимодействия оператора и беспилотной системы потока характеризуются умеренным уровнем задержки при стабильной полосе пропускания. Так, при использовании кодека AVC/H.264 наблюдался диапазон задержек от 53,49 мс (низкая динамика) до 64,47 мс (высокая динамика). Для кодека HEVC/H.265 данный параметр

изменялся в интервале от 49,56 мс (высокая динамика) до 60,38 мс (средняя динамика). При передаче сигнала с применением кодека AV1 значения задержки варьировались от 42,98 мс (низкая динамика) до 1640,41 мс (высокая динамика). Последний случай обусловлен тем, что при высокой динамике сцен и ограничении полосы пропускания кодек AV1 формирует уменьшенное количество кадров, что приводит к накоплению данных с последующим ростом T_3^B (рис. 6.32а).

Таблица 6.8 – Результаты эксперимента для FPV-видео различной динамики

Кодек	T_3^B , мс		Скорость, Кбит/с	
	HD	FHD	HD	FHD
Высокая				
AVC/H264	64,47	53,53	587	937
HEVC/H265	55,15	52,74	370	454
AV1	1 640,41	1 289,95	247	566
НВК	52,41	63,68	127	127
Средняя				
AVC/H264	55,55	55,00	192	276
HEVC/H265	60,38	50,94	141	320
AV1	50,81	927,47	140	322
НВК	44,00	60,54	100	123
Низкая				
AVC/H264	53,49	53,00	196	322
HEVC/H265	49,56	53,18	142	271
AV1	42,98	1 571,17	177	333
НВК	50,56	59,86	114	178

Применение нейросетевого видеокодека НВК, использующего протокол FPV-CTVP, позволило добиться значительного улучшения характеристик по сравнению с традиционными методами сжатия. В ходе измерений установлено, что задержка кадров при использовании НВК варьируется в относительно узком диапазоне – от 44,00 мс (средняя динамика) до 52,41 мс (высокая динамика). Зависимости задержки видеопотока HD-качества от доступной полосы пропускания канала связи представлены на рисунке 6.32 и демонстрируют устойчивость временных характеристик даже при ограничениях по пропускной способности КИО.

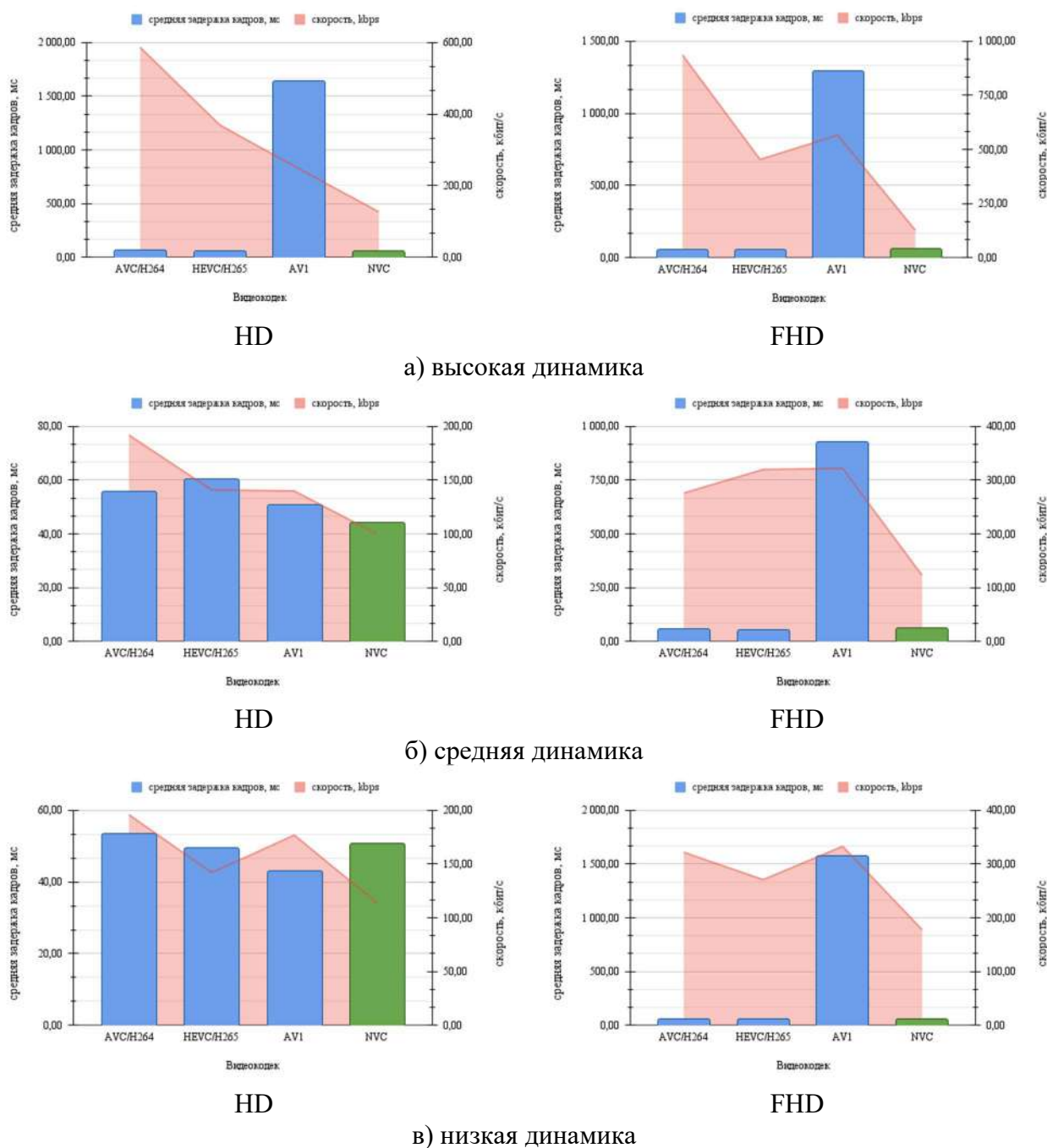


Рисунок 6.32 – Зависимость задержки кадров FPV-видеопотока HD качества от пропускной способности LTE/LTE adv канала связи

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сделать вывод, что при передаче FPV-видео HD качества среднее уменьшение задержки в среднем составляет 22,65 % по сравнению со стандартными видеокодеками, при этом наблюдается экономия требуемой пропускной способности КИО на 53%. Для видеопотока FHD качества среднее снижение задержки достигает 26,96 % при сокращении пропускной способности на 65% (рис. 6.33).

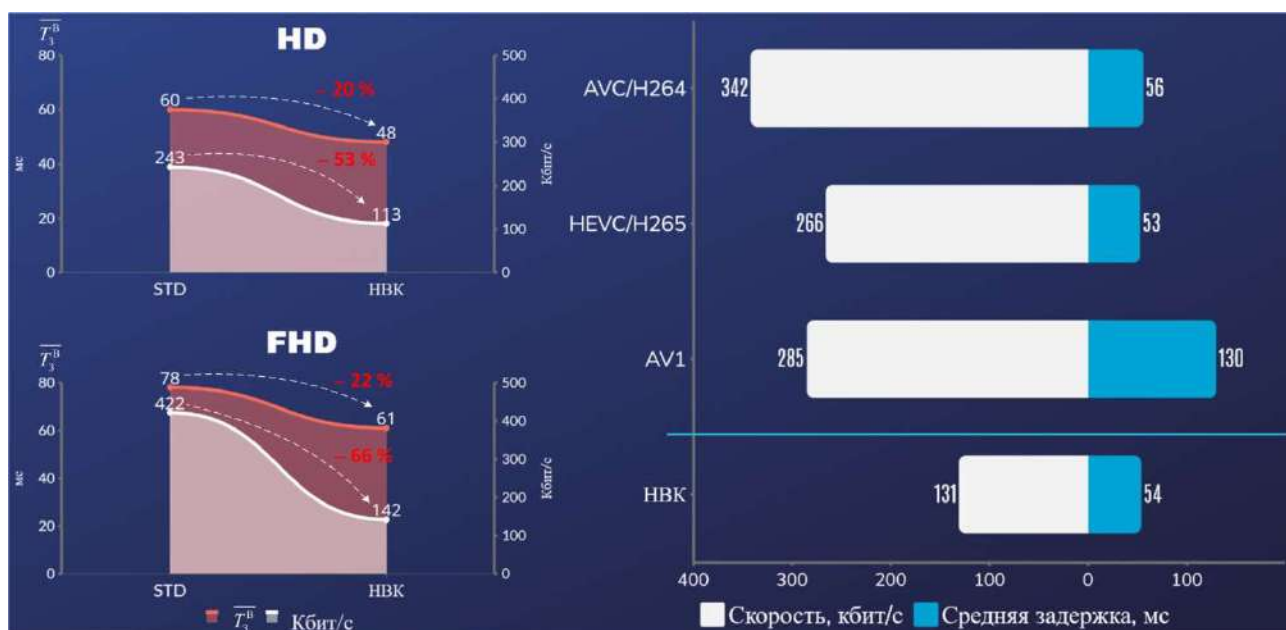


Рисунок 6.33 – Средняя задержка кадров видеопотока и необходимая пропускная способность канала связи при передаче через сеть LTE/LTE adv

Указанные результаты подтверждают целесообразность применения нейросетевых видеокодеков в составе систем FPV через наземный сегмент фрагмента ГОНСС и демонстрируют их потенциал для повышения производительности и устойчивости каналов взаимодействия оператора с беспилотной системой в условиях ограниченных сетевых ресурсов.

6.3.4 КВ-радиолиния

Проведены испытания работы НВК, целью которых являлось экспериментальная оценка возможности применения разработанного видеокодека для передачи видеоданных по каналам КВ и УКВ радиосвязи, протяженностью не менее 600 км в условиях ограниченной пропускной способности и нестабильных параметров канала. В рамках испытаний предусматривался анализ функционирования НВК при возникновении потери связи в канале и искажений передаваемых данных, оценка компромисса «битрейт – качество», а также определение практической применимости решения для систем видеомониторинга, видеосвязи и управления, эксплуатируемых в том числе в сложных радиотехнических условиях.

Испытания проводились в г.Санкт-Петербург, п. Песочный, в/г №5 и в г.Мытищи, ФГБУ «16 ЦНИИИ» Минобороны России по КВ радиоканалу «Санкт-Петербург – Мытищи», развернутому с помощью установки радиостанции «Радиан-КВ». Оценивалась работоспособность кодека в условиях существенно ограниченной пропускной способности (канальная скорость не более 16 Кбит/с), нестабильных параметров канала, переменной задержки и вероятностных потерь данных, обусловленных особенностями ионосферного распространения радиоволн. Основной задачей являлась экспериментальная проверка применимости разработанного решения для передачи видеоданных в условиях реального КВ-радиоканала. Внешний вид стенда представлен на рисунках 6.34 и 6.35. Схема стенда представлена на рисунке 6.36.



Рисунок 6.34 – Развернутые штатные антенно-фидерные устройства радиостанции «Радиан-КВ»



а) в г. Санкт-Петербург, п. Песочный, в/г №5

б) г. Мытищи, ФГБУ «16 ЦНИИИ»
Минобороны России

Рисунок 6.35 – Внешний вид испытательного стенда

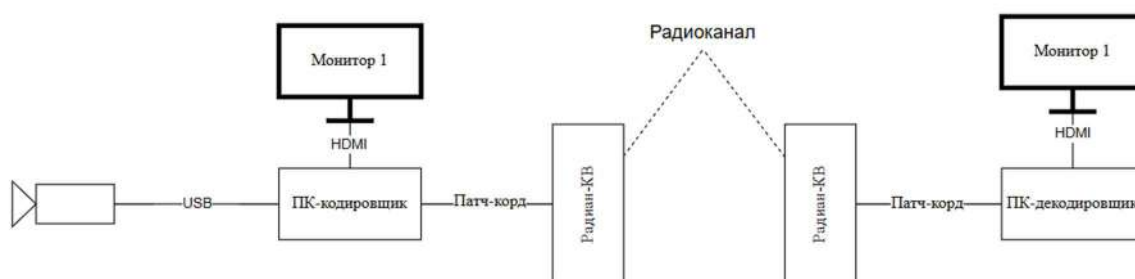
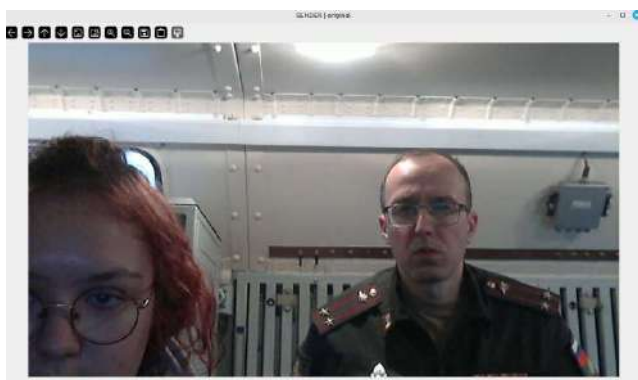


Рисунок 6.36 - Схема испытательного стенда

В рамках испытаний проводилось: оценка работоспособности НВК в условиях передачи информации по реальному КВ-радиоканалу, фиксация параметров фактической скорости передачи данных, визуальная оценка качества восстановленного видеоизображения, анализ устойчивости передачи при длительной работе канала связи.

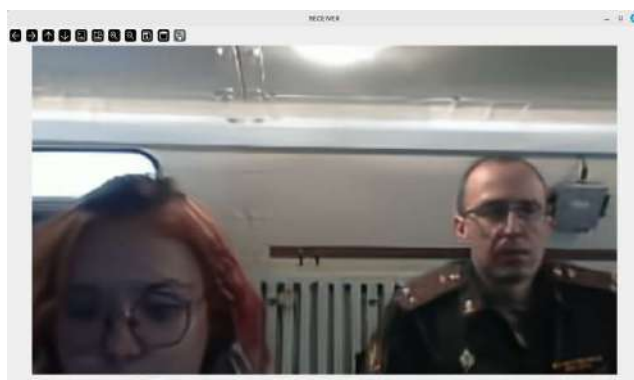
Оценка качества видеоизображения, полученного с USB-камеры и пропускной способности в зависимости от выбранного режима «Радиан-КВ». Во всех случаях используется режим АУС (автоматическое установление связи), UDP без подтверждения, 5 кадров в секунду.

Начальные условия: 7500 (3750) скачков в секунду, максимальная канальная скорость 8 Кбит/с, разрешение получаемого с USB-камеры видеопотока – HD (1280×720). Полученные результаты представлены на рисунке 6.37.



а) пример кадра исходного видео

Пропускная способность 5,9 Кбит/с



б) режиме АУС, 7500 скачков в секунду

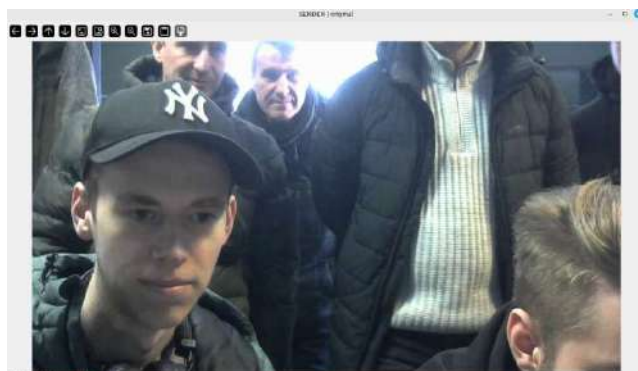


а) пример кадра исходного видео с БПЛА

Пропускная способность 6,2 Кбит/с

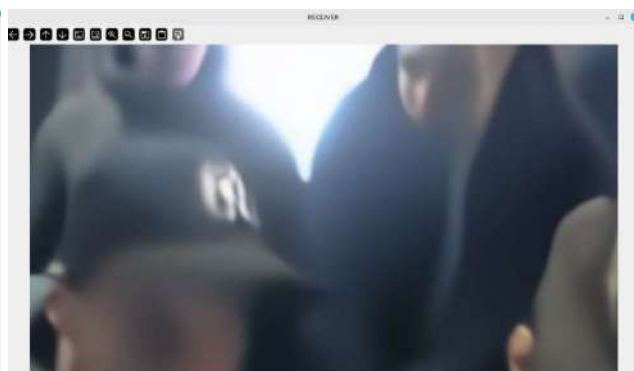


б) режиме АУС, 7500 скачков в секунду



а) пример кадра исходного видео

Пропускная способность 2,8 Кбит/с



б) режиме АУС, 3750 скачков в секунду

Рисунок 6.37 – Визуальное качество видеоизображения, полученного с использованием НВК (6,2 Кбит/с)

Значения пропускной способности и данные о качестве видеоизображения представлены в таблице 6.9.

Таблица 6.9 – Значения битрейта и данные о качестве видеоизображения в различных режимах испытаний.

№ п/п	Заданные параметры режима	Значение битрейта (Кбит/с)	Данные о получаемом видеопотоке
1.	Режим АСУ, 7500 скачков в секунду, максимальная канальная скорость 8 Кбит/с. Видеопоток с USB-камеры. Направление Мытищи – Санкт-Петербург	5.9	Передача видеопотока осуществлялась стабильно, с редкими замираниями, без существенных искажений. Качество изображения удовлетворительное.
2.	Режим АСУ, 7500 скачков в секунду, максимальная канальная скорость 8 Кбит/с. Видеопоток с камеры FPV-дрона. Направление Санкт-Петербург – Мытищи	6.2	Передача видеопотока осуществлялась стабильно, без замираний. На изображении отсутствуют четкие текстуры объектов, однако сохраняются цвета и силуэты объектов, целостная структура изображения.
3.	Режим АСУ, 3750 скачков в секунду, максимальная канальная скорость 4 Кбит/с. Видеопоток с USB-камеры. Направление Санкт-Петербург – Мытищи	2.8	Передача видеопотока осуществлялась стабильно, без замираний. На изображении отсутствуют четкие текстуры объектов, однако сохраняются цвета и силуэты объектов, целостная структура изображения.

Специалистами «16 ЦНИИИ» Министерства обороны Российской Федерации установлено, что разработанный видеокодек обладает высоким коэффициентом сжатия видеопотока, отличается эффективным функционированием по низкоскоростным каналам связи, в том числе радиоканалам КВ и УКВ диапазона. Испытания показали, что кодек обеспечивает эффективное использование канального ресурса с возможностью адаптации под характеристики канала.

Кроме того было отмечено, что на текущем этапе развития технологии, применение НВК в интересах Министерства обороны Российской Федерации возможно в системах видеотрансляции и видеонаблюдения (преимущественно по каналам связи низкого качества), для задач не критичных к качеству изображения, а также при съёмке и трансляции преимущественно статичных

или слабо динамичных сцен. Для применения в динамичных сценариях (быстрое движение объектов, частая смена планов, сложные сцены) необходима доработка, направленная на адаптацию к изменению параметров канала (джиттер, потеря пакетов) и повышение качества изображения при низкой пропускной способности. В части ВКС требуется интеграция аудиокодека для передачи звукового потока и его синхронизация с видеопотоком.

6.4 Выводы по главе 6

1. Разработана и экспериментально апробирована комплексная методика оценки эффективности функционирования FPV систем, ориентированная на оценку перцептивного качества восстановленного видеопотока и задержек в КИО в условиях реальных спутниковых каналов связи ГОНСС. Эксперименты проведены с использованием стандартных видеокодеков (AVC/H264, HEVC/H265, AV1) с передачей по протоколу RTP, а также разработанного нейросетевого видеокодека с передачей по специализированному протоколу FPV-CTVP. В качестве спутниковых сетей связи были использованы КА «Ямал-601» (спутниковый терминал РС-30М) и «Благовест» (спутниковый терминал Р-444-ПТН).

2. В рамках комплексной методики разработан оригинальный подход количественного обоснования требований к объективным показателям перцептивного качества восстановленного видеопотока (DISTS, SSIM). В отличие от традиционных экспертных методов, данный подход базируется на анализе рисков и статистической обработке экспериментальных данных. Он позволяет установить прямую связь между численными значениями метрик перцептивного качества и вероятностью успешного достижения цели функционирования беспилотной системы, а также включает механизм проверки и коррекции требований на избыточность. Это обеспечивает формирование функционально обоснованных критериев для проектирования КИО. Так снижение перцептивного качества восстановленного видеопотока приводит к

уменьшению вероятности достижения цели функционирования беспилотной системы, при этом наблюдаемая зависимость носит квази-линейный характер.

3. Разработанный подход включает в себя оценку объективных метрик перцептивного качества восстановленного видеопотока, а также автоматизированный анализ задержек в КИО с использованием нейросетевых методов распознавания символов.

4. Разработанные нейросетевые кодеки видеопотока позволяют уменьшить задержку передачи FPV-видеопотока HD качества 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 сети связи (сотовая сеть связи LTE/LTE adv общего пользования), такая задержка уменьшается в среднем на 20% при экономии пропускной способности на 53%.

5. В результате проведенных испытаний подтверждена возможность передачи FPV-видеопотока по низкоскоростному спутниковому каналу связи, где минимальная необходимая полоса пропускания составила 35 Кбит/с. При этом визуально лица и мелкие детали объектов не различимы, однако сохраняются цвета и силуэты объектов, целостная структура изображения.

6. Разработанный нейросетевой видеокодек обеспечивает передачу видеоинформации по каналам передачи данных низкого качества (в режиме потерь пакетов 10% и выше), а также по спутниковому каналу связи с канальной скоростью 64 Кбит/с (КА «Благовест»). В проверенных режимах функционирования в условиях потери пакетов до 10% потери качества видеоизображения не зафиксировано.

7. 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.

8. Разработанный видеокодек отличается эффективным функционированием по низкоскоростным каналам связи, в том числе радиоканалам КВ и УКВ диапазона, а также обеспечивает эффективное использование канального ресурса с возможностью адаптации под характеристики канала: при низком битрейте сохраняется информативность изображения, а при расширении полосы пропускания достигается высокое качество изображения.

9. Анализ результатов измерения задержки передачи данных *payload* различного размера через геостационарную систему спутниковой связи «Ямал-601» показал, что существует потенциал снижения задержки в гибридном спутниковом КИО для передачи видеопотока взаимодействия оператора и беспилотной системы на 55%. При этом размер кадра видео взаимодействия оператора и беспилотной системы должен составлять не более 550 байт. В этих условиях достигается передача сжатого нейросетевыми видеокодеками FPV-видеопотока с наименьшей задержкой в 350 мс. Далее наиболее целесообразно ограничить размер передаваемых данных за одну передачу до 3 кБ, где задержка достигает своего пикового значения. Далее из-за флуктуаций в канале спутниковой связи, обусловленных в том числе погодными условиями, передача данных размера более 3 кБ за одну передачу не целесообразно.

10. Разработанные рекомендации по выбору кодеков НВК и пороговым значениям ($DISTS < 0,23$, $T_3^B < 150$ мс) закладывают основу для стандартизации нейросетевых систем при управлении в режиме BVLOS.

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-CTVP 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 команд взаимодействия оператора с беспилотной системой, 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 взаимодействия оператора с беспилотной системой, снизив в

свою очередь задержки передачи FPV-видеопотока до уровней, соизмеримых с задержками в наземном сегменте фрагмента гибридной орбитально-наземной сети связи.

2. Разработаны 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. 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 гибридной орбитально-наземной сети связи. 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») фрагмента ГОНСС среднее уменьшение задержки передачи FPV-видеопотока HD качества составило 78% при экономии пропускной способности на 40% по сравнению со стандартными видеокодеками; в наземном сегменте фрагмента ГОНСС задержка уменьшена в среднем на 20% при экономии пропускной способности в 53%. Экспериментально подтверждена возможность передачи FPV-видеопотока, сжатого 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. Полученные результаты закладывают основу для унификации и последующей стандартизации решений FPV взаимодействия для BVLOS-сценариев.

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 гибридной орбитально-наземной сети связи. 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 – 9,03%, AEC – 4,54% против прироста предложенного метода до 9,71% относительно Brotli и до 14,21% относительно AEC при соответствующей настройке избыточности помехоустойчивого кода Рида-Соломона). Показано, что разработанный метод обеспечивает сжатие команд взаимодействия оператора до 18,75%, но за счет ошибок восстановления

(потерь) в 31,23%; компромиссный режим обеспечивает сжатие до 12,50% при потерях в 20,61%. Эти результаты количественно обосновывают область применимости кодека для сценариев крайне низкой пропускной способности, где сжатия без потерь недостаточно.

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 широко распространенный 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 зафиксирована минимальная задержка 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. Не менее важным представляется развитие методов семантического сжатия, ориентированного на задачи, при котором приоритет получают не все элементы изображения, а только визуальные признаки, критически значимые для распознавания обстановки, маневрирования и достижения цели функционирования беспилотной системы. В этой логике 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, где критично не максимальное визуальное качество, а минимально достаточная информативность при предсказуемой задержке.

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.

Полученные в диссертационной работе результаты позволили открыть новое направление исследований в области беспилотных систем, которое в настоящее время развивается в СПбГУТ под руководством автора при решении задач передачи информационных потоков при взаимодействии оператора с беспилотными системами через спутниковые каналы связи и каналы связи с низкой пропускной способностью (KB, УКВ, LoRa).

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Русскоязычные сокращения

БАС	беспилотная авиационная система
БНТС	беспилотное наземное транспортное средство
БПЛА	беспилотный летательный аппарат
БС	беспилотная система
ВОО	высокая околоземная орбита
ГОНСС	гибридная орбитально-наземная сеть связи
ГСО	геостационарная орбита
ИКАО	международная организация гражданской авиации
КА	космический аппарат
КВО	команды взаимодействия оператора
ЛПП	латентное пространство признаков
МСЭ	международный союз электросвязи
МСЭ-Т	сектор стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи
НВК	нейросетевой видеокодек
НККВО	нейросетевой кодек команд взаимодействия оператора
НОО	низкая околоземная орбита
НСВБП	нейросная сеть восстановления бинарной последовательности
ОГ	орбитальная группировка
ПК	персональный компьютер
ПНСВБП-М	Простая полносвязная нейронная сеть восстановления бинарной последовательности (маскированные значения)

ПЭ	показатель эффективности
ПЭФ	показатель эффективности функционирования
СОО	средняя околоземная орбита
ССС	спутниковая сеть связи
ТО	терминал оператора
ЦССС	центральная станция спутниковой связи

Англоязычные сокращения

3G	third generation
3GPP	third generation partnership project
4G	forth generation
5G	fifth generation
6G	sixth generation
BVLOS	beyond visual line of sight
CRSF	crossfire Serial Protocol
DCVC-RT	deep contextual video compression in real time
DISTS	deep image structure and texture similarity
DMCI	deep multi-context intra
DMVFN	dynamic multi-scale voxel flow network for video prediction
EVLOS	extended visual line of sight
FPV	first person view
Full HD	full high definition
GEO	geostationary Earth orbit
HAPS	high-altitude platform station
HEO	high Earth orbit
HEVC	high efficiency video coding
IMT	international mobile telecommunications

ISO	international organization for standardization
LEO	low Earth orbit
LPIPS	learned perceptual image patch similarity
LSTM	long short-term memory
LTE	long-term evolution
MAGVIT	masked generative video transformer
MavLink	micro air vehicle link
MEO	medium Earth orbit
MPEG	moving picture experts group
MSE	mean squared error
NTN	non-terrestrial network
NVC	neural video codec
NVP	novel video prediction for large-scale scene using optical flow
PRA	probabilistic risk assessment
PSNR	peak sound to noise ratio
SAGIN	space air ground integrated network
SAGSIN	space air ground sea integrated network
SimVP	simpler yet better video prediction
SSIM	structural similarity
STVA	spatio-temporal video autoencoder with differentiable memory
VAE	variational Autoencoder
VLOS	visual line of sight
VP8	video predictor 8
VP9	video predictor 9
VPTR	video prediction transformer
VPvI	optimizing video prediction via video frame interpolation
VVC	versatile video coding

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Unmanned aerial vehicle (UAV) market scope [Электронный ресурс]. – GlobeNewswire – URL: [https://www.globenewswire.com/en/search/organization/Precedence Research](https://www.globenewswire.com/en/search/organization/Precedence+Research) (Дата обращения: 21.02.2025).
2. Любимов, В. А. Интегрированная логистическая поддержка беспилотных авиационных систем / В. А. Любимов, С. Н. Лазарев, В. С. Шумилин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 87-91.
3. Jones, S. G. Combined arms warfare and unmanned aircraft systems: A new era of strategic competition / S.G. Jones, J. Harrington, C.K. Reid, M. Strohmeyer. – Washington, D.C: Center for Strategic and International Studies. – 2023. – 67 с.
4. Naing, K. M. Design of autonomous sustainable unmanned aerial vehicle-A novel approach to its dynamic wireless power transfer : дис. ... PhD / Kyaw Minc Naing. – University of Wolverhampton, 2022. – 192 с.
5. Counter-unmanned aerial vehicle systems / D. Fortune, H. Nitsch, G. Markarian [и др.] // Security Technologies and Social Implications. – 2022. – С. 122-148.
6. Управление развитием региональных рынков беспилотных авиационных систем: проблемы и пути решения / С. Е. Жура, В. В. Маркин, Н. М. Фоменко, И. А. Аленкова // Вестник евразийской науки. – 2024. – Т. 16. – № S4.
7. Кобка, Е. О. Направления развития подходов в системах поддержки принятия решений при управлении беспилотными авиационными системами / Е. О. Кобка, О. С. Чемерис // Экономика строительства. – 2024. – № 6. – С. 280-282.
8. Marghany, M. Recent remote sensing sensor applications: Satellites and unmanned aerial vehicles (UAVs) / M. Marghany. – London: IntechOpen, 2022. – 234 с.
9. Tatum, C. Learning construction engineering: Why, what, and how? / C. Tatum // Journal of Construction Engineering and Management. – 2018. – Т. 144. – № 3.
10. Alkan, M. N. High-precision UAV photogrammetry with RTK GNSS: Eliminating ground control points / M. N. Alkan // Hittite Journal of Science and Engineering. – 2024. – Т. 11. – № 4. – С. 139-147.
11. UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling: Current status and future perspectives / F. Remondino, L. Barazzetti, F. C. Nex [и др.] // Proceedings of the international conference on unmanned aerial vehicle in geomatics (UAV-g): 14-16 September 2011, Zurich, Switzerland. – International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), 2011. – С. 25-31.

12. ИИ научат выявлять аварийные здания с помощью дронов [Электронный ресурс]. – ТАСС. Наука. – 2025. – URL: <https://nauka.tass.ru/nauka/23118433> (Дата обращения: 24.04.2025).
13. Mission-based design of UAVs / J. C. Chaudemar, O. Aiello, P. de Saqui-Sannes, O. Poitou // Systems Engineering. – 2024. – Т. 27. – № 5. – С. 850-868.
14. Беспилотники находят применение в различных отраслях на территории округа [Электронный ресурс]. – Российская газета. – 2024. – URL: <https://rg.ru/2024/05/16/reg-dfo/im-s-vysoty-vidnee.html> (Дата обращения: 21.04.2025).
15. Практика применения беспилотников в ОАО «РЖД»: [Электронный ресурс]. – РЖД-Партнер.ру. – 2023. – URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/praktika-primeneniya-bespilotnikov-v-oao-rzhd/> (Дата обращения: 21.04.2025).
16. ФБУ «РосСтройКонтроль» вводит автоматизированную систему контроля «Пуск» с 1 июля 2024 года [Электронный ресурс]. – Правда о СРО. – 2024. – URL: <https://pravdaosro.ru/news/rosstroykontrol-vvodit-sistemy-pysk/> (Дата обращения: 21.02.2025).
17. Разработан новый ГОСТ Р для применения беспилотников в строительстве [Электронный ресурс]. – Минстрой России. – 2025. – URL: <https://www.minstroyrf.ru/press/razrabotan-novyy-gost-r-dlya-primeneniya-bespilotnikov-v-stroitelstve/> (Дата обращения: 21.02.2025).
18. A compilation of UAV applications for precision agriculture / P. Radoglou-Grammatikis, P. Sarigiannidis, T. Lagkas, I. Moscholios // Computer Networks. – 2020. – Т. 172.
19. Smart farming is key to developing sustainable agriculture / A. Walter, R. Finger, R. Huber, N. Buchmann // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2017. – Т. 114. – № 24. – С. 6148-6150.
20. Internet of Things in arable farming: Implementation, applications, challenges and potential / A. Villa-Henriksen, G. T. Edwards, L. A. Pesonen [и др.] // Biosystems engineering. – 2020. – Т. 191. – С. 60-84.
21. Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk / M. Ayaz, M. Ammad-Uddin, Z. Sharif [и др.] // IEEE access. – 2019. – Т. 7. – С. 129551-129583.
22. Mulla, D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps / D. J. Mulla // Biosystems engineering. – 2013. – Т. 114. – № 4. – С. 358-371.
23. AGRAS T30 A new flagship for digital agriculture [Электронный ресурс]. – DJI. – 2025. – URL: <https://www.dji.com/nl/t30> (Дата обращения: 21.02.2025).
24. XAG P100 Agricultural drone [Электронный ресурс]. – XAG. – 2025. – URL: <https://www.xa.com/en/p100> (Дата обращения: 21.02.2025).

25. Tsouros, D. C. A review on UAV-based applications for precision agriculture / D. C. Tsouros, S. Bibi, P. G. A. Sarigiannidis // *Information*. – 2019. – Т. 10. – № 11. – С. 349.
26. Maes, W. H. Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture / W. H. Maes, K. Steppe // *Trends in plant science*. – 2019. – Т. 24. – № 2. – С. 152-164.
27. AI-based UAV swarms for monitoring and disease identification of Brassica plants using machine learning: A Review / Z. A. Ali, D. Deng, M. K. Shaikh [и др.] // *Computer Systems Science & Engineering*. – 2024. – Т. 48. – № 1.
28. Савин, И. Ю. Возможности использования беспилотных летательных аппаратов для оперативного мониторинга продуктивности почв / И. Ю. Савин, Ю. И. Вернюк, И. Фараслис // *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. – 2015. – № 80. – С. 95-105.
29. Ge, Y. Remote sensing of soil properties in precision agriculture: A review / Y. Ge, J. A. Thomasson, R. Sui // *Frontiers of Earth Science*. – 2011. – Т. 5. – № 3. – С. 229-238.
30. Drones reducing costs while boosting efficiency [Электронный ресурс]. – *ChinaDaily*. – 2025. – URL: <https://www.chinadaily.com.cn/a/202502/06/WS67a41da2a310a2ab06eaa70b.html>
31. Распространение жука-полиграфа в Пермском крае изучат с помощью беспилотников [Электронный ресурс]. – *AVIA.RU Network*. – 2024. – URL: <https://www.aviaru.net/m/news/uav/273587> (Дата обращения: 21.02.2025).
32. Ли Лю. Применение дронов в сельском хозяйстве Китая / Ли Лю, А. А. Ким // *Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса*. – 2019. – Т. 11. – № 4. – С. 54-61.
33. Министерство сельского хозяйства РФ. Создание центра по применению БПЛА в сельском хозяйстве [Электронный ресурс]. – *РБК Кубань*. – 2024. – URL: <https://kuban.rbc.ru/krasnodar/freenews/6674109a9a79471b6ec46e4a> (Дата обращения: 21.02.2025).
34. A review of unmanned aerial vehicle low-altitude remote sensing (UAV-LARS) use in agricultural monitoring in China / H. Zhang, L. Wang, T. Tian, J. Yun // *Remote Sensing*. – 2021. – Т. 13. – № 6. – С. 1221.
35. Лидеры по использованию сельхоздронов в России [Электронный ресурс]. – *Привет Ростов*. – 2024. – URL: <https://privet-rostov.ru/gorod/101844-sotni-polej-v-rostovskoj-oblasti-vzjaty-pod-kontrol-s-vozduha.html> (Дата обращения: 21.02.2025).
36. Сев риса с беспилотников в Краснодарском крае увеличил урожай на 15% [Электронный ресурс]. – *Ведомости Юг*. – 2024. – URL: <https://south.vedomosti.ru/south/articles/2024/06/20/1045096-sev-risa-s-bespilotnikov-v-krasnodarskom-krae-velichil-urozhai-na-15> (Дата обращения: 21.02.2025).

37. Применение дронов для борьбы с саранчой в Оренбургской области и Калмыкии [Электронный ресурс]. – АЕХ. – 2024. – URL: <https://www.aex.ru/m/news/2024/7/1/273074/> (Дата обращения: 21.02.2025).
38. Разработка аграрного БПЛА с мультиспектральной камерой в Пермском политехническом университете [Электронный ресурс]. – Пермский политех. – 2024. – URL: <https://pstu.ru/news/2024/06/17/15578/> (Дата обращения: 21.02.2025).
39. Беспилотник заменит посевной комплекс на предприятии в Новосибирской области [Электронный ресурс]. – Тогучинская газета. – 2024. – URL: <https://toggazeta.ru/bespilotnik-mozhet-zamenit-posevnoj-kompleks/> (Дата обращения: 21.02.2025).
40. Подготовка кадров для беспилотных авиационных систем в сельском хозяйстве [Электронный ресурс]. – ТАСС. – 2024. – URL: <https://tass.ru/obschestvo/21476519> (Дата обращения: 21.02.2025).
41. Открытие центров по обучению детей управлению дронами в Томске [Электронный ресурс]. – NGS70. – 2024. – URL: <https://ngs70.ru/text/education/2024/07/04/73786940/> (Дата обращения: 21.02.2025).
42. Эксперт НТИ «Аэронет» о потребности сельского хозяйства в БПЛА [Электронный ресурс]. – РИА Новости. – 2024. – URL: <https://ria.ru/20240724/selkhozdrony-1961484768.html> (Дата обращения: 21.02.2025).
43. Производство беспилотных тракторов «Кировец Агробот» в Санкт-Петербурге [Электронный ресурс]. – РБК Петербург. – 2025. – URL: https://www.rbc.ru/spb_sz/12/02/2025/67acb24f9a79475c1bb9fca1 (Дата обращения: 21.02.2025).
44. Российский разработчик ИИ Cognitive Pilot вошел в ТОП-5 мировых лидеров [Электронный ресурс]. – Stats-N-Data. – 2025. – URL: <https://www.statsndata.org/report/agricultural-machinery-auto-drive-system-market-112850> (Дата обращения: 21.02.2025).
45. Об установлении экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций и утверждении Программы экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций по эксплуатации сельскохозяйственных беспилотных авиационных системы : в редакции от 16 сентября 2023 года : Постановление Правительства Российской Федерации от 16 сентября 2023 года № 1510.
46. Ajakwe, S. O. Facets of security and safety problems and paradigms for smart aerial mobility and intelligent logistics / S. O. Ajakwe, D. S. Kim // IET Intelligent Transport Systems. – 2024. – Т. 18. – С. 2827-2855.
47. Drone deliveries: Taking retail and logistics to new heights // 2024 Outlook & A Perspective Beyond. – 2024. – 42 с.

48. Tele2 и foodora начинают сотрудничество по доставке дронами в Швеции с использованием дронов в стиле молочных банок [Электронный ресурс]. – Дроноагрегатор. – 2025. – URL: <https://dronoagregator.ru/tele2-и-foodora-начинают-сотрудничество-по-доста/>
49. Zipline to launch home delivery service using drone-droid combo [Электронный ресурс]. Дроноагрегатор. – 2025. – URL: <https://dronoagregator.ru/tele2-и-foodora-начинают-сотрудничество-по-доста/> (Дата обращения: 24.04.2025).
50. Аэромакс запустил систему беспилотной доставки грузов в ХМАО-Югре [Электронный ресурс]. – AeroMAX. – 2024. – URL: <https://www.aeromax-group.ru/aeromaks-zapustil-sistemu-bespilotnoj-dostavki-gruzov-v-hmao-yugre-2/> (Дата обращения: 24.04.2025).
51. Татарстанский БПЛА «Кузнечик» выходит на этап тестовых летных испытаний [Электронный ресурс]. – Коммерсантъ. – 2024. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6865571> (Дата обращения: 24.04.2025).
52. «Самокат» начнет тестировать доставку продуктов дронами [Электронный ресурс]. – Ведомости. – 2025. – URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2025/02/14/1092097-samokat-nachnet-testirovat-dostavku-produktov-dronami> (Дата обращения: 24.04.2025).
53. Подготовка к полетам: что мешает развитию доставки [Электронный ресурс]. – Ведомости. Промышленность. – 2024. – URL: https://www.vedomosti.ru/industry/infrastructure_development/articles/2024/05/24/1039200-podgotovka-k-poletam-chto-meshaet-razvitiyu-dostavki (Дата обращения: 24.04.2025).
54. «Почта России» раскрыла стоимость доставки грузов беспилотниками [Электронный ресурс]. – РБК. – 2024. – URL: <https://www.rbc.ru/business/14/10/2024/6709085b9a79472e0b5867bd> (Дата обращения: 24.04.2025).
55. Drone deliveries launched in Beijing's Great Wall Scenic Area [Электронный ресурс]. – CGTN. – 2024. – URL: <https://news.cgtn.com/news/2024-08-17/Drone-deliveries-launched-in-Beijing-s-Great-Wall-Scenic-Area-1w8m4S4EeiI/p.html> (Дата обращения: 24.04.2025).
56. Дубай запустил систему доставки с помощью дронов [Электронный ресурс]. – Большая азия. – 2024. – URL: <https://bigasia.ru/dubaj-zapustil-sistemu-dostavki-s-pomoshhyu-dronov/> (Дата обращения: 24.04.2025).
57. Amazon drones can now fly farther and deliver to more customers following FAA approval [Электронный ресурс]. – Amazon. – 2025. – URL: <https://www.aboutamazon.com/news/transportation/amazon-drone-prime-air-expanded-delivery-faa-approval> (Дата обращения: 24.04.2025).

58. Beyond the aisle: The 2024 state of grocery shopping and delivery [Электронный ресурс]. – Wing. – 2024. – URL: https://storage.googleapis.com/wing-prod/files/Wing_Sept2024_BeyondTheAisle.pdf (Дата обращения: 24.04.2025).
59. Beyond ground transportation: The rise of drone logistics [Электронный ресурс]. – The Robot report. – 2024. – URL: <https://www.therobotreport.com/beyond-ground-transportation-the-rise-of-drone-logistics/> (Дата обращения: 24.04.2025).
60. В России состоялся первый полет тяжелого транспортного беспилотника "Партизан" [Электронный ресурс]. – ТАСС. – 2024. – URL: <https://tass.ru/armiya-i-opk/20001879> (Дата обращения: 24.04.2025).
61. Представлен самый грузоподъемный дрон в России [Электронный ресурс]. – iXBT. – 2024. – URL: <https://www.ixbt.com/news/2024/06/24/predstavlen-samyj-gruzopodemnyj-dron-v-rossii.html> (Дата обращения: 24.04.2025).
62. Corvus robotics brings autonomous inventory management system to lights-out warehouses [Электронный ресурс]. – PR Newswire. – 2024. – URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/corvus-robotics-brings-autonomous-inventory-management-system-to-lights-out-warehouses-302269374.html> (Дата обращения: 24.04.2025).
63. UAV inspections of power transmission networks with AI technology: A case study of lesvos island in greece / G. Chatzargyros, A. Papakonstantinou, V. Kotoula [и др.] // *Energies*. – 2024. – Т. 17. – № 14. – С. 3518.
64. Siddiqui, Z. A. A drone based transmission line components inspection system with deep learning technique / Z. A. Siddiqui, U. Park // *Energies*. – 2020. – Т. 13. – № 13. – С. 3348.
65. Unmanned aerial vehicles (UAVs): Practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends / S. A. H. Mohsan, N. Q. H. Othman, Y. Li [и др.] // *Intelligent service robotics*. – 2023. – Т. 16. – № 1. – С. 109-137.
66. Deep learning in automated power line inspection: A review / M. A. A. Faisal, I. Mecheter, Y. Qiblawey [и др.] // *Applied Energy*. – 2025. – Т. 385. – С. 125507.
67. Drone-based non-destructive inspection of industrial sites: A review and case studies / P. Nooralishahi, C. Ibarra-Castanedo, S. Deane [и др.] // *Drones*. – 2021. – Т. 5. – № 4. – С. 106.
68. Boukabou, I. Electric and magnetic fields analysis of the safety distance for UAV inspection around extra-high voltage transmission lines / I. Boukabou, N. Kaabouch // *Drones*. – 2024. – Т. 8. – № 2. – С. 47.
69. UAV high-voltage power transmission line autonomous correction inspection system based on object detection / Z. Li, Q. Wang, T. Zhang [и др.] // *IEEE Sensors Journal*. – 2023. – Т. 23. – № 9. – С. 10215-10230.

70. Review on the advancements in wind turbine blade inspection: Integrating drone and deep learning technologies for enhanced defect detection / M. Memari, P. Shakya, M. Shekarmiz [и др.] // IEEE Access. – 2024. – Т. 12. – С. 33236-33282.
71. Unmanned aerial drones for inspection of offshore wind turbines: A mission-critical failure analysis / M. Sheftee, Z. Zhou, L. Mei [и др.] // Robotics. – 2021. – Т. 10. – № 1. – С. 26.
72. Wind turbine surface damage detection by deep learning aided drone inspection analysis / A. S. M. Shihavuddin, X. Chen, V. Fedorov [и др.] // Energies. – 2019. – Т. 12. – № 4. – С. 676.
73. LiDAR-based unmanned aerial vehicle offshore wind blade inspection and modeling / A. Oliveira, A. Dias, T. Santos [и др.] // Drones. – 2024. – Т. 8. – № 11. – С. 617.
74. García Márquez, F. P. Acoustic inspection system with unmanned aerial vehicles for wind turbines structure health monitoring / F. P. García Márquez, P. J. Bernalte Sánchez, I. Segovia Ramírez // Structural Health Monitoring. – 2022. – Т. 21. – № 2. – С. 485-500.
75. Wemmers, C. C. LiDAR-based automated UAV inspection of wind turbine rotor blades / C. C. Wemmers, J. Pflughaupt, L. Moshagen // Journal of Field Robotics. – 2024. – Т. 41. – № 4. – С. 1116-1132.
76. Lee, D. H. Developing inspection methodology of solar energy plants by thermal infrared sensor on board unmanned aerial vehicles / D. H. Lee, J. H. Park // Energies. – 2019. – Т. 12. – № 15. – С. 2928.
77. An efficient optimization of battery-drone-based transportation systems for monitoring solar power plant / M. Jemmali, A. K. Bashir, W. Boulila [и др.] // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2022. – Т. 24. – № 12. – С. 15633-15641.
78. Vergura, S. Criticalities of the outdoor infrared inspection of photovoltaic modules by means of drones / S. Vergura // Energies. – 2022. – Т. 15. – № 14. – С. 5086.
79. Vergura, S. Unmanned aerial vehicle for infrared inspection of photovoltaic modules / S. Vergura // 20th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'22). – 2022. – С. 621-628.
80. Liao, K. C. Using UAV to detect solar module fault conditions of a solar power farm with IR and visual image analysis / K. C. Liao, J. H. Lu // Applied Sciences. – 2021. – Т. 11. – № 4. – С. 1835.
81. Solar panel detection within complex backgrounds using thermal images acquired by UAVs / J. J. Vega Díaz, M. Vlamincx, D. Lefkaditif [и др.] // Sensors. – 2020. – Т. 20. – № 21. – С. 6219.
82. Liao, K. Using drones for thermal imaging photography and building 3D images to analyze the defects of solar modules / K. C. Liao, H. Y. Wu, H. T. Wen // Inventions. – 2022. – Т. 7. – № 3. – С. 67.

83. Cost-effective flight strategy for aerial thermography inspection of photovoltaic power plants / V. Lofstad-Lie, E. S. Marstein, A. Simonsen, T. Skauli // *IEEE Journal of Photovoltaics*. – 2022. – Т. 12. – № 6. – С. 1543-1549.
84. Anderson, K. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology / K. Anderson, K. J. Gaston // *Frontiers in Ecology and the Environment*. – 2013. – Т. 11. – № 3. – С. 138-146.
85. Boost precision agriculture with unmanned aerial vehicle remote sensing and edge intelligence: A survey / J. Liu, J. Xiang, Y. Jin [и др.] // *Remote Sensing*. – 2021. – Т. 13. – № 21. – С. 4387.
86. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A review of perspective of platform, control, and applications / J. Kim, S. Kim, C. Ju, H. I. Son // *IEEE Access*. – 2019. – Т. 7. – С. 105100-105115.
87. Drones in plant disease assessment, efficient monitoring, and detection: a way forward to smart agriculture / A. Abbas, Z. Zhang, H. Zheng [и др.] // *Agronomy*. – 2023. – Т. 13. – № 6. – С. 1524.
88. UAV remote sensing for biodiversity monitoring: are forest canopy gaps good covariates? / M. B. Bagaram, D. Giuliarelli, G. Chirici [и др.] // *Remote Sensing*. – 2018. – Т. 10. – № 9. – С. 1397.
89. Grassland biodiversity can pay / S. Binder, F. Isbell, S. Polasky [и др.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2018. – Т. 115. – № 15. – С. 3876-3881.
90. Corcoran, E. Evaluating new technology for biodiversity monitoring: Are drone surveys biased? / E. Corcoran, S. Denman, G. Hamilton // *Ecology and Evolution*. – 2021. – Т. 11. – № 11. – С. 6649-6656.
91. A review of unmanned aerial vehicle low-altitude remote sensing (UAV-LARS) use in agricultural monitoring in China / H. Zhang, L. Wang, T. Tian, J. Yin // *Remote Sensing*. – 2021. – Т. 13. – № 6. – С. 1221.
92. Collection of data with drones in precision agriculture: Analytical model and LoRa case study / A. Caruso, S. Chessa, S. Escobar [и др.] // *IEEE Internet of Things Journal*. – 2021. – Т. 8. – № 22. – С. 16692-16704.
93. Paneque-Gálvez, J., et al. Small drones for community-based forest monitoring: An assessment of their feasibility and potential in tropical areas / J. Paneque-Gálvez, M. K. McCall, B. M. Napoletano [и др.] // *Forests*. – 2014. – Т. 5. – № 6. – С. 1481-1507.
94. Zhang, Z. A review on unmanned aerial vehicle remote sensing: Platforms, sensors, data processing methods, and applications / Z. Chang, L. Zhu // *Drones*. – 2023. – Т. 7. – № 6. – С. 398.

95. Buras, A. The European forest condition monitor: Using remotely sensed forest greenness to identify hot spots of forest decline / A. Buras, A. Rammig, C. S. Zang // *Frontiers in Plant Science*. – 2021. – Т. 12. – С. 689220.
96. Review of remote sensing-based methods for forest aboveground biomass estimation: Progress, challenges, and prospects / L. Tian, X. Wu, Y. Tao [и др.] // *Forests*. – 2023. – Т. 14. – № 6. – С. 1086.
97. LiDAR applications to estimate forest biomass at individual tree scale: Opportunities, challenges and future perspectives / D. Xu, H. Wang, W. Xu [и др.] // *Forests*. – 2021. – Т. 12. – № 5. – С. 550.
98. Assessment of loess terraced slope erosion using unmanned aerial vehicle photogrammetry: Topographic and hydrological effects / P. Kou, Q. Xu, Z. Jin [и др.] // *Land Degradation & Development*. – 2024. – Т. 35. – № 7. – С. 2462-2475.
99. Water-quality monitoring with a UAV-mounted multispectral camera in coastal waters / A. Román, A. Tovar-Sánchez, A. Gauci [и др.] // *Remote Sensing*. – 2022. – Т. 15. – № 1. – С. 237.
100. Chen, J. Study on parameter inversion model construction and evaluation method of UAV hyperspectral urban inland water pollution dynamic monitoring / J. Chen, J. Wang, S. Feng // *Water*. – 2023. – Т. 15. – № 23. – С. 4131.
101. Pajares, G. Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs) / G. Pajares // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. – 2015. – Т. 81. – № 4. – С. 281-330.
102. Towards UAV assisted monitoring of an aquatic vegetation within the large rivers–The Middle Danube / M. Novković, D. Cvijanović, M. Minučer [и др.] // *Carpathian Journal Of Earth And Environmental Sciences*. – 2023. – Т. 18. – № 2. – С. 307-322.
103. Langhammer, J. Use of UAV monitoring to identify factors limiting the sustainability of stream restoration projects / J. Langhammer, T. Lendzioch, J. Šolc // *Hydrology*. – 2023. – Т. 10. – № 2. – С. 48.
104. Application of drone technologies in surface water resources monitoring and assessment: A systematic review of progress, challenges, and opportunities in the global south / M. Sibanda, O. Mutanga, V. G. Chimonyo [и др.] // *Drones*. – 2021. – Т. 5. – № 3. – С. 84.
105. A swarm of small drones may help artificial reefs attract sea life [Электронный ресурс]. – *Manufacturing*. – 2025. – URL: <https://www.manufacturing.net/technology/news/22934287/a-swarm-of-small-drones-may-help-artificial-reefs-attract-sea-life> (Дата обращения: 21.02.2025).
106. Gilvear, D. Analysis of aerial photography and other remotely sensed data / D. Gilvear, R. Bryant // *Tools in fluvial geomorphology*. – 2003. – Т. 5. – С. 23.

107. Comparing factors conditioning landscape change during volcanic eruption at Virunga National Park, East Africa / M. Udhogora, Z. P. Yang, V. Nzabarinda [и др.] // *Applied Ecology and Environmental Research*. – 2021. – Т. 19. – № 5. – С. 3789-3803.
108. Monitoring land use/land cover and landscape pattern changes at a local scale: A case study of Pyongyang, North Korea / Y. Piao, Y. Xiao, F. Ma [и др.] // *Remote Sensing*. – 2023. – Т. 15. – № 6. – С. 1592.
109. Existing and emerging uses of drones in restoration ecology / J. M. Robinson, P. A. Harrison, S. Mavoa, M. F. Breed // *Methods in Ecology and Evolution*. – 2022. – Т. 13. – № 9. – С. 1899-1911.
110. Steps to build a DIY low-cost fixed-wing drone for biodiversity conservation / G. P. Mesquita, J. D. Rodríguez-Teijeiro, R. R. de Oliveira, M. Mulero-Pázmány // *PloS One*. – 2021. – Т. 16. – № 8. – С. e0255559.
111. Нейросеть насчитала почти 180 белых медведей на Медвежьих островах в Якутии [Электронный ресурс]. – ТАСС. – 2024. – URL: <https://nauka.tass.ru/nauka/20288993>
112. Корпорация "Новый космос" займется экомониторингом в заповедниках РФ [Электронный ресурс]. – ТАСС. – 2024. – URL: <https://nauka.tass.ru/nauka/20310165> (Дата обращения: 21.02.2025).
113. За экологией края будут следить беспилотники [Электронный ресурс]. – ДЕЛА. – 2024. – URL: <https://dela.ru/lenta/288107/> (Дата обращения: 21.02.2025).
114. Уникальный экодрон будет мониторить воздух и воду вблизи предприятий Севера [Электронный ресурс]. – ДЕЛА. – 2024. – URL: <https://dela.ru/lenta/289541/> (Дата обращения: 21.02.2025).
115. Состояние популяции тюленей в Белом море изучат для возможного промысла [Электронный ресурс]. – ТАСС. – 2024. – URL: <https://nauka.tass.ru/nauka/20157941> (Дата обращения: 21.02.2025).
116. Беспилотники на Камчатке будут следить за нерестом лососей [Электронный ресурс]. – Аргументы и Факты. – 2024. – URL: <https://kamchatka.aif.ru/society/bespilotniki-na-kamchatke-budut-sledit-za-nerestom-lososey> (Дата обращения: 21.02.2025).
117. Всевидящее око дрона: учет численности диких животных в регионе ведется с помощью беспилотников [Электронный ресурс]. – Министерство природных ресурсов и экологии Новосибирской области. – 2025. – URL: <https://mpr.nso.ru/news/8656> (Дата обращения: 21.02.2025).
118. Беспилотники задействованы в охране байкальского омуля в Бурятии [Электронный ресурс]. – Байкал24. – 2024. – URL: <https://baikal24.ru/text/23-09-2024/056/> (Дата обращения: 21.02.2025).

119. На охрану Байкала в Бурятии вышли «летающие инспекторы» [Электронный ресурс]. – БуряадУнэн. – 2021. – URL: <https://burunen.ru/news/society/80374-na-okhranu-baykala-v-buryatii-vyshli-letayushchie-inspektory/> (Дата обращения: 21.02.2025).
120. Незаконную вырубку лесов на Сахалине будут выявлять при помощи дронов [Электронный ресурс]. – 2024. – SAKH.ONLINE. – URL: <https://sakh.online/news/18/2024-07-12/nezakonnuyu-vyrubku-lesov-na-sahaline-budut-vyyavlyat-pri-pomoschi-dronov-428760> (Дата обращения: 21.02.2025).
121. Для чего дроны будут летать над лесами Северного Казахстана [Электронный ресурс]. – QM. – 2024. – URL: <https://qaz-media.kz/dlya-chego-drony-budut-letat-nad-lesami-severnogo-kazakhstana/> (Дата обращения: 21.02.2025).
122. В Северо-Курильске с помощью дрона промониторили работы по утилизации судов [Электронный ресурс]. – SakhalinMedia. – 2024. – URL: <https://sakhalinmedia.ru/news/1821020/> (Дата обращения: 21.02.2025).
123. В Крыму для мониторинга акватории Керченского пролива начнут использовать дроны [Электронный ресурс]. – ТАСС. – 2025. – URL: <https://tass.ru/obschestvo/22849293> (Дата обращения: 21.02.2025).
124. В Магадане будут использовать беспилотники для мониторинга чистоты на улицах [Электронный ресурс]. – ТАСС. – 2024. – URL: <https://tass.ru/obschestvo/21204367> (Дата обращения: 21.02.2025).
125. В 2025-м году в Ленобласти закупят 56 беспилотников для мониторинга лесных массивов [Электронный ресурс]. – online47.ru. – 2024. – URL: <https://online47.ru/2024/09/23/v-2025-m-godu-v-lenoblasti-zakupyat-56-bespilotnikov-dlya-monitoringa-lesnykh-massivov-203634> (Дата обращения: 21.02.2025).
126. Особенности применения беспилотных летательных аппаратов для мониторинга объектов нефтегазового комплекса / А. В. Калач, Т. П. Сысоева, Е. В. Калач [и др.] // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2022. – № 2(25). – С. 111-115.
127. Unmanned aerial systems for the oil and gas industry: Overview, applications, and challenges / T. R. Wanasinghe, R. G. Gosine, O. de Silva [и др.] // IEEE Access. – 2020. – Т. 8. – С. 166980-166997.
128. Дашкина, А. Р. Применение беспилотных летательных аппаратов для повышения безопасности в нефтегазовой отрасли / А. Р. Дашкина // Нефтяная смена. Энергия будущего! : Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 07 мая 2022 года. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2022. – С. 28-30.
129. Nooralishahi, P. A drone-enabled approach for gas leak detection using optical flow analysis / P. Nooralishahi, F. López, X. Maldague // Applied Sciences. – 2021. – Т. 11. – № 4. – С. 1412.

130. Nikulin, A. A UAV-based magnetic survey method to detect and identify orphaned oil and gas wells / A. Nikulin, T. S. de Smet // *The Leading Edge*. – 2019. – Т. 38. – № 6. – С. 447-452.
131. UAV and its approach in oil and gas pipeline leakage detection / S. Akande, A. Adetunla, T. Olanrewaju, A. Adeye // *Journal of Robotics*. – 2021. – Т. 2021. – № 1. – С. 1300740.
132. Kootala, A. Drones are endangering energy critical infrastructure, and how we can deal with this / A. Kootala, A. Mousa, P. W. T. Pong // *Energies*. – 2023. – Т. 16. – № 14. – С. 5521.
133. Дрон «Паук» вышел на «охоту» чистить электропровода [Электронный ресурс]. – НИА. – 2025. – URL: <https://24rus.ru/news/economy/226794.html> (Дата обращения: 21.02.2025).
134. БПЛА запустят в небе над Кезским районом Удмуртии [Электронный ресурс]. – Комсомольская правда. – 2024. – URL: <https://www.izh.kp.ru/online/news/5849419/> (Дата обращения: 21.02.2025).
135. Мурашко оценил результаты тестирования БПЛА в медицине [Электронный ресурс]. – РИА Новости. – 2024. – URL: <https://ria.ru/20240423/murashko-1941667876.html> (Дата обращения: 24.04.2025).
136. Испытания промышленного беспилотного летательного аппарата "Аист" на Сахалине [Электронный ресурс]. – Новости ДронСолюшнс. – 2023. – URL: <https://dronesolutions.ru/tpost/275vat3dul-ispitaniya-na-sahaline> (Дата обращения: 24.04.2025).
137. Российские ученые первыми в мире доказали безопасность перевозки плазмы крови с помощью БПЛА [Электронный ресурс]. – Наука.РФ. – 2025. – URL: <https://наука.рф/news/rossiyskie-uchenye-pervymi-v-mire-dokazali-bezopasnost-perevozki-plazmy-krovi-s-pomoshchyu-bpla/> (Дата обращения: 24.04.2025).
138. Александрой, В. И. Беспилотные летательные аппараты на службе МЧС России / В. И. Александрой, В. Н. Винокуров // *Инженерные технологии в сельском и лесном хозяйстве : Материалы Всероссийской национальной научно-практической конференции, Тюмень, 21–22 мая 2020 года* / Ответственный редактор: Иванов А.С.. – Тюмень: Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2020. – С. 97-99.
139. Абрамов, М. М. Новые и перспективные направления применения беспилотных летательных аппаратов / М. М. Абрамов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2022. – № 3. – С. 227-232.
140. В Якутии спасли замерзающих в палатке мать с дочерью [Электронный ресурс]. – РИА Новости. – 2024. – URL: <https://ria.ru/20240324/yakutiya-1935489976.html> (Дата обращения: 21.02.2025).
141. Дрон и нейросеть нашли пропавшую в Подмосковье бабушку всего за 45 минут [Электронный ресурс]. – mir24tv. – 2024. – URL: <https://mir24.tv/news/16597715/dron-i->

neiroset-nashli-propavshuyu-v-podmoskove-babushku-vsego-za-45-minut (Дата обращения: 21.02.2025).

142. Видео поиска грибника с дрона в Кировской области появилось в сети [Электронный ресурс]. – Вятка-на-Сети. – 2024. – URL: https://vkirove.ru/news/2024/08/05/s_pomoshchyu_drona_nashli_pensionera_zaplutavshego_v_lesakh_sanchurska.html (Дата обращения: 21.02.2025).

143. Квадрокоптеры начнут применять в Москве при поиске пропавших людей [Электронный ресурс]. – ТАСС. – 2024. – URL: <https://tass.ru/obschestvo/20946813> (Дата обращения: 21.02.2025).

144. На пляжах Антальи спасти тонущих туристов будут дроны [Электронный ресурс]. – Tourdom.ru. – 2024. – URL: <https://www.tourdom.ru/news/na-plyazhakh-antali-spasat-tonushchikh-turistov-budut-drony.html> (Дата обращения: 21.02.2025).

145. В Зеленоградске купленный для спасения утопающих дрон лежит без дела [Электронный ресурс]. – КЛОПС. – 2024. – URL: <https://klops.ru/kaliningrad/2024-08-12/301729-v-zelenogradske-kuplennyy-dlya-spaseniya-utopayuschih-dron-lezhit-bez-dela-istochnik> (Дата обращения: 21.02.2025).

146. На Сахалине беспилотники помогают спасать людей и ремонтировать дороги [Электронный ресурс]. – RGRU. – 2024. – URL: <https://rg.ru/2024/04/12/reg-dfo/na-sahaline-vintokrylye-ptichki-pomogaiut-spasat-liudej-i-remontirovat-dorogi.html> (Дата обращения: 06.03.2025).

147. Жостков, Р. А. Опыт использования беспилотников в арктических экспедициях для фотограмметрии и других прикладных задач [Электронный ресурс] / Р. А. Жостков, С. А. Тощов. – GEOSCAN. Калмыкия. – 2024. – URL: <https://www.geoscan.ru/ru/blog/opyt-ispolzovaniya-bpla-v-arkticheskikh-ekspeditsiyakh-dlya-fotogrammetrii-i-drugikh-prikladnykh-zadach> (Дата обращения: 09.03.2025).

148. NASA Tests Drones to Provide Micrometeorology, Aid in Fire Response [Электронный ресурс]. – NASA. – 2024. – URL: <https://www.nasa.gov/general/nasa-tests-drones-to-provide-micrometeorology-aid-in-fire-response/> (Дата обращения: 09.03.2025).

149. Заглянуть за горизонт: костанайские леса защищают от огня с помощью беспилотников [Электронный ресурс]. – zakon.kz. – 2024. – URL: <https://www.zakon.kz/stati/6448249-zaglyanut-za-gorizont-kostanayskie-lesa-zashchishchayut-ot-ognya-s-pomoshchyu-besplotnikov.html> (Дата обращения: 21.02.2025).

150. Югра перешла на беспилотники для контроля лесных пожаров [Электронный ресурс]. – РИЦ «Югра». – 2024. – URL: <https://informugra.ru/news/ecology/yugra-pereshla-na-besplotniki-dlya-kontrolya-lesnykh-pozharov/> (Дата обращения: 06.03.2025).

151. В Приангарье начали использовать беспилотники для мониторинга лесных пожаров [Электронный ресурс]. – Официальный интернет портал правовой информации Иркутской области. – 2024. – URL: <https://www.ogirk.ru/2024/07/09/v-priangare-nachali-ispolzovat-bespilotniki-dlja-monitoringa-lesnyh-pozharov/> (Дата обращения: 06.03.2025).
152. В Саратовской области за пожарами следят 23 беспилотника [Электронный ресурс]. – Саратов 24. – 2024. – URL: <https://saratov24.tv/news/v-saratovskoy-oblasti-za-pozharami-sledyat-23-bespilotnika/> (Дата обращения: 06.03.2025).
153. Беспилотники нашли 197 свердловских нарушителей противопожарного режима за неделю [Электронный ресурс]. – Уральский Меридиан. – 2024. – URL: <https://ural-meridian.ru/news/501148/> (Дата обращения: 09.03.2025).
154. БПЛА поднимут в воздух в Волгоградской области из-за пожаров [Электронный ресурс]. – Новости Волгограда. – 2024. – URL: <https://novostivolgograda.ru/news/2024-10-01/bpla-podnimut-v-vozduh-v-volgogradskoy-oblasti-iz-za-pozharov-5209300> (Дата обращения: 09.03.2025).
155. Минприроды Прикамья закупит 18 беспилотников. Рассказываем, зачем [Электронный ресурс]. – PROPERM.RU. – 2024. – URL: <https://properm.ru/news/2024-06-17/minprirody-prikamya-zakupit-18-bespilotnikov-rasskazyvaem-zachem-5112481> (Дата обращения: 09.03.2025).
156. В Калмыкии беспилотники выявили 35 нарушений пожарной безопасности [Электронный ресурс]. – МКRU. Калмыкия. – 2024. – URL: <https://www.mk-kalm.ru/social/2024/07/09/v-kalmykii-bespilotniki-vyyavili-35-narusheniy-pozharnoy-bezopasnosti.html> (Дата обращения: 09.03.2025).
157. Разработанный физиками ТГУ дрон "Шмель" поможет быстрее тушить пожары [Электронный ресурс]. – РИА Томск. – 2024. – URL: <https://www.riatomsk.ru/article/20240826/razrobotannij-uchenimi-tgu-dron-shmelj-pomozhet-bistree-tushitj-pozhari/> (Дата обращения: 06.03.2025).
158. BRINC's 911 response drone is first of its kind, can reach calls in under 70 seconds [Электронный ресурс]. – TecheBlog. – 2024. – URL: <https://www.techeblog.com/brinc-911-response-drone/> (Дата обращения: 24.04.2025).
159. Dubai Police announces use of drones to tackle emergencies; residents alerted [Электронный ресурс]. – Khaleej Times. – 2024. – URL: <https://www.khaleejtimes.com/uae/dubai-police-announces-use-of-drones-to-tackle-emergencies-residents-alerted> (Дата обращения: 24.04.2025).

160. "Беспилот" показал новые автономные полицейские дроны в Техасе [Электронный ресурс]. – Обзор. – 2024. – URL: <https://obzor.lt/news/n106224.html> (Дата обращения: 24.04.2025).
161. Российские дроны «Джокер» адаптировали под задачи ПВО [Электронный ресурс]. – Lenta.ru. – 2024. – URL: <https://lenta.ru/news/2024/03/31/rossiyskie-drony-dzhoker-adaptirovali-pod-zadachi-pvo/> (Дата обращения: 24.04.2025).
162. В Японии планируют использовать дроны с ИИ для борьбы с мародерами в зоне бедствий [Электронный ресурс]. – ТАСС. – 2024. – URL: <https://tass.ru/obschestvo/21696743> (Дата обращения: 24.04.2025).
163. В Костромской области нарушения на дороге теперь фиксируют дроны [Электронный ресурс]. – МК.RU. – 2024. – URL: <https://kostroma.mk.ru/social/2024/07/21/v-kostromskoy-oblasti-narusheniya-na-doroge-teper-fiksiruyut-drony.html> (Дата обращения: 24.04.2025).
164. В Кировской области нарушения ПДД стали фиксировать с помощью квадрокоптеров [Электронный ресурс]. – ГТРК «Вятка». – 2024. – URL: <https://www.gtrk-vyatka.ru/vesti/transport/100373-v-kirovskoj-oblasti-narusheniya-pdd-stali-fiksirovat-s-pomoschju-kvadrokopterov.html> (Дата обращения: 24.04.2025).
165. В Подмосковье выявили десятки нелегальных мигрантов с помощью квадрокоптера [Электронный ресурс]. – Газета.ru. – 2024. – URL: <https://www.gazeta.ru/social/news/2024/06/28/23346937.shtml> (Дата обращения: 24.04.2025).
166. В Челябинской области силовики запустили дрон, чтобы искать иностранцев [Электронный ресурс]. – Комсомольская правда. – 2024. – URL: <https://www.chel.kp.ru/online/news/5970125/> (Дата обращения: 24.04.2025).
167. В российском регионе уклонистов нашли в промышленной зоне с помощью дронов [Электронный ресурс]. – Lenta.ru. – 2024. – URL: <https://lenta.ru/news/2024/09/18/v-rossiyskom-regione-uklonistov-nashli-v-promyshlennoy-zone-s-pomoschyu-dronov/> (Дата обращения: 24.04.2025).
168. В Белогорске дрон поможет искать свалки [Электронный ресурс]. – Порт Амур. – 2025. – URL: <https://portamur.ru/news/detail/v-belogorske-dron-pomojet-iskat-svalki/> (Дата обращения: 24.04.2025).
169. В России разработают новые полярные беспилотники [Электронный ресурс]. – Известия. – 2024. – URL: <https://iz.ru/1699556/2024-05-21/v-rossii-razrabotaiut-novye-poliarnye-bespilotniki> (Дата обращения: 24.04.2025).
170. В России разработали сферический дрон для исследования погоды [Электронный ресурс]. – ТАСС. Наука. – 2024. – URL: <https://nauka.tass.ru/nauka/21715661> (Дата обращения: 24.04.2025).

171. NASA отправит на Марс вертолет размером с внедорожник для поиска воды и жизни [Электронный ресурс]. – Коммерсантъ. – 2025. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/7638782> (Дата обращения: 24.04.2025).
172. Advanced bio-hybrid drone for superior odor-source localization: high-precision and extended-range detection capabilities / C. Fukui, T. Uchida, S. Koizumi [и др.] // NPJ Robotics. – 2025. – Т. 3. – № 1. – С. 4.
173. India drone market size & Share by platform. – MarketsandMarkets. – 2025. – URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/india-drone-market-136782206.html> (Дата обращения: 24.04.2025).
174. China drone market size & outlook, 2024-2030. – Grand View Horizon. – 2024. – URL: <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/drone-market/china> (Дата обращения: 24.04.2025).
175. Степанов, М. Ф. Подход к оценке качества системы управления группой БПЛА для дистанционного зондирования Земли / М. Ф. Степанов, А. М. Степанов, О. М. Степанова // Математические методы в технологиях и технике. – 2022. – № 5. – С. 122-128.
176. Unmanned aerial system and satellite: Which one is a better platform for monitoring of the peanut crops? / J. B. Costa Souza, S. Luns Hatum de Almeida, A. Lopes de Brito Filho [и др.] // Agronomy Journal. – 2023. – Т. 115. – № 3. – С. 1146-1160.
177. A novel distributed architecture for unmanned aircraft systems based on Robot Operating System 2 / L. Bianchi, D. Carnevale, F. Del Frate [и др.] // IET Cyber-Systems and Robotics. – 2023. – Т. 5. – № 1. – С. e12083.
178. Лысенко, Н. В. Принципы функциональной организации, методы оценки и повышения эффективности видеоинформационных систем учебно-тренировочного назначения. : специальность 05.11.16 «Информационно-измерительные и управляющие системы (машиностроение, промышленность)» : диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук / Николай Владимирович Лысенко ; Санкт-Петербург, 2002. – 290 с.
179. Вильсон, Н. Г. Анализ основных методов и способов управления БПЛА в том числе с использованием технологий искусственного интеллекта / Н. Г. Вильсон, А. Н. Володин // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2024. – № 4(28). – С. 15-30.
180. Fahlstrom, P. G. Introduction to UAV systems. Fifth edition / P. G. Fahlstrom, T. J. Gleason, M. H. Sadraey – John Wiley & Sons, 2022. – 227 с.
181. Окусский, М. В. Реконфигурируемые алгоритмы управления в задачах стабилизации безопасного движения БПЛА / М. В. Окусский, С. В. Шидловский // Технологии безопасности жизнедеятельности. – 2023. – № 2. – С. 34-45.

182. Веселов, Г. Е. Синергетический синтез дискретных систем управления продольным движением БПЛА / Г. Е. Веселов // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. – 2023. – Т. 1. – С. 17-22.
183. Yao, Z. Efficient UAV image recognition mechanism for digital management system in wireless communication networks / Z. Yao, G. Song, J. Zhao // Internet Technology Letters. – 2025. – Т. 8. – № 4. – С. e70050.
184. Agrawal, J. UAV-SHUTTLE-MMM: UAV-shuttle-enabled mobility management model in sparsely deployed flying ad hoc networks / J. Agrawal, M. Kapoor // International Journal of Communication Systems. – 2025. – Т. 38. – № 1. – С. e5653.
185. Ananthi, J. V. Mobility Management UAV-based Grouping routing protocol in flying ad hoc networks for biomedical applications / J. V. Ananthi, P. S. H. Jose // International Journal of Communication Systems. – 2023. – Т. 36. – № 1. – С. e5362.
186. Optimization of spectrum resource management and position placement for UAV base station networks / T. Zhong, D. Wu, G. Li [и др.] // Wireless Communications and Mobile Computing. – 2023. – Т. 2023. – № 1. – С. 2328249.
187. Разработка структуры системы принятия решения при управлении БПЛА / В. А. Малиновкин, Н. В. Валуйских, В. Ф. Барабанов [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2023. – Т. 19. – № 6. – С. 41-46.
188. Bowler, E. Automated UAV and satellite image analysis for wildlife monitoring : дис. ... PhD / Bowler Ellen. – University of East Anglia, 2023. – 187 с.
189. Flocking navigation and obstacle avoidance for UAV swarms via adaptive risk avoidance willingness mechanism / C. Li, X. Xiang, Y. Sun [и др.] // IET Cyber-Systems and Robotics. – 2025. – Т. 7. – № 1. – С. e70009.
190. Федоров, Д. Е. Разработка программного обеспечения для бесконтактного управления БПЛА / Д. Е. Федоров // Аграрная наука. – 2024. – № 2. – С. 107-112.
191. Model predictive control for autonomous UAV landings: A comprehensive review of strategies, applications and challenges / K. Panjavarnam, Z. H. Ismail, C. H. N. Tang [и др.] // The Journal of Engineering. – 2025. – Т. 2025. – № 1. – С. e70085.
192. Волосова, А. В. Реализация автоматизированного управления дроном с использованием технологий искусственного интеллекта / А. В. Волосова // Инженер и промышленник сегодня. – 2022. – № 4(58). – С. 30-34.
193. Xiong, S. X. A distributed containment tracking control of the UAV formation with prescribed performance subject to collision avoidance / S. X. Xiong, X. P. Xie, G. P. Jiang // International Journal of Robust and Nonlinear Control. – 2024. – Т. 34. – № 9. – С. 5813-5832.

194. Надеждин, Е. Н. Системы ситуационного группового управления беспилотными летательными аппаратами: состояние и перспективы / Е. Н. Надеждин, И. Ф. Котова, В. Е. Глущенко // Современные наукоемкие технологии. – 2024. – № 12. – С. 252-262.
195. Титаренко, Д. Ю. Анализ современного состояния области управления БПЛА с помощью нейросетевых технологий / Д. Ю. Титаренко, М. Н. Рыжкова // Методы и устройства передачи и обработки информации. – 2024. – № 26. – С. 60-65.
196. Kim, S. Beam steering antenna with reconfigurable parasitic elements for FPV drone applications / S. Kim, J. Choi // Microwave and Optical Technology Letters. – 2018. – Т. 60. – № 9. – С. 2173-2177.
197. Nasehi, M. A comprehensive review of FPV technology: Applications, advantages, and future trends / M. Nasehi // Machine Learning Research. – 2024. – Т. 10(1). – С. 25-31.
198. Cureton P. Drone tutures: UAS in landscape and urban design / P. Cureton. – Routledge, 2020. – 298 p.
199. Benjak, J. Deferred demosaicking: efficient first-person view drone video encoding / J. Benjak, D. Hofman, H. Mlinarić // Journal of Real-Time Image Processing. – 2025. – Т. 22. – № 2. – С. 101.
200. Examining the influence of using first-person view drones as auxiliary devices in matte painting courses on college students' continuous learning intention / C. Gu, J. Sun, T. Chen [и др.] // Journal of Intelligence. – 2022. – Т. 10. – № 3. – С. 40.
201. Chien, E. Dynamically tunable helical antenna / E. Chien, J. Steckel // arXiv preprint arXiv:2506.14065. – 2025.
202. Review of antennas used in FPV/WLAN applications / B. Karunnya, J. V. Sarath, R. Laila, B. P. Plalakkal // ACTA TECHNICA CORVINIENSIS – Bulletin of Engineering. 2021. – Т. 14. – № 1. – С. 29-40.
203. FPV-дроны и борьба с ними / В. Ю. Марцинкевич, Е. В. Пискунов, Е. В. Селезнева, А. А. Соловьев // Вектор научной мысли. – 2024. – № 10(15). – С. 110-112.
204. FPV-дроны / А. Л. Иванов, В. Ю. Морозов, А. А. Соловьев, Р. Ю. Сухарев // Флагман науки. – 2024. – № 10(21). – С. 256-258.
205. Оптоволоконные технологии в противовес средствам радиоэлектронной борьбы противника / В. П. Полковников, К. Д. Прохоренко, Г. Д. Ефанов, А. А. Клепиковский // Флагман науки. – 2024. – № 12(23). – С. 405-410.
206. Шерстюков, С. А. Алгоритм формирования сосредоточенной по спектру помехи для радиоэлектронного подавления каналов управления беспилотных летательных аппаратов / С. А. Шерстюков // Вестник Воронежского института МВД России. – 2024. – № 4. – С. 128-138.

207. Везарко, Д. А. Исследование радиолокационных зондирующих сигналов для задачи обнаружения малоразмерных и низкоскоростных целей / Д. А. Везарко // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2024. – № 4-1(91). – С. 170-175.
208. Разработка симулятора управления FPV-квадрокоптером для виртуальной реальности на платформе Unity / З. Лященко, А. Лященко, В. Горбанев, А. Ковальчук // Информационные ресурсы России. – 2024. – № 6(201). – С. 13-30.
209. A survey and analysis of drone detection systems using a systems approach superposed on scenarios / R. N. Kashi, A. Prashanth, S. R. Kashi, G. Prabhakara // Systems Engineering. – 2024. – Т. 27. – № 3. – С. 598-636.
210. Self-healing hydrogel-based triboelectric nanogenerator in smart glove system for integrated drone safety protection and motion control / C. Wang, H. Niu, G. Shen, Y. Li // Advanced Functional Materials. – 2025. – Т. 35. – № 17. – С. 2419809.
211. Barr, K. C. Energy-aware lossless data compression / K. C. Barr, K. Asanvoic // ACM Transaction on computer systems. – 2006. – Т. 24. – № 3. – С. 250-291.
212. Интернет навыков / А. Е. Кучерявый, Е. А. Кучерявый, Р. В. Киричек [и др.] // Электросвязь. – 2018. – № 1. – С. 29-32.
213. Internet of skills, where robotics meets AI, 5G and the tactile internet / M. Dohler, T. Mahmoodi, T. Lema [и др.] // 2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). – IEEE, 2017. – С. 1-5.
214. Баранник, В. В. Стратегия управления битовой скоростью при обработке предсказываемых кадров для повышения доступности и целостности информационных ресурсов / В. В. Баранник, Н. А. Харченко, С. Ю. Стасев // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – № 169. – 2014. – С. 31-38.
215. Effects of low video latency between visual information and physical sensation in immersive environments / T. Kadowaki, M. Maruyama, T. Hayakawa [и др.] // Proceedings of the 24th ACM symposium on Virtual Reality Software and Technology. – 2018. – С. 1-2.
216. Lago, N. P. The quest for low latency / N. P. Lago, F. Kon // Proceedings of the International Computer Music Conf (ICMC). – 2004.
217. Mäki-Patola, T. Latency tolerance for gesture controlled continuous sound instrument without tactile feedback / T. Mäki-Patola, P. Hämäläinen // ICMC. – 2004.
218. 4.4 a 197mw 70ms-latency full-hd 12-channel video-processing soc for car information systems / S. Mochizuki, K. Matsubara, K. Matsumoto [и др.] // 2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). – IEEE, 2016. – С. 78-79.

219. Bennis, M. Ultrareliable and low-latency wireless communication: Tail, risk, and scale / M. Bennis, M. Debbah, H. V. Poor // *Proceedings of the IEEE*. – 2018. – Т. 106. – № 10. – С. 1834-1853.
220. JPEG XS, a new standard for visually lossless low-latency lightweight image compression / A. Descampe, J. Keinert, T. Richtek [и др.] // *Applications of Digital Image Processing XL*. – SPIE, 2017. – Т. 10396. – С. 68-79.
221. Wallace G. K. The JPEG still picture compression standard / G. K. Wallace // *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. – 1992. – Т. 38. – № 1. – С. 18-34.
222. Skodras, A. The JPEG 2000 still image compression standard / A. Skodras, C. Christopoulos, T. Ebrahimi // *IEEE Signal processing magazine*. – 2001. – Т. 18. – № 5. – С. 36-58.
223. Weinberger, M. J. The LOCO-I lossless image compression algorithm: Principles and standardization into JPEG-LS / M. J. Weinberger, G. Seroussi, G. Sapiro // *IEEE Transactions on Image processing*. – 2000. – Т. 9. – № 8. – С. 1309-1324.
224. Committee draft of JPEG XL image coding system / A. Rhatushnyak, J. Wassenberg, J. Sneyers [и др.] // *arXiv preprint arXiv:1908.03565*. – 2019.
225. GPU-accelerated DXT and JPEG compression schemes for low-latency network transmissions of HD, 2K, and 4K video / P. Holup, M. Šrom, M. Pulic [и др.] // *Future Generation Computer Systems*. – 2013. – Т. 29. – № 8. – С. 1991-2006.
226. Ultra-low-latency video transmissions for delay sensitive collaboration / S. Ubik, J. Halák, J. Melnikov, M. Kolbe // *2020 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*. – IEEE, 2020. – С. 1-4.
227. A high performance fully pipeline JPEG-LS encoder for lossless compression / B. S. Kim, S. Baek, D. S. Kim, D. J. Chung // *IEICE Electronics Express*. – 2013. – Т. 10. – № 12. – С. 20130348-20130348.
228. Kau, L. J. High performance architecture for the encoder of JPEG-LS on SOPC platform / L. J. Kau, S. W. Lin // *SiPS 2013 Proceedings*. – IEEE, 2013. – С. 141-146.
229. Scalable spatio-temporal parallel parameterizable stream-based JPEG-LS encoder / C. A. Carneiro, F. P. Garcia, H. C. Freitas [и др.] // *IEICE Electronics Express*. – 2017. – Т. 14. – № 2. – С. 20160950-20160950.
230. High-throughput architecture for both lossless and near-lossless compression modes of LOCO-I algorithm / L. Chen, L. Yan, H. Wang, T. Zhang // *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. – 2018. – Т. 29. – № 12. – С. 3754-3764.
231. Quality and error robustness assessment of low-latency lightweight intra-frame codecs for screen content compression / A. Willème, A. Descampe, S. Lugan, B. Macq // *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*. – 2016. – Т. 6. – № 4. – С. 471-483.

232. Borer T. White Paper WHP 238. The VC-2 low delay video codec / T. Borer. BBC Research & Development, 2013. – 34 с.
233. Walls, F. G. VESA display stream compression for television and cinema applications / F. G. Walls, A. S. MacInnis // IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems. – 2016. – Т. 6. – № 4. – С. 460-470.
234. Санкин, П. С. Особенности оценки содержимого сжатого видеопотока / П. С. Санкин, М. Ю. Литвинов // Информационно-управляющие системы. – 2009. – № 3(40). – С. 45-48.
235. Fan, L. Overview of AVS video standard . L. Fan, S. Ma, F. Wu // 2004 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME). – IEEE, 2004. – Т. 1. – С. 423-426.
236. Gao, W. An overview of AVS2 standard / W. Gao, S. Ma // Advanced Video Coding Systems. – 2015. – С. 35-49.
237. Recent development of AVS video coding standard: AVS3 / J. Zhang, C. Jia, M. Lei [и др.] // 2019 picture coding symposium (PCS). – IEEE, 2019. – С. 1-5.
238. HEVC complexity and implementation analysis / F. Bossen, B. Bross, K. Suhring, D. Flynn // IEEE Transactions on circuits and Systems for Video Technology. – 2012. – Т. 22. – № 12. – С. 1685-1696.
239. Comparative rate-distortion-complexity analysis of HEVC and AVC video codecs / J. Vanne, M. Viitanen, T. D. Hamalainen, A. Hallapuro // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2012. – Т. 22. – № 12. – С. 1885-1898.
240. Performance and computational complexity assessment of high-efficiency video encoders / G. Correa, P. Assuncao, L. Agostini, L. A. da Silva Cruz // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2012. – Т. 22. – № 12. – С. 1899-1909.
241. Comparative rate-distortion-complexity analysis of VVC and HEVC video codecs / A. Mercat, A. Mäkinen, J. Sainio [и др.] // IEEE Access. – 2021. – Т. 9. – С. 67813-67828.
242. Siqueira, Í. Rate-distortion and complexity comparison of HEVC and VVC video encoders / Í. Siqueira, G. Correa, M. Grellert // 2020 IEEE 11th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS). – IEEE, 2020. – С. 1-4.
243. Complexity analysis of next-generation VVC encoding and decoding / F. Pakdaman, M. A. Adelimanesh, M. Gabbouj, M. R. Hashemi // 2020 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). – IEEE, 2020. – С. 3134-3138.
244. Memory assessment of versatile video coding / A. Cerveira, L. Agostini, B. Zatt, F. Sampaio // 2020 IEEE international conference on image processing (ICIP). – IEEE, 2020. – С. 1186-1190.
245. García-Lucas, D. Rate-distortion/complexity analysis of HEVC, VVC and AV1 video codecs / D. García-Lucas, G. Cebrián-Márquez, P. Guenca // Multimedia Tools and Applications. – 2020. – Т. 79. – № 39. – С. 29621-29638.

246. Comparative evaluation of VVC, HEVC, H.264, AV1, and VP9 encoders for low-delay video applications / I. Mansri, N. Doghamane, N. Kouadria [и др.] // 2020 Fourth International Conference on Multimedia Computing, Networking and Applications (MCNA). – IEEE, 2020. – С. 38-43.
247. A comprehensive video codec comparison / T. Laude, Y. G. Adhisantoso, J. Voges [и др.] // APSIPA Transactions on Signal and Information Processing. – 2019. – Т. 8. – С. e30.
248. An overview of dedicated hardware designs for state-of-the-art AV1 and H. 266/VVC video codecs / M. Saldanha, M. Corrêa, G. Corrêa // 2020 27th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS). – IEEE, 2020. – С. 1-4.
249. Low-latency implementation of 360 panoramic video viewing system / J. S. Tu, K. S. Lin, C. L. Lin // 2017 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS). – IEEE, 2017. – С. 576-579.
250. A hardware-accelerated system for high resolution real-time screen sharing / S. Yang, B. Li, Y. Song [и др.] // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2018. – Т. 29. – № 3. – С. 881-891.
251. Salsify:Low-Latency network video through tighter integration between a video codec and a transport protocol / S. Fouladi, J. Emmons, E. Orbay [и др.] // 15th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 18). – 2018. – С. 267-282.
252. Low latency edge rendering scheme for interactive 360 degree virtual reality gaming / M. Viitanen, J. Vanne, T. D. Hämäläinen, A. Kulmala // 2018 IEEE 38th international conference on distributed computing systems (ICDCS). – IEEE, 2018. – С. 1557-1560.
253. : Open-source HEVC/H.265 encoder / M. Viitanen, A. Kulmala, A. Lemmetti [и др.] // Proceedings of the 24th ACM international conference on Multimedia. – 2016. – С. 1179-1182.
254. OpenHEVC 2017. – Github. – URL: <https://github.com/OpenHEVC/openHEVC> (Дата обращения: 24.04.2025).
255. Remote VR gaming on mobile devices / M. Pitkänen, M. Viitanen, A. Mercat, J. Vanne // Proceedings of the 27th ACM International Conference on Multimedia. – 2019. – С. 2191-2193.
256. A universal optical flow based real-time low-latency omnidirectional stereo video system / M. Tang, J. Wen, Y. Zhang [и др.] // IEEE Transactions on Multimedia. – 2018. – Т. 21. – № 4. – С. 957-972.
257. x265 HEVC encoder/H.265 video codec. 2020. – X265. – URL: <http://x265.org> (Дата обращения: 24.04.2025).
258. An effective CU size decision method for HEVC encoders / L. Shen, Z. Liu, X. Zhang [и др.] // IEEE transactions on multimedia. – 2012. – Т. 15. – № 2. – С. 465-470.

259. Shen, L. Adaptive inter-mode decision for HEVC jointly utilizing inter-level and spatiotemporal correlations / L. Shen, Z. Zhang, Z. Liu // *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. – 2014. – № 10. – С. 1709-1722.
260. Enhanced multicore–manycore interaction in high-performance video encoding / G. Grossi, P. Paglierani, F. Pedersini, A. Petrini // *Journal of Real-Time Image Processing*. – 2020. – Т. 17. – № 4. – С. 887-902.
261. Optimization of motion compensation based on GPU and CPU for VVC decoding / X. Han, S. Wang, S. Ma, W. Gao // *2020 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. – IEEE, 2020. – С. 1196-1200.
262. Takano, F. 4K-UHD real-time HEVC encoder with GPU accelerated motion estimation / F. Takano, H. Igarashi, T. Mariyoshi // *2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. – IEEE, 2017. – С. 2731-2735.
263. HEVC decoder analysis on ARM processor / L. A. Ayadi, T. Damak, H. Loukil [и др.] // *2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*. – IEEE, 2018. – С. 842-845.
264. Ayadi, L. A. Hardware-software implementation of HEVC decoder on Zynq / L. A. Ayadi, H. Loukil, N. Masmoudi // *Multimedia Tools and Applications*. – 2020. – Т. 79. – С. 7685-7703.
265. Recent advances on HEVC inter-frame coding: From optimization to implementation and beyond / Y. Zhang, C. Zhang, R. Fan [и др.] // *IEEE transactions on circuits and systems for video technology*. – 2019. – Т. 30. – № 11. – С. 4321-4339.
266. A CNN-based fast inter coding method for VVC / Z. Pan, P. Zhang, B. Peng [и др.] // *IEEE Signal Processing Letters*. – 2021. – Т. 28. – С. 1260-1264.
267. Доан, Т. Б. Быстрый алгоритм оценки движения в видеокодеке стандарта HEVC / Т. Б. Доан, А. А. Тропченко // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2020. – Т. 20. – № 6. – С. 802-806.
268. Бан, Д. Т. Гибридный алгоритм для быстрой оценки движения в стандарте H.265/HEVC / Д. Т. Бан, А. А. Тропченко // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. – 2020. – Т. 63. – № 1. – С. 18-25.
269. Нгуен, В. Ч. Иерархический адаптивный алгоритм шаблонного поиска для оценки движения при анализе видеопоследовательности / В. Ч. Нгуен, А. А. Тропченко // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2016. – Т. 16. – № 3. – С. 474-481.
270. Нгуен, В. Ч. Быстрый алгоритм поиска по тестовой зоне для межкадрового кодирования / В. Ч. Нгуен, А. А. Тропченко // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2017. – Т. 17. – № 3. – С. 483-489.

271. Калистратов, Д. С. Видеокодирование. Способы компенсации движения в цифровых динамических видеоизображениях / Д. С. Калистратов. – Новосибирск : Общество с ограниченной ответственностью "Центр развития научного сотрудничества", 2014. – 96 с.
272. Баранник, В. В. Метод компрессии видеопотока на основе полиадического кодирования предсказываемых кадров / В. В. Баранник, Н. А. Харченко, В. Н. Кривонос // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2013. – № 163. – С. 47-52.
273. Веселов, А. И. Алгоритм оптимизации векторного поля в задаче временной интерполяции кадров / А. И. Веселов, М. Р. Гильмутдинов // Информационно-управляющие системы. – 2014. – № 4(71). – С. 33-41.
274. High-throughput HW-SW implementation for MV-HEVC decoder / W. Liu, W. Li, P. S. Un, Y. B. Cho // 2018 International SoC Design Conference (ISOCC). – IEEE, 2018. – С. 226-228.
275. Highly parallel HEVC decoding for heterogeneous systems with CPU and GPU / B. Wang, D. F. de Souza, M. Alvarez-Mesa [и др.] // Signal Processing: Image Communication. – 2018. – Т. 62. – С. 93-105.
276. Enhanced multicore–manycore interaction in high-performance video encoding / G. Grossi, P. Paglierani, F. Pedersini, A. Petrini // Journal of Real-Time Image Processing. – 2020. – Т. 17. – № 4. – С. 887-902.
277. A real-time multi-view AVS2 decoder on mobile phone / Y. Zhang, Z. Lin, W. Feng [и др.] // Advances in Multimedia Information Processing–PCM 2017: 18th Pacific-Rim Conference on Multimedia, Harbin, China, September 28-29, 2017, Revised Selected Papers, Part I 18. – Springer International Publishing, 2018. – С. 89-95.
278. Highly paralleled low-cost embedded HEVC video encoder on TI KeyStone multicore DSP / H. Jiang, R. Fan, Y. Zhang [и др.] // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2018. – Т. 29. – № 4. – С. 1163-1178.
279. A 0.76 mm² 0.22 nJ/pixel DL-assisted 4K video encoder LSI for quality-of-experience over smartphones / T. M. Liu, C. H. Tsai, T. H. Wu [и др.] // IEEE Solid-State Circuits Letters. – 2019. – Т. 1. – № 12. – С. 221-224.
280. Huang, H. Encoding shaky videos by integrating efficient video stabilization / H. Huang, X. X. Wei, L. Zhang // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2018. – Т. 29. – № 5. – С. 1503-1514.
281. Efficient implementation of HEVC decoder on Zynq SoC platform / L. A. Ayadi, H. Loukil, M. A. B. Ayed, N. Masmoudi // 2018 4th International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP). – IEEE, 2018. – С. 1-5.

282. uAVS3d: Fast decoder for the 3rd generation audio video coding standard (AVS3) / Z. Wang, B. Han, R. Wang [и др.] // Proceedings of the 2020 4th International Conference on Digital Signal Processing. – 2020. – С. 51-55.
283. Towards a live software decoder implementation for the upcoming versatile video coding (VVC) codec / A. Wieckowski, G. Hege, C. Bartnik [и др.] // 2020 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). – IEEE, 2020. – С. 3124-3128.
284. Gudumasu, S. Software-based versatile video coding decoder parallelization / S. Gudumasu, S. Bandyopadhyay, Y. He // Proceedings of the 11th ACM Multimedia Systems Conference. – 2020. – С. 202-212.
285. A real-time H.266/VVC software decoder / B. Zhu, S. Liu, Y. Liu [и др.] // 2021 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME). – IEEE, 2021. – С. 1-6.
286. Cho, S. Fast CU splitting and pruning for suboptimal CU partitioning in HEVC intra coding / S. Cho, M. Kim // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2013. – Т. 23. – № 9. – С. 1555-1564.
287. Zhang, H. Fast intra mode decision for high efficiency video coding (HEVC) / H. Zhang, Z. Ma // IEEE Transactions on circuits and systems for video technology. – 2013. – Т. 24. – № 4. – С. 660-668.
288. Low-complexity CTU partition structure decision and fast intra mode decision for versatile video coding / H. Yang, L. Shen, X. Dong [и др.] // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2019. – Т. 30. – № 6. – С. 1668-1682.
289. Look-ahead prediction based coding unit size pruning for VVC intra coding / M. Lei, F. Luo, X. Zhang [и др.] // 2019 IEEE International conference on image processing (ICIP). – IEEE, 2019. – С. 4120-4124.
290. Fast intra mode decision algorithm for versatile video coding / X. Dong, L. Shen, M. Yu, H. Yang // IEEE Transactions on Multimedia. – 2021. – Т. 24. – С. 400-414.
291. Early intra CU size decision for versatile video coding based on a tunable decision model / Y. Li, G. Yang, Y. Song [и др.] // IEEE transaction on broadcasting. – 2021. – Т. 67. – № 3. – С. 710-720.
292. DeepQTMT: A deep learning approach for fast QTMT-based CU partition of intra-mode VVC / T. Li, M. Xu, R. Tang [и др.] // IEEE Transactions on Image Processing. – 2021. – Т. 30. – С. 5377-5390.
293. Бан, Д. Т. Быстрый алгоритм внутрикадрового кодирования для HEVC на основе вероятности выбора режима / Д. Т. Бан, А. А. Тропченко // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2020. – Т. 20. – № 1. – С. 74-81.

294. Нгуен, В. Ч. Повышение эффективности метода кодирования внутрикадровым предсказанием в стандарте H.265/HEVC / В. Ч. Нгуен, А. А. Тропченко, Т. Б. Доан // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2018. – Т. 18. – № 2. – С. 255-261.
295. Пономарев, О. Г. Критерий для быстрого выбора размера блока пространственного предсказания в системе видеокодирования HEVC / О. Г. Пономарев, М. П. Шарабайко, Д. Ю. Те Д Ю // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 3(37). – С. 106-113.
296. Баранник, В. В. Метод снижения интенсивности видеопотока в инфокоммуникационных системах / В. В. Баранник, А. В. Хаханова // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2014. – № 167. – С. 23-27.
297. Баранник, В. В. Метод верификации кодека вектора кортежей в систему компрессии базовых кадров видеопотока в инфокоммуникациях / В. В. Баранник, С. В. Туренко // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2013. – № 165. – С. 123-128.
298. Рубина, И. С. Метод сжатия видеопоследовательностей на основе внутрикадрового предсказания яркости пикселей / И. С. Рубина // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2015. – Т. 58. – № 7. – С. 520-526.
299. Пономарев, О. Г. Выбор инструментов кодирования стандарта H.265/HEVC для аппаратной реализации системы сжатия ключевых видеокадров / О. Г. Пономарев, С. Е. Стрельников, М. П. Шарабайко // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 4(34). – С. 65-71.
300. Pastuszak, G. Algorithm and architecture design of the H.265/HEVC intra encoder / G. Pastuszak, A. Abramowski // IEEE Transactions on circuits and systems for video technology. – 2015. – Т. 26. – № 1. – С. 210-222.
301. FPGA-powered 4K120p HEVC intra encoder / P. Sjövall, V. Viitamäki, J. Vanne // 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). – IEEE, 2018. – С. 1-5.
302. Zhang, Y. Efficient algorithm adaptations and fully parallel hardware architecture of H.265/HEVC intra encoder / Y. Zhang, C. Lu // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2018. – Т. 29. – № 11. – С. 3415-3429.
303. Real-time H.265/HEVC intra encoding with a configurable architecture on FPGA platform / D. Ding, S. Wang, Z. Liu // Chinese Journal of Electronics. – 2019. – Т. 28. – № 5. – С. 1008-1017.
304. Pastuszak G. Generative multi-symbol architecture of the binary arithmetic coder for UHDTV video encoders // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2019. – Т. 67. – № 3. – С. 891-902.

305. Pastuszak G. Multisymbol architecture of the entropy coder for H.265/HEVC video encoders / G. Pastuszak // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. – 2020. – Т. 28. – № 12. – С. 2573-2583.
306. Field programmable gate array implementation of variable-bins high efficiency video coding CABAC decoder with path delay optimization / W. Menasri, A. Skoudarli, A. Belhadj, M. S. Azzaz // IET Image Processing. – 2019. – Т. 13. – № 6. – С. 954-963.
307. Баранник, В. В. Методология оценки задержки на обработку базовых кадров видеопотока для инфокоммуникационных технологий / В. В. Баранник, С. Ю. Стасев, А. П. Мусиенко // Радиоэлектроника и информатика. – 2014. – № 4. – С. 15-19.
308. Кулица, О. С. Методология устранения избыточности в технологиях компрессии с контролируемой потерей качества / О. С. Кулица // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2013. – № 162. – С. 55-58.
309. Баранник, Д. В. Обоснование подхода для формирования квантованного описания трансформанты сегмента аэрофотоснимка / Д. В. Баранник, С. Ю. Стасев, Д. О. Медведев // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2015. – № 173. – С. 63-67.
310. Ван, Ч. Н. Повышение эффективности сжатия данных с помощью иерархического перечислительного кодирования / Ч. Н. Ван, А. А. Тропченко // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2016. – Т. 59. – № 12. – С. 991-996.
311. Хаханов, В. И. Сжатие видеоданных на основе кодирования трансформант / В. И. Хаханов, В. В. Баранник, И. В. Хаханова // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2007. – № 138. – С. 18-23.
312. Баранник, В. В. Технология кодирования трансформант для доставки видеопотока в инфокоммуникациях / В. В. Баранник, А. А. Красноручский // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2013. – № 165. – С. 92-97.
313. Беляев, Е. А. Сжатие видеоинформации на основе трехмерного дискретного псевдо-косинусного преобразования для энергоэффективных систем видеонаблюдения / Е. А. Беляев, Т. М. Сухов, Н. Н. Шостацкий // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34. – № 2. – С. 260-271.
314. Хасан, Я. А. Адаптивное трехмерное косинусное преобразование транспортных сюжетов / Я. А. Хасан, Ш. С. Фахми // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2019. – Т. 19. – № 3. – С. 482-491.
315. Принцип сжатия изображений на основе дискретного вейвлет-преобразования / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, Д. И. Калита, К. С. Шульженко // Наука. Инновации. Технологии. – 2016. – № 3. – С. 97-118.

316. Земцов, А. Н. Сравнительный анализ эффективности методов сжатия изображений на основе дискретного косинусного преобразования и фрактального кодирования / А. Н. Земцов // Прикладная информатика. – 2011. – № 4(34). – С. 90-104.
317. Deep learning-based video coding: A review and a case study / D. Liu, Y. Li, J. Lin [и др.] // ACM Computing Surveys (CSUR). – 2020. – Т. 53. – № 1. – С. 1-35.
318. Hoang, T. M. Recent trending on learning based video compression: A survey / T. M. Hoang, J. Zhou // Cognitive Robotics. – 2021. – Т. 1. – С. 145-158.
319. Learned image coding for machines: A content-adaptive approach / N. Le, H. Zhang, F. Cricri [и др.] // 2021 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME). – IEEE, 2021. – С. 1-6.
320. Overview of the MPEG-CDVS standard / L. Y. Duan, V. Chandrasekhar, J. Chen [и др.] // IEEE Transactions on Image Processing. – 2015. – Т. 25. – № 1. – С. 179-194.
321. Compact descriptors for video analysis: The emerging MPEG standard / L. Y. Duan, Y. Lou, Y. Bai [и др.] // IEEE Multimedia. – 2018. – Т. 26. – № 2. – С. 44-54.
322. Fast MPEG-CDVS encoder with GPU-CPU hybrid computing / L. Y. Duan, W. Sun, X. Zhang [и др.] // IEEE Transactions on Image Processing. – 2018. – Т. 27. – № 5. – С. 2201-2216.
323. Garbo, A. A fast MPEG's CDVS implementation for GPU featured in mobile devices / A. Garbo, S. Quer // IEEE Access. – 2018. – Т. 6. – С. 52027-52046.
324. Image coding for machines: an end-to-end learned approach / N. Le, H. Zhang, F. Cricri [и др.] // ICASSP 2021-2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – IEEE, 2021. – С. 1590-1594.
325. Semantic-preserving image compression / N. Patwa, N. Ahuja, S. Somayazulu [и др.] // 2020 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). – IEEE, 2020. – С. 1281-1285.
326. Eshratifar, A. E. BottleNet: A deep learning architecture for intelligent mobile cloud computing services / A. E. Eshratifar, A. Esmaili, M. Pedram // 2019 IEEE/ACM International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED). – IEEE, 2019. – С. 1-6.
327. Lossy compression for embedded computer vision systems / L. Guo, D. Zhou, J. Zhou // IEEE Access. – 2018. – Т. 6. – С. 39385-39397.
328. High throughput image codec for high-resolution satellite images / C. de Cea-Dominguez, P. Enfedaque, J. C. Moure [и др.] // IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – IEEE, 2018. – С. 6524-6527.
329. The next generation of in-home streaming: Light fields, 5K, 10 GbE, and foveated compression / D. Pohl, D. Jungmann, B. Taudul [и др.] // 2017 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS). – IEEE, 2017. – С. 663-667.

330. A lightweight H.264-based hardware accelerated image compression library / J. Jiang, T. Fogal, C. Woolley, P. Messmer // 2016 IEEE 6th Symposium on Large Data Analysis and Visualization (LDAV). – IEEE, 2016. – С. 99-100.
331. Mody, M. Ultra-low latency video codec for video conferencing / M. Mody, P. Swami, P. Shastry // 2014 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT). – IEEE, 2014. – С. 1-5.
332. Decoding JPEG XS on a GPU / V. Bruns, T. Richter, B. Ahmed [и др.] // 2018 Picture Coding Symposium (PCS). – IEEE, 2018. – С. 111-115.
333. A 120 FPS high frame rate real-time HEVC video encoder with parallel configuration scalable to 4K / Y. Omori, T. Onishi, H. Iwasaki, A. Shimizu // IEEE Transactions on Multi-Scale Computing Systems. – 2018. – Т. 4. – № 4. – С. 491-499.
334. Live demonstration: 4K100p HEVC intra encoder / V. Viitamäki, P. Sjövall, J. Vanne [и др.] // 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). – IEEE, 2018. – С. 1-1.
335. A real-time H. 266/VVC software decoder / B. Zhu, S. Liu, Y. Liu [и др.] // 2021 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME). – IEEE Computer Society, 2021. – С. 1-6.
336. TexNN: Fast texture encoding using neural networks / S. Pratapa, T. Olson, A. Chalfin, D. Manocha // Computer Graphics Forum. – 2019. – Т. 38. – № 1. – С. 328-339.
337. Лихтциндер, Б. Я. Беспроводные сенсорные сети : Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки 11.03.02 и 11.04.02 - "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" квалификации (степени) бакалавр, магистр / Б. Я. Лихтциндер, Р. В. Киричек, Е. Д. Федотов [и др.]. – Москва : Научно-техническое издательство "Горячая линия-Телеком", 2020. – 236 с.
338. Каграманов, Э. Э. Способ предотвращения радиопомех в системе связи беспилотных летательных аппаратов / Э. Э. Каграманов, С. С. Иванова, В. С. Карташов // Радиотехника. – 2024. – Т. 88. – № 7. – С. 11-15.
339. Jia, Y. An UAV wireless communication noise suppression method based on OFDM modulation and demodulation / Y. Jia, X. Tu, W. Yan // Radio Science. – 2020. – Т. 55. – № 2. – С. 1-14.
340. UAV-based physical-layer intelligent technologies for 5G-enabled internet of things: A survey / C. Wang, W. Yu, J. Lu // Wireless Communications and Mobile Computing. – 2022. – Т. 2022. – № 1. – С. 4351518.

341. Sangeetha Francelin, V. F. Intelligent agent and optimization-based deep residual network to secure communication in UAV network / V. F. Sangeetha Francelin, J. Daniel, S. Velliangiri // International journal of intelligent systems. – 2022. – Т. 37. – № 9. – С. 5508-5529.
342. Shehzad, M. K. Performance of mmWave UAV-assisted 5G hybrid heterogeneous networks / M. K. Shehzad, M. W. Akhtar, S. A. Hassan // Autonomous Airborne Wireless Networks. – 2021. – С. 97-118.
343. Guo, Z. A decision for 5G-UAV to maximize the throughput of emergency indoor-outdoor communication / Z. Guo, X. Liu, J. Cui // Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. – 2021. – Т. 32. – № 12. – С. e4357.
344. Optimization strategy of UAV-ARIS assisted vehicular communication system / H. Zhao, Z. Xu, Y. Ni [и др.] // IET Communications. – 2024. – Т. 18. – № 18. – С. 1179-1190.
345. Joint optimization of UAV position and user grouping for UAV-assisted hybrid NOMA systems / Y. Sun, Z. Dong, L. Yang [и др.] // Computational intelligence. – 2024. – Т. 40. – № 1. – С. e12625.
346. Non-terrestrial network architecture and 3GPP / G. Masini, P. Reininger, M. El Jaafari [и др.] // International Journal of Satellite Communications and Networking. – 2023. – Т. 41. – № 3. – С. 249-261.
347. Киричек, Р. В. Разработка и исследование комплекса моделей и методов для летающих сенсорных сетей : специальность 05.12.13 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» : диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук / Киричек Руслан Валентинович. – 2018. – 316 с.
348. Joint HAP deployment and resource allocation for HAP-UAV-terrestrial integrated networks / A. Ji, X. Guo, R. Zhang [и др.] // IET Communications. – 2023. – Т. 17. – № 1. – С. 86-97.
349. Azadur, R. M. Multi-UAV path planning utilizing the PGA algorithm for terrestrial IoT sensor network under ISAC framework / R. M. Azadur, C. J. Pawase, K. Chang // Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. – 2024. – Т. 35. – № 1. – С. e4916.
350. Ilnytska, S. Modeling of UAV/RPAS data traffic in space, air, and ground networks / S. Ilnytska, A. Grekhov, V. Kondratiuk // Journal of Field Robotics. – 2022. – Т. 39. – № 1. – С. 5-13.
351. A novel scheme of cross-network radio resources scheduling in SAGN based on unified resources mapping and genetic algorithm / Z. Li, F. Yang, W. Lin [и др.] // International Journal of Communication Systems. – 2021. – Т. 34. – № 11. – С. e4844.
352. Edge computing collaborative offloading strategy for space-air-ground integrated networks / B. Xiang, B. Zhong, A. Wang [и др.] // Concurrency and Computation: Practice and Experience. – 2024. – Т. 36. – № 21. – С. e8214.

353. Спутниковая связь от А до ... Задержка как главная проблема спутниковой связи [Электронный ресурс]. – MobileReview. – URL: <https://mobile-review.com/all/articles/misc/sputnikovaya-svyaz-ot-a-do-zaderzhka-kak-glavnaya-problema-sputnikovoj-svyazi/> (дата обращения: 04.09.2025).
354. LTE [Электронный ресурс]. – Банковско-финансовая телесеть. – URL: <https://www.bfn.by/spravochnik/lte/> (дата обращения: 04.09.2025).
355. Кучерявый, А.Е. Сети связи общего пользования / А.Е. Кучерявый, А.И. Парамонов, Е.А. Кучерявый. – 2008. – 290 с.
356. Горбачева, Л. С. Исследование характеристик трафика и качества обслуживания для роботов-манипуляторов в сетях связи с ультрамалыми задержками: дисс. ... канд. технических наук : 2.2.15 / Горбачева Любовь Сергеевна. – СПбГУТ, Санкт-Петербург, 2023. – 143 с.
357. Модельная сеть для исследований и обучения в области услуг телеприсутствия / А. Е. Кучерявый, М. А. Маколкина, А. И. Парамонов [и др.] // Электросвязь. – 2022. – № 1. – С. 14-20.
358. Кучерявый, А. Е. Тактильный интернет / А. Е. Кучерявый, М. А. Маколкина, Р. В. Киричек // Сети и линии связи: прошлое, настоящее, будущее : Материалы Девятых научных чтений памяти А.С. Попова, посвященных Дню радио - празднику работников всех отраслей связи, Санкт-Петербург, 06 мая 2016 года. – Санкт-Петербург: Свое издательство, 2016. – С. 142-146.
359. González, N. A quality of experience model for live video in first-person-view drone control in cellular networks / N. González, M. Solera, F. Ruiz, C. Gijón, M. Toril // Computer Networks. – 2023. – Т. 237. – С. 110089.
360. Fettweis, G. P. The tactile internet: Applications and challenges / G. P. Fettweis // IEEE vehicular technology magazine. – 2014. – Т. 9. – № 1. – С. 64-70.
361. Ultra-low delay for all: Live experience, live analysis / O. Bondarenko, K. De Schepper, I.-J. Tsang [и др.] // Proceedings of the 7th International Conference on Multimedia Systems. – 2016. – С. 1-4.
362. Reducing internet latency: A survey of techniques and their merits / B. Briscoe, A. Brunstrom, A. Putlund [и др.] // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2014. – Т. 18. – № 3. – С. 2149-2196.
363. How low should we go? Understanding the perception of latency while inking / M. Annett, A. Ng, P. Dietz [и др.] // Graphics Interface 2014. – AK Peters/CRC Press, 2020. – С. 167-174.

364. How fast is fast enough? A study of the effects of latency in direct-touch pointing tasks / R. Jota, A. Ng, P. Dietz, D. Wigdor // *Proceedings of the Sigchi Conference on Human Factors in Computing Systems*. – 2013. – С. 2291-2300.
365. Perceptual sensitivity to head tracking latency in virtual environments with varying degrees of scene complexity / K. Mania, B. D. Adelstein, S. R. Ellis, M. I. Hill // *Proceedings of the 1st Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*. – 2004. – С. 39-47.
366. Santa-Cruz, D. An analytical study of JPEG 2000 functionalities / D. Santa-Cruz, T. Ebrahimi // *Proceedings 2000 International Conference on Image Processing*. – IEEE, 2000. – Т. 2. – С. 49-52.
367. Обухова, А. Н. Методы видеонаблюдения, сегментации и сопровождения движущихся объектов : специальность 05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения» диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук / Обухова Наталия Алексеевна ; ГУАП, 2008. – 479 с.
368. Al Najjar, Y. Comparative analysis of image quality assessment metrics: MSE, PSNR, SSIM and FSIM / Y. Al Najjar // *International Journal of Science and Research (IJSR)*. – 2024. – Т. 13. – № 3. – С. 110-114.
369. Маколкина, М. А. Разработка и исследование моделей оценки качества передачи видео в IP-сетях : специальность 05.12.13 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» : диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук / Маколкина Мария Александровна ; СПбГУТ. – Санкт-Петербург, 2014. – 187 с.
370. Lahitani, A. R. Cosine similarity to determine similarity measure: Study case in online essay assessment / A. R. Lahitani, A. E. Permanasari, N. A. Satiawan // *2016 4th International conference on cyber and IT service management*. – IEEE, 2016. – С. 1-6.
371. Маколкина, М. А. Исследование взаимосвязи субъективных оценок качества восприятия видео и параметра Хёрста / М. А. Маколкина, Е. В. Суродеева // *Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2016) : материалы Девятнадцатой международной научной конференции: в 3 томах, Москва, 21–25 ноября 2016 года* / Под общей редакцией В. М. Вишневого и К. Е. Самуйлова. Том 3. – Москва: Российский университет дружбы народов (РУДН), 2016. – С. 326-333.
372. Toward a practical erceptual video quality metric / Z. Li, A. Aaron, I. Katsavounidis [и др.] // *Netflix Technology Blod*. – URL: <https://netflixtechblog.com/toward-a-practical-perceptual-video-quality-metric-653f208b9652> (дата обращения:23.03.2026).
373. The unreasonable effectiveness of deep features as a perceptual metric / R. Zhang, P. Isola, A. A. Efros, E. Schechelman [и др.] // *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2018. С. 586-595.

374. Image quality assessment: Unifying structure and texture similarity / K. Ding, K. Ma, S. Wang, E. P. Simoncelli // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2020. – Т. 44. – №. 5. – С. 2567-2581.
375. Повышение качества передаваемой видеоинформации при кодировании источника / А. К. Цыцулин, Ш. С. Фахми, И. А. Зубакин [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2018. – №. 3. – С. 66-71.
376. Вивчарь, Р. М. Методика многокритериального оценивания эффективности функционирования стохастических сложных технических систем / Р. М. Вивчарь, А. И. Птушкин, Б. В. Соколов // Авиакосмическое приборостроение. – 2022. – № 7. – С. 3-14.
377. Имитационное моделирование функционирования системы эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры как инструмент обоснования параметров технического обслуживания / Р. М. Вивчарь, Е. Н. Есипов, А. С. Кокарев, Д. В. Решетников // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. – 2023. – № 688. – С. 87-98.
378. Поршневу, С. В. Использование аппроксимации Розенблатта-Парзена для восстановления функции распределения непрерывной случайной величины с ограниченным одномодальным законом распределения / С. В. Поршневу, А. С. Копосов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 92. – С. 1-27.
379. Bowman, A. W. Cross-validation in nonparametric estimation of probabilities and probability densities / A. W. Bowman, P. Hall, D. M. Titterington // Biometrika. – 1984. – Т. 71. – № 2. – С. 341-351.
380. Silverman, B. W. Density estimation for statistics and data analysis. – London: Chapman & Hall/CRC. – 1986. – 22 с.
381. Sturges, H. A. The choice of a class interval / H. A. Sturges // Journal of the American Statistical Association. – 1926. – Т. 21. – № 153. – С. 65-66.
382. Вивчарь, Р. М. Методика оценивания адекватности статистических имитационных моделей / Р. М. Вивчарь, А. И. Птушкин, Б. В. Соколов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. – 2023. – Т. 15. – № 3. – С. 5-14.
383. Мадебейкин, А. А. Вычисление интегралов по методу Монте-Карло / А. А. Мадебейкин, А. А. Суханов // E-Scio. – 2022. – № 6(69). – С. 553-565.
384. 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.

385. Владимиров, С. С. Механизм компенсации задержек для приложений тактильного интернета / С. С. Владимиров, А. Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2018. – № 3. – С. 62-67.
386. Karakaş, M. Determination of network delay distribution over the internet : дисс. ... магистра / Mehmet Karakaş. – Middle East Technical University, 2003. – 93 с.
387. 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.
388. Исследование задержки кадров видеопотока в канале информационного обмена наземного сегмента гибридной сети связи при FPV-управлении / А. А. Березкин, Р. М. Вивчарь, А. А. Ченский, Р. В. Киричек // Труды учебных заведений связи. – 2025. – Т. 11. – № 1. – С. 7-17.
389. Gupta, A. K. Handbook of beta distribution and its applications / A. K. Gupta, S. Nadarajah. – CRC press, 2004. – 600 с.
390. 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.
391. 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.
392. Jamalipour, A. Low earth orbital satellites for personal communication networks / A. Jamalipour. – Artech House, Inc., 1997. – 273 с.
393. Inter-satellite link channel characterization of laser communication systems / Z. Xia, Y. Lin, C. Hu, X. Bu // 2023 IEEE 11th International Conference on Information, Communication and Networks (ICICN). – IEEE, 2023. – С. 426-431.
394. Dong, C. Design of a data distribution system for high Earth orbit satellites / C. Dong, X. Li // 2024 8th International Conference on Electrical, Mechanical and Computer Engineering (ICEMCE). – IEEE, 2024. – С. 1615-1619.
395. Roberts L. D. A lost connection: Geostationary satellite networks and the international telecommunication union / L. D. Roberts // Berkeley Tech. LJ. – 2000. – Т. 15. – 1095 с.
396. Гриценко, А. А. Спутниковые системы класса HTS / А. А. Гриценко // Connect. – 2017. – № 4. – С. 120-126.

397. 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.
398. Исследование задержки кадров видеопотока в канале информационного обмена космического сегмента гибридной сети связи при FPV-управлении БВС / А. А. Березкин, Р. М. Вивчарь, А. А. Ченский, Р. В. Киричек // Труды учебных заведений связи. – 2025. – Т. 11. – № 5. – С. 60-73.
399. Методы интерполяции и контроля интенсивности FPV-видеопотока / А. А. Березкин, Р. В. Киричек, З. В. Кулунчаков, А. А. Ченский // Экономика и качество систем связи. – 2025. – № 2(36). – С. 92-107.
400. Бардасов, С. А. Эконометрика: учебное пособие. 2-е издание, переработанное и дополненное / С. А. Бардасов. – Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2010. – 264 с.
401. Березкин, А. А. Простые динамические модели предсказания времени работы вариационных автокодировщиков / А. А. Березкин, А. А. Ченский // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. – 2025. – № 1(80). – С. 124-127.
402. Shewhart, W. A. Economic control of quality of manufactured product / W. A. Shewhart. – D. Van Nostrand Company, Inc., 1931. – 467 с.
403. Березкин, А. А. Применение контрольных карт Шухарта для статистического управления стохастическим процессом изменения интенсивности видеопотока / А. А. Березкин, Р. В. Киричек // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. В процессе публикации.
404. Burr, D. Visual processing of motion / D. Burr, J. Ross // Trends in Neurosciences. – 1986. – Т. 9. – С. 304-307.
405. Perceptual quality assessment of high frame rate video / R. M. Nasiri, J. Wang, A. Rehman [и др.] // 2015 IEEE 17th International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP). – IEEE, 2015. – С. 1-6.
406. Амосов, А. А. Вычислительные методы. 5 издание, стереотипное. / А. А. Амосов, Ю. А. Дубинский, Н. В. Копченова. – Санкт-Петербург : Издательство Лань, 2023. – 672 с.
407. A comparative analysis of diffusion-based super-resolution techniques in a video stream compression system in FPV control of unmanned systems / А. А. Berezkin, H. Do Phuc, D. Le. Tran, R. V. Kirichek // Труды Научно-исследовательского института радио. – 2023. – № 3-4. – С. 26-39.
408. Березкин, А. А. Сравнительный анализ методов сверхразрешения в системе сжатия видеопотока при FPV управлении беспилотными системами / А. А. Березкин, А. И. Козлова,

- Н. А. Облаков // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. – 2024. – № 1(79). – С. 166-169.
409. High-resolution image synthesis with latent diffusion models R. Rombach, A. Blattmann, D. Lorenz [и др.] // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – 2022. – С. 10684-10695.
410. NTIRE 2023 challenge on image super-resolution (x4): Methods and results / Y. Zhang, K. Zhang, Z. Chen [и др.] // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – 2023. – С. 1865-1884.
411. Deep learning methods in real-time image super-resolution: a survey / X. Li, Y. Wu, W. Zhang [и др.] // Journal of Real-Time Image Processing. – 2020. – Т. 17. – № 6. – С. 1885-1909.
412. Александров, А. В. Системы видеоконференцсвязи в корпоративной телекоммуникационной сети / А. В. Александров, Б. С. Гольдштейн, Н. А. Соколов // Вестник связи. – 2021. – №. 1. – С. 26-30.
413. Variational autoencoder for low bit-rate image compression / L. Zhou, C. Cai, Y. Gao [и др.] // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition workshops. – 2018. – С. 2617-2620.
414. Medical image compression based on variational autoencoder / X. Liu, L. Zhang, Z. Guo [и др.] // Mathematical Problems in Engineering. – 2022. – Т. 2022. – №. 1. – С. 7088137.
415. Xiao, P. A variational autoencoder-based method for heterogeneous broadcast television media compression and high-fidelity image reconstruction / P. Xiao // Proceedings of the 10th International Conference on Cyber Security and Information Engineering. – 2025. – С. 289-298.
416. Zhang, Y. QARV++: An improved hierarchical VAE for learned image compression / Y. Zhang, Y. Huang, F. Zhu // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2026.
417. Image compression by self-organized Kohonen map / C. Amerijckx, M. Verleysen, P. Thissen, J. D. Legat // IEEE Transactions on neural networks. – 1998. – Т. 9. – №. 3. – С. 503-507.
418. Pei, S. C. Color image compression and limited display using self-organization Kohonen map / S. C. Pei, Y. S. Lo // IEEE Transactions on circuits and systems for video technology. – 1998. – Т. 8. – №. 2. – С. 191-205.
419. Boya, B. F. B. A. Hopfield Neural Network Encryption Scheme for Medical Images / B.F.B.A. Boya, L.K. Babenko // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2025. – С. 395-408.
420. Novel compressive sensing image encryption using the dynamics of an adjustable gradient Hopfield neural network / S. D. Isaac, Z. T. Njitacke, N. Tsafack [и др.] // The European Physical Journal Special Topics. – 2022. – Т. 231. – №. 10. – С. 1995-2016.

421. Pan, Z. Extreme generative image compression by learning text embedding from diffusion models / Z. Pan, X. Zhou, H. Tian // arXiv preprint arXiv:2211.07793. – 2022.
422. Lossy image compression with foundation diffusion models / L. Relic, R. Azevedo, M. Gross, C. Schroers // European Conference on Computer Vision. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. – С. 303-319.
423. Yang, R. Lossy image compression with conditional diffusion models / R. Yang, S. Mandt // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2023. – Т. 36. – С. 64971-64995.
424. Метод сжатия видеопотока при управлении беспилотными системами в гибридных орбитально-наземных сетях связи / А. А. Березкин, Р. М. Вивчарь, А. В. Слепнев [и др.] // Электросвязь. – 2023. – № 10. – С. 48-56.
425. 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.
426. Stable Diffusion Online. – URL: <https://stablediffusionweb.com/> (дата обращения: 04.01.2023).
427. Ho, J. Denoising diffusion probabilistic models / J. Ho, A. Jain, P. Abbeel // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2020. – Т. 33. – С. 6840-6851.
428. Welling, M. Bayesian learning via stochastic gradient Langevin dynamics / M. Welling, Y. W. Teh // Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning (ICML-11). – 2011. – С. 681-688.
429. Deep unsupervised learning using nonequilibrium thermodynamics / J. Sohl-Dickstein, E. Weiss, N. Maheswaranathan, S. Ganguli // International conference on machine learning. – PMLR, 2015. – С. 2256-2265.
430. Welch, T. A. A technique for high-performance data compression / T. A. Welch // Computer. – 1984. – Т. 17. – № 06. – С. 8-19.
431. Efficient data coding methods based on neural networks / A. Slepnev, A. Berezkin, D. Kukunin, R. Kirichek // Proceedings of the XXV International Conference Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications (DCCN-2022). – 2022. – С. 421-426.
432. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М.: Физматгиз, 1969. – 552 с.
433. 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. 10-16.

434. Березкин, А. А. Маскирование кодированного FPV видеопотока при управлении БПЛА. Часть I. Модели и методика / А. А. Березкин, А. А. Ченский, Р. В. Киричек // Электросвязь. – 2024. – № 12-2. – С. 32-45.
435. 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.
436. 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.
437. 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.
438. 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.
439. 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.
440. Real-time neural video compression with unified intra and inter coding / H. Xiang, Y. Bian, Y. Li [и др.] // arXiv preprint arXiv:2510.14431. – 2025.
441. Li, J. Neural video compression with feature modulation / J. Li, B. Li, Y. Lu // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2024. – С. 26099-26108.
442. Березкин А. А. Перспективные технологии сжатия кадров видеопотока при управлении от первого лица / А. А. Березкин // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. В процессе публикации.
443. Minnen, D. Joint autoregressive and hierarchical priors for learned image compression / D. Minnen, J. Ballé, G. D. Toderici // Advances in neural information processing systems. – 2018. – Т. 31.
444. Duda, J. Asymmetric numeral systems: entropy coding combining speed of Huffman coding with compression rate of arithmetic coding / J. Duda // arXiv preprint arXiv:1311.2540. – 2013.

445. 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.
446. 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.
447. Shi, Z. A color-to-gray conversion based on visual feature extraction of JND / Z. Shi, Y. Wan // 2016 International Conference on Progress in Informatics and Computing (PIC). – IEEE, 2016. – С. 345-349.
448. Alrubaie, S. A. H. Dynamic weights equations for converting grayscale image to RGB image / S. A. H. Alrubaie, A.H. Hameed // Journal of University of Babylon for Pure and Applied Sciences. – 2018. – Т. 26. – № 8. – С. 122-129.
449. A review on deep learning techniques for video prediction / S. Oprea, P. Martinez-Gonzalez, A. Garcia-Garcia [и др.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2020. – Т. 44. – № 6. – С. 2806-2826.
450. Teed, Z. Recurrent all-pairs field transforms for optical flow / Z. Teed, J. Deng // European conference on computer vision. – Cham : Springer International Publishing, 2020. – С. 402-419.
451. Lucas, B. D. An iterative image registration technique with an application to stereo vision / B. D. Lucas, T. Kanade // IJCAI'81: 7th international joint conference on Artificial intelligence. – 1981. – Т. 2. – С. 674-679.
452. RIFE: real-time intermediate flow estimation for video frame interpolation / Z. Huang, T. Zhang, W. Heng [и др.]// European Conference on Computer Vision. – 2022. –Т. 14. – С. 624-642.
453. FlowNet: Learning optical flow with convolutional networks / A. Dosovitskiy, P. Fischer, E. Ilg [и др.] // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. – 2015. – С. 2758-2766.
454. Spatial transformer networks / M. Jaderberg, K. Simonyan, A. Zisserman, K. Kavukcuoglu // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2015. – Т. 28.
455. Patraucean, V. Spatio-temporal video autoencoder with differentiable memory / V. Patraucean, A. Handa, R. Cipolla // arXiv preprint arXiv:1511.06309. – 2015.
456. Wei, H. Novel video prediction for large-scale scene using optical flow / H. Wei, X. Yin, P. Lin // arXiv preprint arXiv:1805.12243. – 2018.
457. Video frame synthesis using deep voxel flow / Z. Liu, R. A. Yeh, X. Tang [и др.] // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. – 2017. – С. 4463-4471.

458. MAGVIT: Masked generative video transformer / L. Yu, Y. Cheng, K. Sohn [и др.] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2023. – С. 10459-10469.
459. Ye, X. Vptr: Efficient transformers for video prediction / X. Ye, G. A. Bilodeau // 2022 26th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). – IEEE, 2022. – С. 3492-3499.
460. SimVPv2: Towards simple yet powerful spatiotemporal predictive learning / C. Tan, Z. Gao, S. Li, S. Z. Li // IEEE Transactions on Multimedia. – 2025. – Т. 27. – С. 5170-5184.
461. A review on deep learning techniques applied to semantic segmentation / A. Garcia-Garcia, S. Orts-Escolano, S. Oprea [и др.] // arXiv preprint arXiv:1704.06857. – 2017.
462. Geiger, A. Are we ready for autonomous driving? The KITTI vision benchmark suite / A. Geiger, P. Lenz, R. Urtasun // 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – IEEE, 2012. – С. 3354-3361.
463. Wu, Y. Optimizing video prediction via video frame interpolation / Y. Wu, Q. Wen, Q. Chen // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2022. – С. 17814-17823.
464. A dynamic multi-scale voxel flow network for video prediction / X. Hu, Z. Huang, A. Huang [и др.] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2023. – С. 6121-6131.
465. Нестеров Е.А. Снижение задержки видеопотока при пилотировании беспилотных аппаратов от первого лица через гибридную сеть связи / Е.А. Нестеров, А.А. Березкин // Электросвязь. – 2025. – № 8. – С. 2-16.
466. 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.
467. Data compression methods based on neural networks / A. Berezkin, A. Slepnev, R. Kirichek [и др.] // Proceedings of the 5th International Conference on Future Networks and Distributed Systems. – 2021. – С. 511-515.
468. Berezkin, A. Research and development of data compression methods based on neural networks / A. Berezkin, D. Kukunin, R. Kirichek // International Conference on Distributed Computer and Communication Networks. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2022. – С. 103-116.
469. Berezkin, A. Neural network coding in data compression systems in communication channels / A. Berezkin, D. Kukunin, R. Kirichek // 2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). – IEEE, 2022. – С. 1-5.

470. Березкин, А.А. Модели и методы декодирования помехоустойчивых кодов на основе нейросетевого базиса : дис. ... канд. техн. наук : 05.12.13 / Березкин Александр Александрович. – Санкт-Петербург, СПбГУТ, 2009. – 190 с.
471. Владимиров, С. С. Разработка и исследование комплекса методов уменьшения сетевой задержки и идентификации объектов для сетей связи пятого и последующих поколений : специальность 2.2.15 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» : диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук / Владимиров Сергей Сергеевич ; СПбГУТ. – Санкт-Петербург, 2022. – 322 с.
472. Sanders C. Practical packet analysis: Using Wireshark to solve real-world network problems / C. Sanders. – No Starch Press, 2017. – 345 с.
473. Glorot, X. Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks / X. Glorot, Y. Bengio // Proceedings of the thirteenth international conference on artificial intelligence and statistics. – JMLR Workshop and Conference Proceedings, 2010. – С. 249-256.
474. Reed Solomon // GitHub. – URL: <http://github.com/tomerfiliba-org/reedsolomon> (дата обращения: 01.08.2025).
475. Reiger S. Codes for the correction of 'clustered' errors / S. Reiger // IRE Transactions on Information Theory. – 1960. – Т. 6. – № 1. – С. 16-21.
476. Roth, R. M. Efficient decoding of Reed-Solomon codes beyond half the minimum distance / R. M. Roth, G. Ruckenstein // IEEE Transactions on Information Theory. – 2002. – Т. 46. – № 1. – С. 246-257.
477. Березкин, А. А. Исследование методов сжатия команд управления беспилотными воздушными судами в каналах с ограниченной пропускной способностью / А. А. Березкин // Технологии электромагнитной совместимости. – 2025. – № 4(95). – С.15-24.
478. Березкин, А. А. Сжатие и агрегация команд управления беспилотными воздушными судами в каналах с ограниченной пропускной способностью / А. А. Березкин, А. А. Ченский, Р. В. Киричек // Инфокоммуникационные технологии. – 2025. – Т. 23. – № 3(91). – С. 50-71.
479. 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. 18-25.
480. Березкин, А. А. Методика тестирования услуги управления БПЛА от первого лица в каналах информационного обмена гибридных орбитально-наземных сетей связи. Часть 1: Обзор существующих подходов / А. А. Березкин, А. А. Ченский, Р. В. Киричек // Цифровая обработка сигналов. – 2025. – № 3. – С. 48-53.
481. Березкин А. А. Методика тестирования услуги управления БПЛА от первого лица в каналах информационного обмена гибридных орбитально-наземных сетей связи. Часть II:

- Этапы методики / Березкин А. А., Ченский А. А., Киричек Р. В. // Цифровая обработка сигналов. – 2025. – № 4. – С. 26-33.
482. Barman, N. Bjøntegaard delta (BD): A tutorial overview of the metric, evolution, challenges, and recommendations / N. Barman, M. G. Martini, Y. Reznik // arXiv preprint arXiv:2401.04039. – 2024.
483. Каштанов, В. В. Анализ организации связи с применением беспилотных летательных аппаратов малой дальности / В. В. Каштанов, В. А. Немтинов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2022. – Т. 28. – № 4. – С. 606-614.
484. Титов, М. Ю. Пути повышения эффективных способов защиты информации в беспилотных летательных аппаратах двойного назначения / М. Ю. Титов // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17. – № 2. – С. 82-92.
485. 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.
486. Esakki, G. Adaptive encoding for constrained video delivery in HEVC, VP9, AVI and VVC compression standards and adaptation to video content : дис. ... PhD / Gangadharan Esakki. – The University of New Mexico, 2020. – 219 с.
487. 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.
488. Звягин, В. И. Риск как одно из свойств качества решений, принимаемых в условиях неопределенности / В. И. Звягин, А. И. Птушкин, А. В. Трудов // Надежность. – 2018. – Т. 18. – № 4(67). – С. 45-50.
489. NetDisturb // ZTI Communications. – URL: <https://www.zti-communications.com/netdisturb> (дата обращения 08.07.2024).
490. Tommasi, F. Packet losses and objective video quality metrics in H.264 video streaming / F. Tommasi, V. De Luca, C. Melle // Journal of Visual Communication and Image Representation. – 2015. – Т. 27. – С. 7-27.
491. 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

СПЕЦИФИКАЦИЯ ПРОТОКОЛА FPV-CTVP

Таблица А.1 – Структура основной части

#	Название поля	Размер, байт	Примечание
0	Синхрослово	2	Маркер начала пакета для восстановления синхронизации (uint16)
1	Код сообщения	1	Определяет, какое сообщение передаётся (код сообщения) (uint8)
2	Версия	1	Используемая версия протокола (uint8)
3	Идентификатор потока	2	Необходим при различии потоков при отправке нескольких потоков с одного устройства (uint16)
4	Флаги	1	Побитовые флаги (uint8)
5	Номер пакета внутри одной сессии	4	Номер пакета внутри одной сессии (uint32)
6	Уникальный идентификатор сессии	2	Уникальный идентификатор сессии, задается случайно (uint16)
7	Длина сообщения (<i>mlen</i>)	2	Длина полезной нагрузки (uint16)
8	Сообщение	<i>mlen</i>	Содержимое сообщения (<i>mlen</i>)

FPV-CTVP делится на обязательную (табл. А.1) и опциональную части. Состав опциональной части зависит от конкретного вида сообщения. Всего их двенадцать видов: HANDSHAKE_INIT, HANDSHAKE_ACK, AUTH_REQUEST, AUTH_RESPONSE, CONFIG_UPDATE, CONFIG_ACK, CHANNEL_FEEDBACK, VPKT.

Код 0x01. HANDSHAKE_INIT — сообщение инициализации сессии и объявления потоков (табл. А.2). Используется на первом этапе установления соединения между БПЛА и СО. Содержит информацию о поддерживаемых потоках, их типах, кодеках, приоритетах и параметрах шифрования. Отправляется инициатором соединения и используется для начала процедуры согласования параметров передачи данных в рамках сессии FPV-CTVP.

Таблица А.2 – Состав заголовка *HANDSHAKE_INIT*

#	Название поля	Размер, байт	Примечание
0	Флаги	2	Побитовые флаги возможностей участника (uint16)
1	Количество потоков	1	Количество объявляемых потоков в полезной нагрузке сообщения

Полезная нагрузка состоит из количества записей, равной количеству объявляемых потоков (табл. А.3).

Таблица А.3 – Состав полезной нагрузки *HANDSHAKE_INIT*

#	Название поля	Размер, байт	Примечание
0	Идентификатор потока	1	Уникальный идентификатор потока (uint8)
1	Тип потока	1	Тип передаваемого потока (видео, телеметрия, и т.д.) (uint8)
2	Кодек, применяемый к потоку	1	Кодек, применяемый к потоку (uint8)
3	Приоритет	1	Приоритет. Позволяет динамически управлять потоками при деградации канала связи и перегрузках в сети (uint8)
4	Режим шифрования	1	Режим шифрования. 0 – без шифрования. 1 – Магма (256) без имитовставки. 2 – Магма (256) с имитовставкой. 3 – Кузнечик (256) без имитовставки. 4 – Кузнечик (256) с имитовставкой.

Код 0x02. *HANDSHAKE_ACK* – Сообщение передаётся в ответ на *HANDSHAKE_INIT*, если инициатор предложил потоки с неоднозначным статусом — например, часть потоков требует авторизации или шифрования, или не поддерживается получателем (табл. А.4). Если все потоки из *HANDSHAKE_INIT* приняты и не требуют дополнительных действий, сообщение *HANDSHAKE_ACK* может не отправляться, а сессия считается немедленно установленной, и передача может начаться в режиме 0-RTT.

HANDSHAKE_ACK уточняет, какие потоки были приняты немедленно, какие отклонены, а какие отложены до завершения авторизации или обмена ключами. Это позволяет получателю начать обработку поддерживаемых потоков без задержки, не блокируя всю сессию из-за отдельных требований.

Таблица А.4 – Состав заголовка *HANDSHAKE_ACK*

#	Название поля	Размер, байт	Примечание
0	Флаги	2	Побитовые флаги возможностей участника (uint16)
1	Количество потоков	1	Количество объявляемых потоков в полезной нагрузке сообщения

Полезная нагрузка состоит из количества записей, равной количеству объявляемых потоков (табл. А.5).

Таблица А.5 – Состав полезной нагрузки *HANDSHAKE_ACK*

#	Название поля	Размер, байт	Примечание
0	Идентификатор потока	1	Уникальный идентификатор потока (uint8)
1	Статус принятия потока	1	0 – успешно; 1 – отказ; 2 – отложен (uint8)

Код 0x03. *AUTH_REQUEST* – сообщение запроса авторизации или шифрования (табл. А.6). Сообщение *AUTH_REQUEST* используется для инициации дополнительных процедур безопасности после установления сессии: шифрования потоков и/или авторизации пользователя. Оно может быть отправлено отдельно по каждому потоку, если поток в *HANDSHAKE_INIT* помечен как зашифрованный, либо использоваться после успешного согласования ключей для запроса прав доступа к операциям или потокам.

Таблица А.6 – Состав заголовка *AUTH_REQUEST*

#	Название поля	Размер, байт	Примечание
0	Тип запроса	1	0 – шифрование; 1 – авторизация (uint8)
1	Идентификатор потока	1	Уникальный идентификатор потока, к которому относится запрос (uint8)
2	Режим согласования ключа	1	Режим получения ключа. 0 – отсутствие отправки ключа (для тестирования). 1 – отправка ключа непосредственно в сообщении. 2 – VKO_GOSTR3410_2012_256 [17, 18]. 3 – VKO_GOSTR3410_2012_512 [17, 18]. (uint8)
3	Длина вектора инициализации (<i>IVlen</i>)	1	Длина вектора инициализации (uint8)
4	Случайный код	4	Случайно генерируемое число для подтверждения получения сообщения (uint32)
5	Длина полезной нагрузки (<i>plen</i>)	2	Длина полезной нагрузки (uint16)

Структура полезной нагрузки зависит от типа пакета (табл. А.7, А.8).

Таблица А.7 – Состав полезной нагрузки *AUTH_REQUEST* при установке шифрования.

#	Название поля	Размер, байт	Примечание
0	Вектор инициализации	<i>IVlen</i>	Вектор инициализации для алгоритмов шифрования (опционален) (<i>IVlen</i>)
1	Полезная нагрузка	<i>plen</i>	Публичный ключ, параметры VKO, сырой ключ и так далее (<i>plen</i>)

Таблица А.8 – Состав полезной нагрузки *AUTH_REQUEST* при авторизации.

#	Название поля	Размер, байт	Примечание
0	Вектор инициализации	<i>IVlen</i>	Вектор инициализации для алгоритмов шифрования (опционален) (<i>IVlen</i>)
1	Полезная нагрузка	<i>plen</i>	Данные для авторизации (<i>plen</i>)
2	Имитовставка	1	Имитовставка, рассчитываемая по зашифрованной полезной нагрузке (uint8)

Код 0x04. *AUTH_RESPONSE* – Сообщение передаётся в ответ на *AUTH_REQUEST* и подтверждает, либо отклоняет согласованные параметры шифрования или данные авторизации (табл. А.9).

В случае *auth_type* = 0, ответ подтверждает корректное завершение криптографического обмена.

В случае *auth_type* = 1, ответ подтверждает результат авторизации: доступ предоставлен или отклонён.

Таблица А.9 – Состав заголовка *AUTH_RESPONSE*

#	Название поля	Размер, байт	Примечание
0	Тип запроса	1	0 – шифрование; 1 – авторизация (uint8)
1	Идентификатор потока	1	Уникальный идентификатор потока, к которому относится запрос (uint8)
2	Статус ответа	1	0 – успешно; 1 – отказ (uint8)
3	Случайный код	4	Случайно генерируемое число для подтверждения получения сообщения (uint32)
5	Длина полезной нагрузки (<i>plen</i>)	2	Длина полезной нагрузки (uint16)

Поле полезной нагрузки является опциональным и может использоваться для передачи дополнительных данных, после успешного завершения обмена методами шифрования, либо пояснений при ошибках авторизации.

Код 0x05. *CONFIG_UPDATE* – сообщение используется для изменения параметров потока, таких как кодек, квантование, фильтрация, параметры кадрирования и т.д. (табл. А.10). Позволяет передать как полный набор параметров, так и инкрементное обновление к ранее согласованной конфигурации. Может быть отправлено как в начале сессии, так и в любой момент при необходимости адаптации.

Таблица А.10 – Состав заголовка *CONFIG_UPDATE*

#	Название поля	Размер, байт	Примечание
0	Идентификатор потока	1	Идентификатор потока, к которому относится обновление (uint8)
1	Идентификатор кодека	1	Идентификатора кодека, применяемого к конкретному потоку (uint8)
2	Номер кадра	4	Порядковый номер кадра, начиная с которого конфигурация должна применяться (uint32)
3	Флаги	2	Побитовые флаги (uint16)
4	Длина полезной нагрузки	2	Длина полезной нагрузки (uint16)

Полезная нагрузка содержит бинарное представление конфигурации, сериализованное в формате, согласованном с кодеком.

Получатель может отклонить применение конфигурации, если:

- Поток не подлежит изменениям конфигурации
- Пользователь не имеет достаточных прав
- Параметры не поддерживаются

Код 0x06. *CONFIG_ACK* – обязательный ответ на *CONFIG_UPDATE*, независимо от того, была ли конфигурация принята, отклонена или проигнорирована (табл. А.11). Это необходимо для надёжной синхронизации сторон, поскольку возможна потеря пакетов или повторная отправка конфигураций. *CONFIG_ACK* содержит результат обработки и может включать комментарий или рекомендации по действиям отправителя.

Таблица А.11 – Структура заголовка *CONFIG_ACK*

#	Название поля	Размер, байт	Примечание
0	Идентификатор потока	1	Идентификатор потока, к которому относится обновление (uint8)
1	Идентификатор кодека	1	Идентификатора кодека, применяемого к конкретному потоку (uint8)

2	Статус ответа	1	0 – успешно; 1 – отказ (uint8)
3	Флаги	1	Побитовые флаги (uint8)
4	Длина полезной нагрузки	2	Длина полезной нагрузки (uint16)

Полезная нагрузка содержит бинарное представление ошибки, сериализованное в формате, согласованном с кодеком. Это может быть компактная структура с кодами и параметрами ошибки, либо текстовое сообщение. Конкретный формат определяется реализацией кодека или системой, управляющей потоками.

Код 0x0C. CHANNEL_FEEDBACK – сообщение обратной связи по состоянию канала, имеет фиксированный размер и структуру, что позволяет передавать метрики регулярно и с минимальными накладными расходами (табл. А.12). Передаётся от получателя отправителю для уведомления о текущих характеристиках канала связи. Сообщение может использоваться как часть периодической телеметрии, так и как реакция на локальные события, такие как резкое снижение пропускной способности.

Таблица А.12 – Структура *CHANNEL_FEEDBACK*

#	Название поля	Размер, байт	Примечание
0	Идентификатор потока	1	Идентификатор потока, к которому относится обновление (uint8)
1	Флаги	1	Побитовые флаги состояния (uint8)
2	Пропускная способность	4	Оцененная пропускная способность, кбит/с (uint32)
3	Задержка	2	Задержка, мс (uint16)
4	Джиттер	2	Джиттер, мс (uint16)
5	Процент потерь	2	Процент потерь в канале связи (в десятых процентах, например, значение 235 говорит о потерях в канале 23,5%) (uint16)

Код 0x11. VPKT – сообщение с фрагментом кадра, используется для передачи видеоданных, разделённых на фрагменты (табл. А.13). Каждый пакет содержит один фрагмент одного кадра.

Таблица А.13 – Структура *VPKT*

#	Название поля	Размер, байт	Примечание
0	Порядковый номер кадра	4	Порядковый номер кадра (uint32)
1	Индекс фрагмента кадра	2	Индекс текущего фрагмента в кадре (uint16)
2	Количество фрагментов	2	Общее количество фрагментов в кадре (uint16)
3	Длина полезной нагрузки	2	Длина полезной нагрузки (uint16)

Полезная нагрузка пакета – бинарный фрагмент видеоданных.

Код 7. CCTR (Control Command TRansmission) – сообщение передачи команд взаимодействия оператора (табл. А.14).

Таблица А.14 – Структура CCTR

#	Название поля	Размер, байт	Примечание
0	Номер сообщения	8	Порядковый номер сообщения CCTR (uint64)
1	Номер сегмента	2	Номер сегмента (блока) сообщения CCTR (uint16)
2	Всего сегментов	2	Всего сегментов полезной нагрузки данного сообщения (uint16)
3	Режим обработки	1	Режим обработки команд взаимодействия оператора (uint8)
4	Режим шифрования	1	Режим шифрования; 0 – без шифрования; 1 – Магма (256) без имитовставки. 2 – Магма (256) с имитовставкой. 3 – Кузнечик (256) без имитовставки. 4 – Кузнечик (256) с имитовставкой (uint8)
5	Длина полезной нагрузки (plen)	8	Длина полезной нагрузки (бинарного представления кадра видеопотока) (uint64)
6	Полезная нагрузка	plen	Бинарное представление команд взаимодействия оператора

Код 8. CCTA (Control Command Transmission Acknowledgement) – подтверждение передачи команд взаимодействия оператора (табл. А.15).

Таблица А.15 – Структура CCTA

#	Название поля	Размер, байт	Примечание
0	Номер сообщения	8	Порядковый номер сообщения CCTR (uint64)
1	Статус	1	Статус по требованию получения команд взаимодействия оператора. 0 – команда взаимодействия оператора и беспилотной системы получена и корректно применена; 1 – не поддерживаемая на текущем устройстве команда взаимодействия оператора и беспилотной системы; 2 – некорректные данные (из-за несостыковки режимов); ... 255 – неопределённая команда взаимодействия оператора и беспилотной системы (uint8)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ПРОТОКОЛЫ ИСПЫТАНИЙ

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ ИМ. ПРОФ. М.А. БОНЧ-БРУУЕВИЧА»
(СПбГУТ)

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный конструктор
АО «РЕШЕТНЁВ»

М.В. Валов

«» 2025 г.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
СПбГУТ

А.В. Рабин

«» 2025 г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ ЗАДЕРЖЕК ИНФОРМАЦИОННОГО
ОБМЕНА В СПУТНИКОВОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ

Санкт-Петербург 2025

1. ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ

Объектом испытаний являются кодеки сжатия видеопотока:

современные потоковые кодеки стандартов AVC/H264, HEVC/H265, VVC/H266, VP9, AV1;
нейросетевой кодек с различными конфигурациями NVC1, NVC2, NVC3.

2. ЦЕЛЬ ИСПЫТАНИЙ

Провести сравнительный анализ результатов измерения задержки прикладного уровня и необходимой пропускной способности канала спутниковой связи, организованного через спутник связи, размещенный на геостационарной орбите, при передаче FPV-видео, используя современные потоковые кодеки стандартов (AVC/H264, HEVC/H265, VVC/H266, VP9 и AV1) и нейросетевой кодек с различными конфигурациями (NVC1, NVC2, NVC3), разработанный в СПбГУТ.

3. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ОЦЕНИВАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценивается задержка прикладного уровня и минимально требуемая пропускная способность канала спутниковой связи при передаче FPV-видео, передаваемого по спутниковым каналам связи с использованием кодеков стандартов (AVC/H264, HEVC/H265, VVC/H266, VP9 и AV1) и нейросетевого кодека с различными конфигурациями (NVC1, NVC2, NVC3), разработанного в СПбГУТ.

В соответствии с «Программой и методикой испытаний задержек информационного обмена в спутниковом канале связи», утвержденной ректором СПбГУТ 18 марта 2025 года, значения задержки, полученные в ходе испытаний занесены в таблицы № 1, 2, 3, 4.

Комиссия, проводящая испытания внесла изменения в указаниую «Программу ...» в части проведения измерений по п. 6.2, 6.3, 6.4.

Этап измерения реальной полосы пропускания канала связи на стороне декодера при использовании различных кодеков проводился совместно с измерением односторонних задержек кадров видеопотока при использовании современных потоковых кодеков и измерении задержек кадров видеопотока при использовании нейросетевого кодека.

4. МАТЕРИАЛЬНО - ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

Испытания проводились с задействованием канала спутниковой связи, предоставленного АО «Решетнёв», организованного через телекоммуникационный спутник, размещенный на геостационарной орбите сети Ямал-601.

Спутниковый канал организован с задействованием абонентского терминала PC-30M на базе модема Gilat SkyEdge CPE, предоставленного АО «Решетнёв» (рис. 1).



Рисунок 1 – Абонентский терминал PC-30M

Параметры спутникового канала связи:

скорость передачи видеопотока – 1,76 Мбит/с (Upload);

ping – 651 мс;

jitter – 329 мс.

Уровень приёма сигнала – 4,6 дБм при эталонном уровне 6,3 дБм, что даёт запас в 1,7 дБ на прямой канал в условиях ясного неба.

Мощность передачи – 65,3 дБм на фоне потолка в 68,3 дБм, оставляя примерно 3 дБ резерва для адаптивного управления мощностью на обратном канале.

Данные показатели свидетельствуют о том, что VSAT находится в заблокированном состоянии, мощность в пределах нормы и оборудование готово к испытаниям.

Канал по сети Интернет предоставлен ООО «РТКОММ». Оборудование стенда для проведения экспериментов предоставлено СПбГУТ. Структурная схема стенда представлена на рисунке 2, фотография стенда – на рисунке 3.

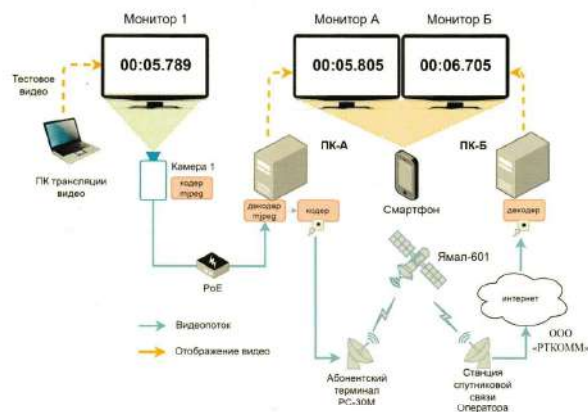


Рисунок 2 – Структура стенда

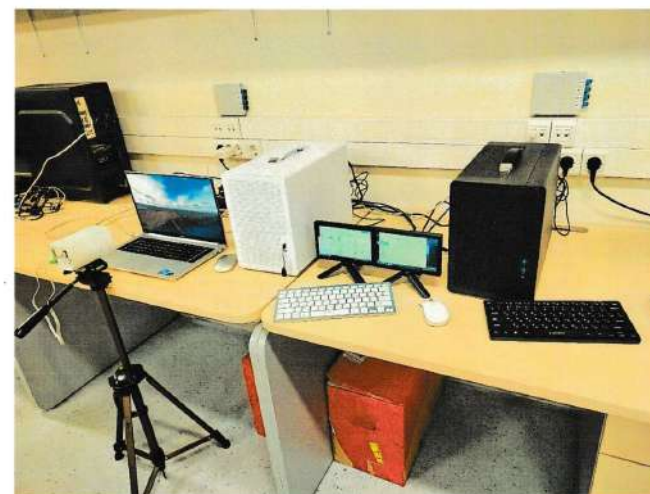


Рисунок 3 – Стенд для проведения испытаний

Для проведения испытаний предоставлена «Программа и методика испытаний задержек информационного обмена в спутниковом канале связи», утвержденная ректором СПбГУТ 18 марта 2025 года.

5. УСЛОВИЯ И МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

5.1. Испытания проводятся в период с 5 по 12 мая 2025 г. на площадях СПбГУТ.

5.2. Климатические условия испытаний:

температура окружающей среды + 3 °C;

сплошная облачность;

осадки в виде дождя.



Рисунок 4 – Климатические условия проведения испытаний.

5.3. Испытания проводились в соответствии с «Программой и методикой испытаний задержек информационного обмена в спутниковом канале связи», утвержденной ректором СПбГУТ 18 марта 2025 г.

5.4. Для проведения испытаний было подготовлено три видео файла, эмулирующих полет беспилотного воздушного судна (БВС), различной динамики (высокой, средней, низкой) с частотой кадров 25 FPS.

Видео высокой динамики характеризуется быстрой сменой полетной обстановки городского типа, резкими поворотами БВС, а также наличием множества мелких разноцветных деталей на изображении (рис. 5).



Рисунок 5 – Пример кадра видео высокой динамики

Видео средней динамики характеризуется умеренной сменой полетной обстановки в облачную погоду и включает в себя сцены плавного полета над сельской местностью с некоторым количеством хозяйственных построек, дорог и инфраструктуры сельского аэродрома.



Рисунок 6 – Пример кадра видео средней динамики

Видео низкой динамики включает в себя медленное прямолинейное движение БВС над лесным массивом без поворотов и изменений высоты полета.



Рисунок 7 – Пример кадра видео низкой динамики

5.5. Исходные данные среды тестирования:

- используется программная реализация стандартных кодеков библиотеки *ffmpeg* версии 7.1;

- точность измерения задержки OCR моделью составляет 60 мс;

- испытания проводятся на оборудовании со следующими характеристиками:

OS: Linux Mint 22.1 x86_64;

CPU: 13th Gen Intel i7-13700K (24) @ 5.300GHz;

GPU: NVIDIA GeForce RTX 4080 SUPER;

Memory: 3977MiB / 15755MiB.

- кодирование и декодирование видеопотока осуществляется на GPU NVIDIA GeForce RTX 4080 SUPER 16Gb. В связи с невозможностью запуска кодека H266/VVC на GPU, его запуск осуществляется на CPU.

- для стандартных кодеков используются настройки по умолчанию и пресеты *fast* и *ultrafast* для максимального сокращения задержек на кодирование и декодирование.

- на вход видеокодеков подается поток MPEG кадров со скоростью 12288 Кбит/с (для 25 FPS) и 6779 Кбит/с (для 15 FPS). Коэффициент сжатия вычисляется как деление 12288 (6779) на средний битрейт на выходе соответствующего кодека.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

В соответствии с разделом 6 Методики проведены эксперименты по передаче полетной обстановки из видео различной динамики и различного качества (HD, FullHD).

На первом этапе проведена серия экспериментов по передаче полезной нагрузки *payload* разного размера между отправителем и получателем через спутниковый канал связи с целью измерения прикладной задержки передачи. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерения прикладной задержки

Payload, байт	Потери, %	Мат. ожидание, мс	Среднеквадратическое отклонение	Минимум	Максимум
100	0,08	360,81	32,39	312,73	450,41
300	0,58	372,58	45,54	311,89	488,46
500	1,01	382,46	54,58	317,21	525,44
700	2,11	527,20	96,63	313,20	689,71
1 000	1,01	639,64	87,80	388,51	772,62
2 000	0,67	770,01	55,91	558,81	873,52
3 000	1,75	641,20	183,82	322,71	978,07
4 000	1,23	774,01	90,42	495,61	931,29
5 000	2,88	797,37	53,19	610,12	897,38
7 000	2,48	785,79	45,76	634,67	897,68
10 000	2,14	722,19	147,96	353,00	958,35
15 000	3,28	699,45	167,60	318,74	977,46

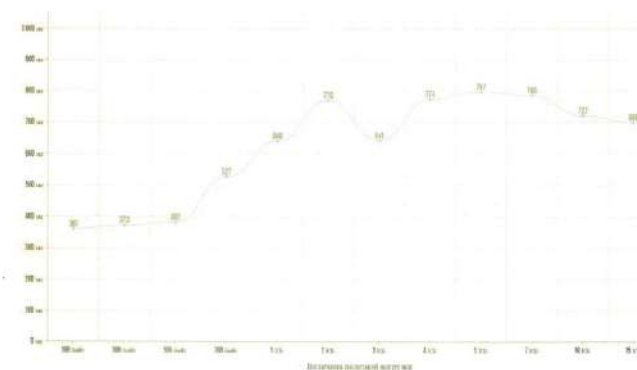


Рисунок 8 – Зависимость прикладной задержки передачи данных от размера полезной нагрузки

В таблице 1 и рисунке 8 продемонстрирована зависимость прикладной задержки передачи данных от полезной нагрузки *payload* (в случае нейрокододексов – это кадры видеопотока). Чем выше значение *payload*, тем больше значение задержки. При этом в случае размера полезной нагрузки *payload*, лежащей на интервале [100; 500] байт, изменения задержки незначительны. Задержка при этом лежит на интервале [360,81; 382,46] мс и характеризуется относительно низкой дисперсией, лежащей на интервале [1048,87; 2978,70]. При размере полезной нагрузки (500; 2000] байт отмечается рост задержки приблизительно в 2 раза – с 382,46 мс до 770,01 мс – с умеренной дисперсией (до 9337,96). При размере полезной нагрузки, большем 2000 байт, отмечаются флуктуации задержки. В зависимости от загрузки сети и погодных условий математическое ожидание задержки колеблется на интервале [641,20; 797,37] мс. При этом задержка характеризуется высокой дисперсией до 33789,23.

На втором этапе проведена серия экспериментов по передаче видеопотоков различной динамики HD и FullHD качества с цифровой камеры между отправителем и получателем через спутниковый канал связи. Видеопоток кодировался кодеками AVC/H264, HEVC/H265, VVC/H266, VP9, AV1, NVC1, NVC2, NVC3 с помощью утилиты *ffmpeg* версии 7.1 и передавался через спутниковый канал связи. Настройки кодеков приведены в Таблице 5.

Результаты измерений для каждого видео приведены в таблицах 2–4.

Таблица 2 – Результаты стендовых испытаний передачи видео высокой динамики (измерение задержки)

Кодек	Средняя задержка, мс	Скорость, kbps	Коэффициент сжатия
HD			
AVC/H264	2180,26	549	22,38
HEVC/H265	2331,21	969	12,68
VVC/H266	11465,24	599	20,51
VP9	4459,06	1586	7,75
AV1	2185,38	983	12,50
NVC3	641,02	657	18,70
NVC2	681,81	349	19,42
NVC1	592,73	102	66,46
FHD			
AVC/H264	2088	1015	12,11
HEVC/H265	2058,28	594	20,69
VP9	4577,55	1604	7,66
AV1	2090,72	1017	12,08
NVC3	653,38	582	21,11
NVC2	687,7	327	20,73
NVC1	607,5	91	74,49

Таблица 3 – Результаты стендовых испытаний передачи видео средней динамики (измерение задержки)

Кодек	Средняя задержка, мс	Скорость, kbps	Коэффициент сжатия
HD			
AVC/H264	3772,33	1689	7,28
HEVC/H265	4011,19	671	18,31
VVC/H266	10431,31	265	46,37
VP9	4405,94	1632	7,53
AV1	3921,45	1750	7,02
NVC3	555,24	474	25,92
NVC2	628,36	237	28,60
NVC1	612,86	97	69,89

FHD			
AVC/H264	3933,91	1196	10,27
HEVC/H265	2431,35	1035	11,87
VP9	4320,89	1484	8,28
AV1	3981,08	1789	6,87
NVC3	793,33	1521	8,08
NVC2	870,71	221	30,67
NVC1	618,89	92	73,68

Таблица 4 – Результаты стендовых испытаний передачи видео низкой динамики (измерение задержки)

Кодек	Средняя задержка, мс	Скорость, kbps	Коэффициент сжатия
HD			
AVC/H264	2342,07	1689	7,28
HEVC/H265	4163,31	671	18,31
VVC/H266	9731,41	265	46,37
VP9	4711,81	1632	7,53
AV1	2272,81	1750	7,02
NVC3	689,46	700	17,55
NVC2	724,28	144	47,08
NVC1	622,11	58	116,88
FHD			
AVC/H264	1994,95	443	27,74
HEVC/H265	1930,58	1033	11,90
VP9	5538,47	1250	9,83
AV1	2158	1079	11,39
NVC3	702,48	839	14,65
NVC2	783,63	278	24,38
NVC1	722,35	58	116,88

Значения средней задержки передачи FPV-видео различной динамики (рис. 6) обусловлены тем, что при зафиксированном расстоянии между ключевыми кадрами (I-кадры) и отключенными B-кадрами:

1. На видео высокой динамики стандартный кодек быстро пропускает устаревшие кадры из-за отсутствия информации для ссылок;
2. Для видео низкой динамики кадр почти не меняется, поэтому стандартный кодек быстро находит необходимую информацию для ссылок;
3. В видео средней динамики примерно равномерно распределена полезная информация для кодирования, поэтому стандартный кодек тратит много

времени на кодирование ссылок, поэтому общая прикладная задержка оказывается выше.

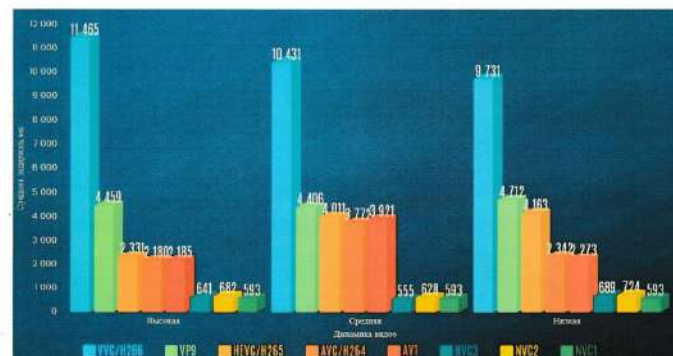
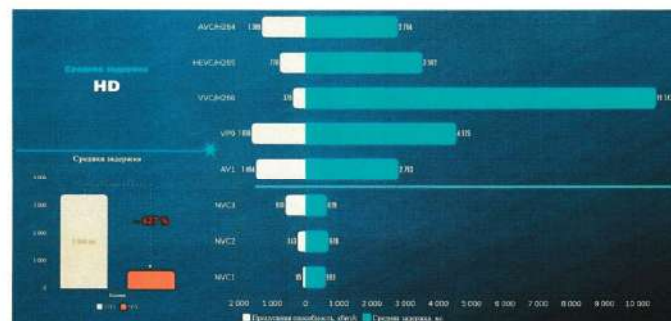


Рисунок 9 – Значение средней задержки при передаче FPV-видео различной динамики



а)



б)

Рисунок 10 – Значение средней задержки при передаче видео различной динамики и необходимой пропускной способности канала для передачи FPV-видео – а) HD Качества б) FHD качества).

На рисунке 11 представлены результаты измерений реальной полосы пропускания канала связи при работе исследуемых кодеков.

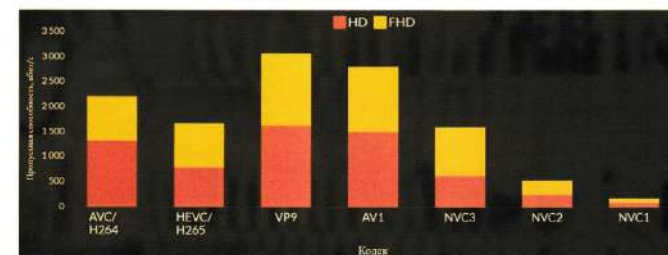


Рисунок 11 – Отношение необходимой пропускной способности канала связи

В ходе испытаний наблюдалось отсутствие существенных изменений величины средней задержки передачи кадров передаваемого FPV-видео (различной динамики и различного качества) при использовании нейросетевого

кодека, по сравнению с современными потоковыми кодеками. Результаты наблюдений продемонстрированы на рисунке 12.

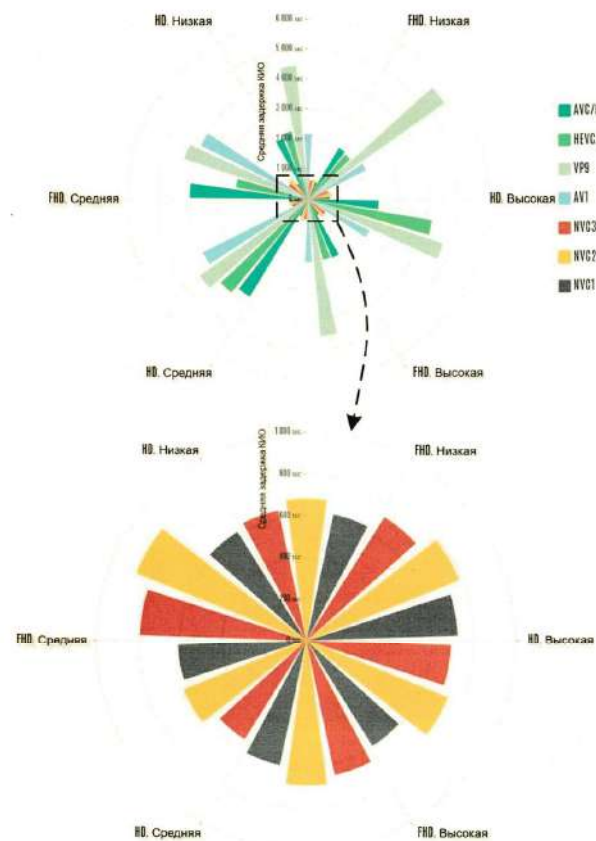


Рисунок 12 – Изменения величины средней задержки передачи кадров передаваемого FPV-видео (различной динамики и различного качества).

18

Таблица 5 – Настройки колоков

1. Таблица 2 – Настройки колонок											
Параметр	Флаг	H264_nvenc	Флаг	hvc_nvenc	Флаг	VVC/ Hwvenc	Флаг	h265-vp9	Флаг	av1_nvenc	Пояснение параметров
Аппаратное ускорение	hwaccel	auto	hwaccel	auto	-	-	-	-	hwaccel	auto	Использование аппаратного ускорения, при наличии. Во всех случаях использовался 4080 super
Пресет	preset	pl	preset	pl	preset	faster	deadline	realtime	preset	pl	Отвечает за скорость кодирования кадра. Pl faster-deadline - наиболее быстрые
Дополнительные флаги	-	-	-	-	-	-	crypto-used	8	-	-	crypto-used исключительно h265-vp9 параметр, изменяется в диапазоне 0-8. Чем выше, тем выше скорость и тем ниже качество.
Битрейт	rc	vbr	rc	vbr	rc	vbr	rc	vbr	rc	vbr	VBR - переменный битрейт
Целевой битрейт	bv	1800 kb/s	bv	1800 kb/s	bv	1800 kb/s	bv	1800 kb/s	bv	1800 kb/s	Если будет стараться использовать вес 1800 kb/s
Максимально допустимый битрейт	maxrate	1800 kbps	maxrate	1800 kbps	-	-	maxrate	1800 kbps	maxrate	1800 kb/s	Максимально допустимый битрейт
УВУ буфер	bufsize	1000 kb	bufsize	1000 kb	bufsize	1000 kb	bufsize	1000 kb	bufsize	1000 kb	Размер буфера кадра, чем ниже, тем меньше

Параметр	Флаг	H264_avcnc	Flag	hvc_avcnc	Flag	VVC/ Hvcnc	Флаг	Шорт-урб	Флаг	av1_avcnc	Пояснение параметра
Отключение В-кадров	bf	0	bf	0	bf	0	bf	0	bf	0	Отключает В-кадры, следовательно, отключает возможность буферизации будущих кадров
Отключение предварительного просмотра будущих кадров	pc-lookahead	0	pc-lookahead	0	pc-lookahead	0	pc-lookahead	0	pc-lookahead	0	Отключает возможность просмотра будущих кадров, следовательно, уменьшает задержку. Влияет на стабильность буфера.
Максимальное расстояние между ключевыми кадрами	g	30	g	30	g	30	g	30	g	30	Максимальное количество кадров между ключевыми
Минимальное расстояние между ключевыми кадрами	keyint_min	30	keyint_min	30	keyint_min	30	keyint_min	30	keyint_min	30	Минимальное количество кадров между ключевыми
Контэйнер	-	matroska	-	matroska	-	targets	-	matroska	-	matroska	Формат упаковки данных
Протокол передачи	-	trp	-	trp	-	trp	-	trp	-	trp	Протокол управления потоком

На рисунке 13 продемонстрировано изменение объективных метрик качества SSIM (индекс структурного сходства) и PSNR (пиковое отношение сигнал/шум) в зависимости от используемого видеокодека. Измерения метрик было проведено на основе 1000 кадров видеопотока HD качества.

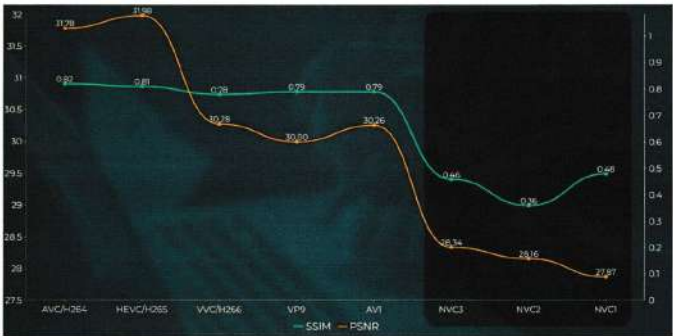


Рисунок 13 – Изменение объективных метрик качества кадров HD видеопотока в зависимости от используемого кодека

Метрика SSIM объединяет локальную структуру изображения, яркость и контрастность в единую локальную оценку качества. В этой метрике структуры представляют собой шаблоны интенсивности пикселей, особенно среди соседних пикселей, после нормализации по яркости и контрастности.

Метрика PSNR определяет уровень искажений при сжатии и включает подсчет среднеквадратичной ошибки (MSE). PSNR физически показывает, в каком из испытываемых вариантов осталось больше деталей и меньше шумов.

При использовании нейросетевых кодеков происходит заметное снижение объективных метрик качества PSNR (на 9,8%) и SSIM (на 86%) (рис. 13). Это обусловлено тем, что искажения, вносимые нейросетевыми кодеками, носят более структурный характер по сравнению со стандартными. Так прямые линии могут стать волнистыми, а некоторые детали могут не отразиться. Это связано с природой их реализации, а именно в функции генерации кадров видеопотока

из внутреннего латентного распределения нейронной сети. Такая генерация сопровождается итоговыми изменениями значений яркости и контрастности отдельных пикселей на всем диапазоне восстановленного изображения, что снижает значения метрик. Однако, это позволяет различать объекты при FPV-управлении и достигать целей функционирования БВС.

7. НЕДОСТАТКИ

В качестве недостатков испытаний можно отметить, что испытания проводились только в стационарных условиях.

Приведенные результаты испытаний отражают достигнутые технические результаты при развертывании комплекса программно-аппаратных средств в лабораторных условиях.

Кроме этого, исследование сетевых задержек и джиттера в спутниковом канале связи не проводилось. Целесообразно провести такие испытания для нескольких комплектов оборудования для исследования утилизации спутникового канала связи и влияния его параметров на сетевые задержки и джиттер.

8. РЕКОМЕНДАЦИИ

Рекомендуется провести испытания эффективности работы кодеков серии NVC с целью оценки эффекта от применения данных кодеков по сравнению со стандартными кодеками при размещении комплексов программно-аппаратных средств на борту беспилотных воздушных судов и безэкипажных катеров.

9. ВЫВОДЫ

9.1. Испытания проведены в полном объеме в соответствии с «Программой и методикой испытаний задержек информационного обмена в спутниковом канале связи», утвержденной ректором СПбГУТ 18 марта 2025 г.

9.2. Кодеки серии NVC позволяют сократить прикладную задержку передачи цифрового видеопотока HD качества через спутниковый канал связи Ямал-601 по сравнению со стандартными кодеками более чем в 5 раз.

9.3. Средняя пропускная способность канала связи для передачи цифрового видеопотока HD качества для стандартных кодеков составляет 1.11 Мбит/с. Средняя пропускная способность канала связи для передачи цифрового видеопотока HD качества для кодеков серии NVC составляет 0.31 Мбит/с.

Кодеки серии NVC позволяют сократить требуемую пропускную способность канала спутниковой связи для передачи цифрового видеопотока HD качества в 3.5 раза для реализации услуги FPV-управления.

9.4. При использовании нейросетевых кодеков происходит заметное снижение объективных метрик качества PSNR (на 9,8%, 2,7 дБ) и SSIM (на 86%). Это обусловлено тем, что искажения, вносимые нейросетевыми кодеками, носят более структурный характер по сравнению со стандартными из-за их генеративной природы. Такие структурные изменения допустимы при реализации систем FPV-управления.

9.5. Видеопотоки FHD-качества для осуществления FPV-управления в современных беспилотных системах не применяются. Рекомендуется использовать результаты испытаний для видеопотока HD качества.

9.6. Анализ результатов измерения прикладной задержки передачи данных *payload* различного размера показал, что с наименьшей задержкой возможно передавать данные размера от 100 до 500 байт. Далее наиболее целесообразно ограничить размер передаваемых данных за одну передачу до 3 кБ, где задержка достигает своего пикового значения. Далее из-за флуктуаций в канале спутниковой связи, обусловленных в том числе погодными условиями, передача данных размера более 3 кБ за одну передачу не целесообразно.

9.7. Анализ результатов показал практически значимый результат от использования кодеков серии NVC при передаче:

данных телеметрии от 100 до 3000 байт (см. п.9.6);

FPV-видео, что позволяет осуществлять FPV-управление в различной динамике.

9.8. Кодеки серии NVC позволяют сократить затраты на использования спутниковых ресурсов (требуемая пропускная способность канала спутниковой связи, см. п.9.3).

9.9. Кодеки серии NVC возможно использовать при разработке:

систем мониторинга (сбор данных телеметрии);

систем FPV-управления беспилотными воздушными судами и безэкипажными катерами.

Сотрудник
АО «РЕШЕТНЁВ»



А.М. Бадертдинов

Руководитель рабочей группы
СПБГУТ



А.А. Березкин, к.т.н.

Члены рабочей группы СПБГУТ



А.С. Дюбов, к.т.н.



А.П. Постарнак

Экз. № _____

УТВЕРЖДАЮ
Проректор
по научной работе СПбГУТ



А. Рабин

« _____ »



УТВЕРЖДАЮ
Врио начальника ФГБУ
«16 ЦНИИИ»
Минобороны России

Е. Долматов

« _____ »

2025 г.



ПРОТОКОЛ

испытаний кодека видеосжатия Neuro Video Codec,
разработанного федеральным государственным бюджетным
образовательным учреждением высшего образования «Санкт-Петербургский
государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-
Бруевича»

г. Мытищи, 2025

ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ

Технология видеосжатия Neuro Video Codec (далее – NVC), разработанный федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», обеспечивающий передачу видеопотока по каналам связи, в том числе низкого качества.

ЦЕЛЬ ИСПЫТАНИЙ

Целью испытаний является изучение технических аспектов применения разработанной СПбГУТ технологии сжатия видеопотоков, включая оценку параметров битрейта и качества изображения, с целью определения её потенциала, эффективности и целесообразности использования в автоматизированных системах Министерства обороны Российской Федерации.

УСЛОВИЯ И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Испытания проводились в период с 22 октября по 23 октября 2025 года в нормальных климатических условиях на стенде, развернутом на территории ФГБУ «16 ЦНИИИ» Минобороны России (г. Мытищи). Внешний вид испытательного стенда представлен на рисунке 1. Схема испытательного стенда представлена на рисунке 2 и рисунке 3.

Функционирование технологии NVC проверялось в двух режимах: прямое соединение оборудования с подключением эмулятора сетей Network Emulator II (рисунок 2) и в работе по реальному низкоскоростному спутниковому каналу связи через станции спутниковой связи (ССС) Р-444-ПТН (рисунок 3). Внешний вид применяемых ССС и их настройка представлены на рисунке 4 и рисунке 5.



Рисунок 1 – Внешний вид испытательного стенда

1

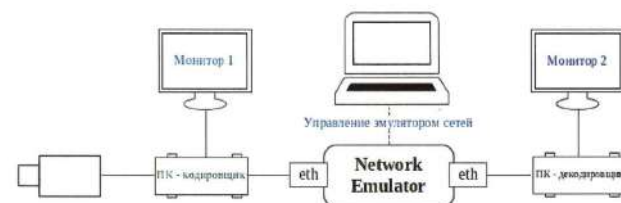


Рисунок 2 – Схема испытательного стенда с подключением эмулятора сетей Network Emulator II



Рисунок 3 – Схема испытательного стенда в режиме работы через станции спутниковой связи



Рисунок 4 – Внешний вид станций спутниковой связи Р-444-ПТН

2



Рисунок 5 – Настройка станций спутниковой связи P-444-ПТН для проведения испытаний

МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

1. Испытательный стенд лабораторно-экспериментальной базы в составе:
 - ПК-кодировщик:
OS: Linux Mint 22.1 x86_64;
CPU: Ryzen 7 8845HS;
GPU: NVIDIA GeForce RTX 4080M.
 - ПК-декодировщик:
OS: Linux Mint 22.1 x86_64;
CPU: Intel Core i7 13700K;
GPU: NVIDIA GeForce RTX 4080 SUPER.
 - USB-камера с форматом отдаваемых кадров MJPEG и разрешением 1280x720, 30 fps.
2. Эмулятор сетей Network Emulator II.
3. Станция спутниковой связи P-444-ПТН – 2 шт.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТА ИСПЫТАНИЙ

Основные характеристики и описание технологии NVC представлены в приложении А.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

1. Проверка функционирования видеокодека NVC в режиме прямого соединения с подключением эмулятора сетей Network Emulator II

1.1 Подготовлен стенд для проведения испытаний оценки качества получаемых кадров после декодирования (H264, H265, NVC) в соответствии со схемой, изображенной на рисунке 2.

ПК-кодировщик и ПК-декодировщик соединены кабелем Ethernet, через эмулятор сетей Network Emulator II.

1.2 Последовательно запущен видеопоток с IP-видеокамеры в различных режимах. Для каждого кодека проведены отдельные серии измерений в идентичных условиях. Проверены следующие сочетания параметров сети:

- 0% потерь пакетов, задержка 0 мс;
- 2% потерь пакетов, задержка 6 мс;
- 10% потерь пакетов, задержка 6 мс.

1.3 Проведена экспертная оценка качества видеоизображения и значений битрейта на основании данных, полученных с эмулятора сетей Network Emulator II.

1.4 Сформированы сравнительные таблицы с информацией о битрейте и качестве изображений, полученных разными кодеками (H264, H265, NVC).

2. Проверка функционирования видеокодека NVC в режиме работы по реальному низкоскоростному спутниковому каналу связи через ССС P-444-ПТН

2.1 Развернут стенд для проведения испытаний оценки задержки работы и качества получаемых кадров после декодирования (H264, H265, NVC) в соответствии со схемой, изображенной на рисунке 3.

2.2 После установления связи по каналу спутниковой связи проверена доступность и связность ПК-кодировщика и ПК-декодировщика с помощью команды ping.

2.3 Осуществлен запуск видеопотока с IP-видеокамеры с ПК-кодировщика на ПК-декодировщик.

2.4 Осуществлен захват видеотрафика, поступающего на ПК-декодировщик от ПК-кодировщика, с помощью программы Wireshark. Определена фактическая пропускная способность встроенной командой Linux (capinfos).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

1. Результаты проведения испытаний функционирования видеокodeка NVC в режиме прямого соединения с подключением эмулятора сетей Network Emulator II

1.1 Оценка качества видеоизображения и пропускной способности в зависимости от значений потерь пакетов и задержки

1.1.1 Начальные условия: 0% потерь пакетов, задержка 0 мс.

Полученные результаты представлены на рисунках 6–12.

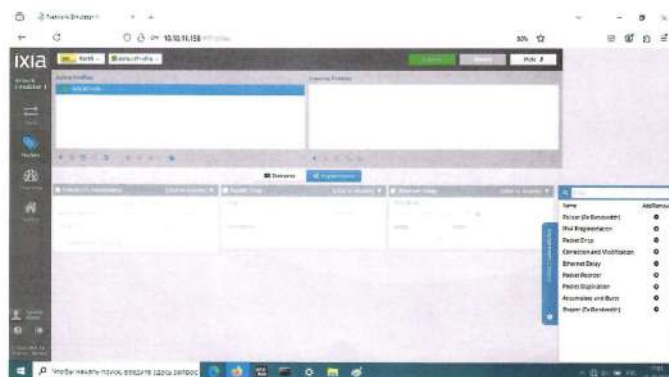


Рисунок 6 – Выставленные значения параметров сети на эмуляторе сетей Network Emulator II



Рисунок 7 – Визуальное качество видеоизображения, полученного с использованием видеокodeка H264, при заданных параметрах сети

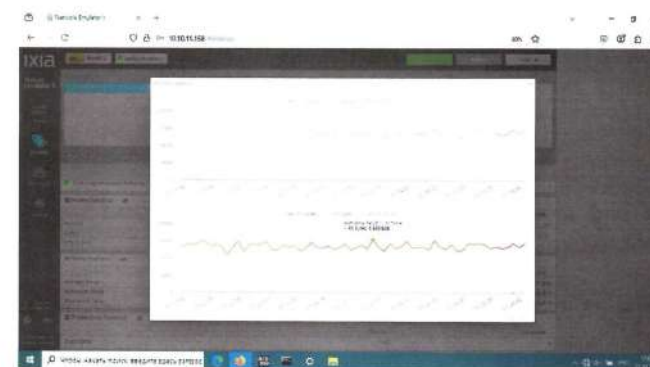


Рисунок 8 – Значение битрейта при передаче видеопотока с использованием видеокodeка H264 при заданных параметрах сети



Рисунок 9 – Визуальное качество видеоизображения, полученного с использованием видеокодека H265, при заданных параметрах сети



Рисунок 10 – Значение битрейта при передаче видеопотока с использованием видеокодека H265 при заданных параметрах сети



Рисунок 11 – Визуальное качество видеоизображения, полученного с использованием видеокодека NVC, при заданных параметрах сети

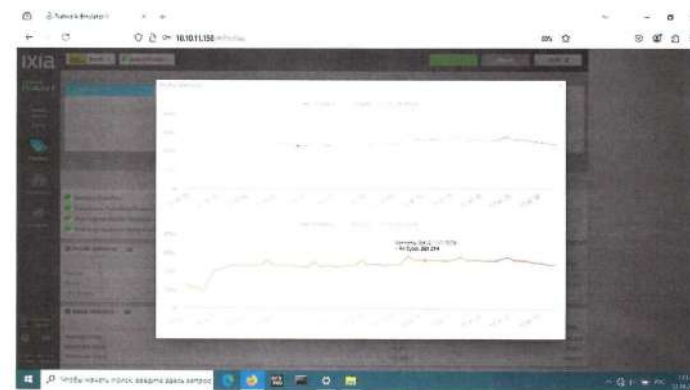


Рисунок 12 – Значение битрейта при передаче видеопотока с использованием видеокодека NVC при заданных параметрах сети

1.1.2 Начальные условия: 2% потерь пакетов, задержка 6 мс.
Полученные результаты представлены на рисунках 13–19.

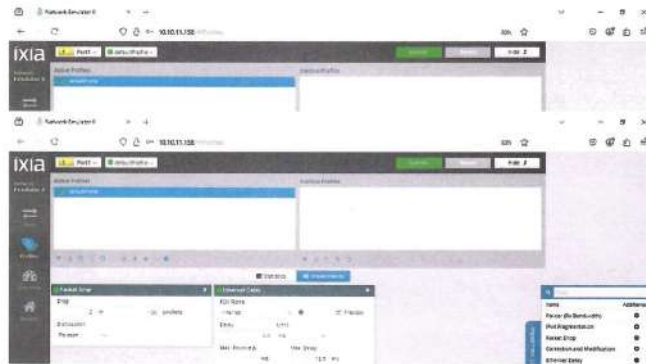


Рисунок 13 – Выставленные значения параметров сети на эмуляторе сетей Network Emulator II



Рисунок 14 – Визуальное качество видеоизображения, полученного с использованием видеокодека H.264, при заданных параметрах сети



Рисунок 15 – Значение битрейта при передаче видеопотока с использованием видеокодека H.264 при заданных параметрах сети



Рисунок 16 – Визуальное качество видеоизображения, полученного с использованием видеокодека H.265, при заданных параметрах сети



Рисунок 17 – Значение битрейта при передаче видеопотока с использованием видеокодека H.265 при заданных параметрах сети



Рисунок 18 – Визуальное качество видеоизображения, полученного с использованием видеокодека NVC, при заданных параметрах сети

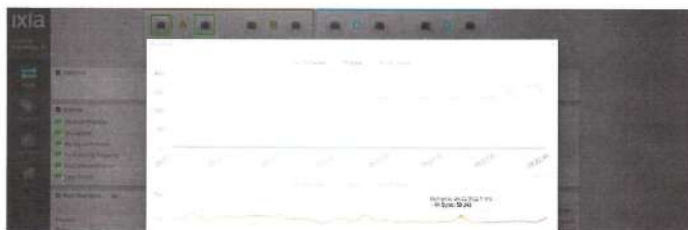


Рисунок 19 – Значение битрейта при передаче видеопотока с использованием видеокодека NVC при заданных параметрах сети

1.1.3 Начальные условия: 10% потерь пакетов, задержка 6 мс.
Полученные результаты представлены на рисунках 20–26.



Рисунок 20 – Выставленные значения параметров сети на эмуляторе сетей Network Emulator II



Рисунок 21 – Визуальное качество видеоизображения, полученного с использованием видеокодека H.264, при заданных параметрах сети



Рисунок 22 – Значение битрейта при передаче видеопотока с использованием видеокодека H.264 при заданных параметрах сети



Рисунок 23 – Визуальное качество видеоизображения, полученного с использованием видеокодека H.265, при заданных параметрах сети



Рисунок 24 – Значение битрейта при передаче видеопотока с использованием видеокодека H.265 при заданных параметрах сети



Рисунок 25 – Визуальное качество видеоизображения, полученного с использованием видеокодека NVC, при заданных параметрах сети

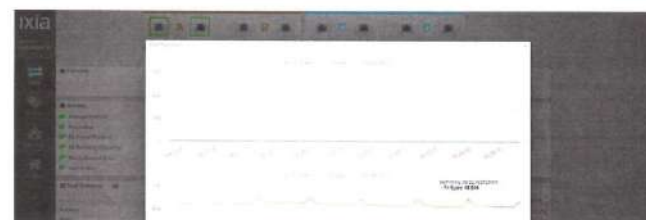


Рисунок 26 – Значение битрейта при передаче видеопотока с использованием видеокодека NVC при заданных параметрах сети

Наглядно значения битрейта и данные о качестве видеоизображения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения битрейта и данные о качестве видеоизображения проверяемых видеокодеков в различных режимах испытаний

№ п/п	Заданные параметры сети	Значение битрейта (Кбит/с)			Данные об изображении
		H.264	H.265	NVC	
1.	0% потеря, задержка 0 мс	12058,93	8341,02	2040,73	Видеоизображение высокого качества
2.	2% потеря, задержка 6 мс	845,84	694,44	415,95	H.264, H.265 – в видеоизображении присутствуют незначительные артефакты, качество удовлетворительное, NVC – изображение высокого качества
3.	10% потеря, задержка 6 мс	925,23	830,52	379,25	H.264, H.265 – в видеоизображении присутствуют значительные артефакты, качество изображения неудовлетворительное, NVC – изображение высокого качества

Зафиксирована значительная экономия полосы пропускания без нарушения качества видеоизображения во всех проверяемых режимах функционирования системы. Практический выигрыш составил до 144% при 10% потеря пакетов и задержке 6 мс и до 491% при отсутствии ограничения качества канала.

2. Проверка функционирования видеокодека NVC в режиме работы по реальному низкоскоростному спутниковому каналу связи через станции спутниковой связи (ССС) Р-444-ПТН

На станциях спутниковой связи установлен режим прямой ретрансляции «ПР-МК», скорость в образованном канале спутниковой связи составляла 64Кбит/с, работа осуществлялась через КА «Благовест» по стыку «Ethernet».

Качество видеоизображения, а также значение битрейта, зафиксированного в ходе трансляции видеопотока, представлены на рисунке 27.



Рисунок 27 – Визуальное качество видеоизображения, полученного с использованием видеокодека NVC, и значение битрейта в режиме передачи видеопотока по низкоскоростному каналу спутниковой связи

Пропускная способность, зафиксированная во время испытаний в режиме передачи видеопотока по низкоскоростному каналу спутниковой связи, составила 35Кбит/с. Визуально лица и мелкие детали объектов не различимы, однако сохраняются цвета и силуэты объектов, целостная структура изображения.

ЗАМЕЧАНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Разработчику технологии NVC организовать доработку технологии NVC с целью реализации возможности передачи видеопотока по низкоскоростному КВ-радиоканалу на скорости 16Кбит/с. По окончании доработки провести дополнительные испытания на реальных каналах связи.
2. Разработчику NVC провести дополнительные проверки в части определения точных минимальных системных требований к аппаратной платформе, достаточных для функционирования разработанной технологии видеосжатия.
3. Разработчику подготовить исходные данные для разработки требований к NVC в целях его применения в интересах Минобороны России.

ВЫВОДЫ

1. Испытания технологии видеосжатия Neuro Video Codec, разработанной ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный

университет телекоммуникаций им. проф. М.А.Бонч-Бруевича», проведены в полном объеме в соответствии с «Программой и методиками испытаний...», утвержденными начальником института.

2. Технология NVC использует собственные протоколы кодирования видеоинформации с применением обученной нейросети, дальнейшее обучение которой не требуется.

3. Технология NVC обеспечивает передачу видеоинформации по каналам передачи данных низкого качества (в режиме потерь пакетов 10% и выше), а также по спутниковому каналу связи с канальной скоростью 64 Кбит/с. В проверенных режимах функционирования в условиях потери пакетов до 10% потери качества видеоизображения не зафиксировано.

4. Технология NVC 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.

5. Технология NVC может быть использована в интересах Министерства обороны Российской Федерации в части передачи видеопотоков, в том числе по низкоскоростным каналам и каналам низкого качества, организации видеоконференцсвязи, а также видеонаблюдения и видеотрансляции.

Заместитель начальника отдела –
начальник лаборатории 31 отдела



А. Неижмак

Старший научный сотрудник 311 лаборатории



Н. Карпухин

Младший научный сотрудник 311 лаборатории



Н. Вдовченко

Ведущий научный сотрудник 33 отдела



А. Васильев

Научный сотрудник 341 лаборатории



И. Жмурин

Директор Центра перспективных проектов
и разработок (ЦППР) СПбГУТ



А.А. Березкин



Инженер ЦППР СПбГУТ



З.В. Кулунчаков

Техник ЦППР СПбГУТ



А.И. Козлова

Инженер-исследователь
НИИЛИИ ПАО «Ростелеком» СПбГУТ



А.П. Постарнак



Минтранс
России



МИНИСТЕРСТВО
ТРАНСПОРТА
РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ



МИНИСТЕРСТВО
НАУКИ
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



АГЕНТСТВО
СТРАТЕГИЧЕСКИХ
ИНИЦИАТИВ

ПЛАТФОРМА НТИ

20.35
УНИВЕРСИТЕТ

ФОНД НТИ

Сертификат

подтверждения технических характеристик

Система FPV управления БАС в гибридных и спутниковых сетях связи

В рамках выставки-конкурса технологических решений «Дрон-гараж»
проектно-образовательного интенсива «Архипелаг 2025»
подтверждены следующие технические характеристики

1	Средняя задержка передачи FPV-видео HD качества	Не более 700 мс
2	Состав оборудования	Кодер на основе мини-ПК с внешней GPU; Декодер на основе ПК с GPU; HD-камера; Модем спутниковой связи PC-30M006; Модем LTE мобильного телефона Samsung M55 Через геостационарный спутник
3	Работа системы по спутниковым каналам связи	Наличие
4	Работа системы по каналам LTE	Наличие
5	Средняя задержка передачи FPV-видео HD качества через сеть LTE	Не более 100 мс
6	Средняя задержка передачи FPV-видео HD качества через спутниковую сеть связи	Не более 500 мс

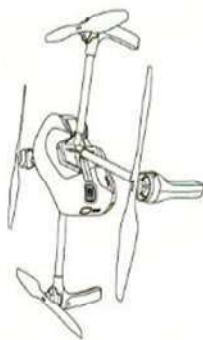
Руководитель Штаба Архипелага,
исполнительный директор АНО «Платформа НТИ»

Ректор АНО «Университет Национальной
технологической инициативы 2035»



АРХИПЕЛАГ
2025

Москва 7-17 августа



А.А. Силин



Д.В. Кайсин

ПРИЛОЖЕНИЕ В

АКТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ, ПАТЕНТЫ И СВИДЕТЕЛЬСТВА

УТВЕРЖДАЮ



Генеральный директор
ФГУП «Космическая связь»

А. К. Волин

«10» апреля 2026 г.

АКТ

**о внедрении результатов диссертационного исследования на соискание
ученой степени доктора технических наук Березкина Александра
Александровича в научно-практическую деятельность
ФГУП «Космическая связь»**

Комиссия под председательством Татаренко Павла Сергеевича, заместителя Генерального директора – начальника Службы информационных технологий установила, что результаты диссертационного исследования на соискание ученой степени доктора технических наук Березкина Александра Александровича внедрены в научно-практическую деятельность ФГУП «Космическая связь» для повышения эффективности информационного обмена и решения специализированных задач. При проектировании гибридных сетей с задействованием наземного и космического сегментов связи для реализации возможности удаленного визуального (фото и видео) мониторинга и управления устройствами (IOT) были использованы следующие научные результаты из диссертации Березкина Александра Александровича:

- 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;

- 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;

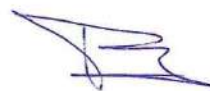
- метод уменьшения задержки передачи FPV-видеопотока беспилотных систем на основе предсказания будущих кадров нейросетевой предсказательной моделью, позволяющий уменьшить задержку передачи цифрового FPV-видеопотока с использованием нейросетевых видеокодеков в каналах информационного обмена фрагмента гибридной орбитально-наземной сети связи;

- 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.

Внедрение научных результатов Березкина Александра Александровича позволит оптимизировать облик систем информационного обмена для взаимодействия оператора с беспилотными системами, обеспечив превосходство над существующими решениями при достижении требуемых значений показателей качества, что стратегически важно для расширения применения беспилотных систем в космических сетях связи на фоне роста спроса на сверхдальние надежные каналы связи.

Председатель комиссии:

Заместитель Генерального директора –
начальник Службы информационных
технологий



П.С. Татаренко

Члены комиссии:

Директор Проектного офиса по
импортозамещению



Ю.В. Петров

Директор департамента развития и
сопровождения автоматизированных систем



В.М. Кривцов

«10» апреля 2026 г.



Акционерное общество
«Информационные спутниковые системы»
имени академика М.Ф. Решетнёва»



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Березкина Александра Александровича,

представленной на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Комиссия в составе:

председатель комиссии – Кочетков Пётр Владимирович, начальник отдела по космическим комплексам связи и ретрансляции,

член комиссии – Кургузов Роман Юрьевич, начальник отдела проектирования, разработки и системной интеграции наземных комплексов связи

установила, что в диссертационной работе Березкина Александра Александровича, к.т.н. на тему «Разработка и исследование комплекса моделей и методов по уменьшению задержки информационных потоков при взаимодействии с беспилотными системами в гибридных орбитально-наземных сетях связи» получены новые научные результаты, которые внедрены АО «РЕШЕТНЕВ» в 2023-2025 гг. при выполнении инициативной работы по теме 599:

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.
2. 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.
3. Метод адаптивного сжатия команд взаимодействия оператора с беспилотными системами на основе нейросетевых автокодировщиков и помехоустойчивых кодов,

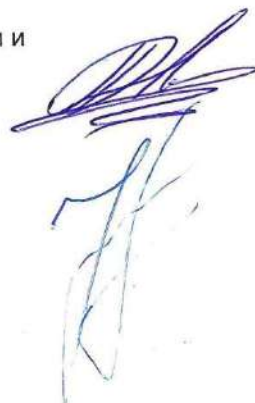
Исполнитель: Малинина Анастасия Игоревна
тел.: (3919) 76-40-01 доб. 12-43

позволяющий уменьшить требования к пропускной способности канала информационного обмена.

Применение в техническом проекте по теме 599 научных результатов Березкина Александра Александровича позволило уточнить требования к архитектуре проектируемой гибридной сети связи, а также к ее интеллектуальным узлам, при использовании нейросетевых методов сжатия и передачи видеопотока. Кроме того характеристики разработанных в диссертационной работе нейросетевых видеокодеков и кодеков команд взаимодействия оператора с беспилотными системами позволили обосновать минимальные требования к параметрам спутниковых каналов связи, используемых для управления БПЛА на всей территории российской Федерации.

Председатель комиссии:

Начальник отдела по космическим комплексам связи и ретрансляции



Кочетков П.В.

Член комиссии:

Начальник отдела проектирования, разработки и системной интеграции наземных комплексов связи

Кургузов Р.Ю.

Исполнитель: Малинина Анастасия Игоревна
тел.: (3919) 76-40-01 доб. 12-43



ООО «Конструкторское Бюро «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ»
 ОГРН 1067760700402 ИНН 7719613489 КПП 771901001
 Россия, 105187, г. Москва, ул. Вольная, д.39, стр.8, оф.410
 www.intep.pro info@intep.pro тел.: +7 985 763 45 26

№ 24-03/2026
 от 27.03.2026

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
 ООО «Конструкторское бюро
 «Интеллектуальные приборы»



А. Ю. Кондрашина

03 2026 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Березкина Александра Александровича на тему «Разработка и исследование комплекса моделей и методов по уменьшению задержки информационных потоков при взаимодействии с беспилотными системами в гибридных орбитально-наземных сетях связи», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук

ООО «Конструкторское бюро «Интеллектуальные приборы» настоящим актом подтверждает, что в диссертационной работе доцента кафедры Программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского Государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А.Бонч-Бруевича Березкина Александра Александровича на тему «Разработка и исследование комплекса моделей и методов по уменьшению задержки информационных потоков при взаимодействии с беспилотными системами в гибридных орбитально-наземных сетях связи» получены новые научные результаты, которые внедрены в 2024 – 2025 гг. в рамках выполнения работ по разработке интегрированных спутниковых радиолиний и производству системы подвижной спутниковой связи класса «Тень» для беспилотных авиационных систем (БАС), а также видеосистемы для устойчивого телеуправления удаленными и подвижными объектами.

При выполнении вышеуказанных работ были использованы следующие научные результаты из диссертации Березкина Александра Александровича:

– 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;

– 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;

– 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.

Использование указанных результатов позволит обосновать требования к видеокодекам, а также к системам дистанционного пилотирования БАС, в целом, при проектировании и развитии сетевой и спутниковой инфраструктуры.

Комиссия в составе:

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ КОМИССИИ

Директор департамента

ЧЛЕНЫ КОМИССИИ

Ведущий конструктор

Инженер

 Ланской В.В.

 Чурбанов А.Н.

 Мартынов С.В.

Экз. № 1

МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
(МИНОБОРОНЫ РОССИИ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ

16 ЦЕНТРАЛЬНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ОРДЕНА
КРАСНОЙ ЗВЕЗДЫ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ МАРШАЛА ВОЙСК СВЯЗИ
А.И. БЕЛОВА

141006, Московская область, г. Мытищи,
1-й Рупасовский переулок

«03» 04 2026 г. № 31/91

УТВЕРЖДАЮ

Начальник ФГБУ «16 ЦНИИ»

Минобороны России

Р.Панков

«03»



АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования

Березкина Александра Александровича, представленной на соискание
ученой степени доктора технических наук

Комиссия в составе:

председателя комиссии — заместителя начальника отдела — начальника лаборатории 31 отдела Неижмака А.В., членов комиссии — старшего научного сотрудника 311 лаборатории Карпухина Н.Н., младшего научного сотрудника 311 лаборатории Вдовченко Н.Ю., составила настоящий акт в том, что научные результаты, полученные Березкиным Александром Александровичем в диссертационной работе на тему «Разработка и исследование комплекса моделей и методов по уменьшению задержки информационных потоков при взаимодействии с беспилотными системами в гибридных орбитально-наземных сетях связи», внедрены в следующих научно-исследовательских работах Федерального государственного бюджетного учреждения

«16 Центральный научно-исследовательский испытательный ордена Красной Звезды институт имени маршала войск связи А.И.Белова» Министерства обороны Российской Федерации:

1. «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» – в НИР «Рассвет-СВК», в части разработки и унификации протоколов средств разведки и видеонаблюдения;

2. «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», «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» – в НИР «Рассвет-СВК», в проекте технических требований к перспективной комплексной интеллектуальной системе видеоконтроля объектов Вооруженных Сил Российской Федерации;

3. «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 ОКР «Штурм», в части разработки методики оценки помехозащищенности и разведзащищенности каналов управления

(информационный канал) в зависимости от применяемого диапазона частот, типа СКК (класса излучения), механизмов адаптации по мощности.

В диссертационной работе А.А. Березкина рассмотрен ряд важных теоретических и практических положений, имеющих существенное значение для проектирования и разработки систем дистанционного пилотирования БПЛА.

Также следует отметить практическую полезность разработанных в диссертационной работе видеокодеков, обладающих высокой степенью сжатия видеoinформации, внедрение которых в интересах Министерства обороны Российской Федерации позволит организовывать передачу видеопотоков, в том числе по низкоскоростным каналам связи и каналам связи низкого качества, организации видеоконференцсвязи, а также видеонаблюдения и видеотрансляции.

Председатель комиссии:

Заместителя начальника отдела –
начальник лаборатории 31 отдела

А. Неижмак

Члены комиссии:

Старший научный сотрудник 311 лаборатории

Н. Карпухин

Младший научный сотрудник 311 лаборатории

Н. Вдовченко

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
ИМ. ПРОФ. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(СПбГУТ)

Юридический адрес: набережная реки Мойки,
д. 61, литера А, Санкт-Петербург, 191186

Почтовый адрес: пр. Большевиков, д. 22, корп. 1,
Санкт-Петербург, 193232
Тел. (812) 3263156, Факс: (812) 3263159

<http://sut.ru>
E-mail: rector@sut.ru
ОКПО 01179934 ОГРН 1027809197635
ИНН 7808004760 КПП 784001001
ОКТМО 40909000

30.03.2016 № 48/54-99
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
д-р. техн. наук, доцент

Рабин
Алексей Владимирович



АКТ

о внедрении научных результатов,

полученных в диссертационной работе Березкина Александра Александровича
«Разработка и исследование комплекса моделей и методов по уменьшению
задержки информационных потоков при взаимодействии с беспилотными
системами в гибридных орбитально-наземных сетях связи»

Комиссия в составе: председателя – и.о. заведующего кафедрой ПИиВТ Краевой Е.В. и членов комиссии: доцента кафедры ПИиВТ, к.т.н. Бирюкова М.А. и доцента кафедры ПИиВТ, к.т.н. Пачина А.В., составила настоящий акт о том, что научные результаты, полученные в диссертационной работе Березкина Александра Александровича «Разработка и исследование комплекса моделей и методов по уменьшению задержки информационных потоков при взаимодействии с беспилотными системами в гибридных орбитально-наземных сетях связи», использованы:

1. При чтении лекций и проведении практических занятий для бакалавров по дисциплине «Предиктивная аналитика в сетях и системах связи» (Рабочая

Программа регистрационный номер №_25.22/168-Д, №_25.22/373-Д), разделы Программы:

Раздел 2. Классификация и регрессия. Статистические методы.

Раздел 3. Классификация и регрессия. Машинное обучение.

Раздел 4. Анализ и прогнозирование временных рядов.

2. При чтении лекций и проведении практических занятий для бакалавров по дисциплине «Разработка приложений искусственного интеллекта в киберфизических системах» (Рабочая Программа регистрационный номер №_25.22/286-Д, №_25.22/287-Д), разделы Программы:

Раздел 5. Введение в искусственный интеллект(ИИ). Общее определение ИИ.

Раздел 8. Нейронные сети.

3. При чтении лекций и проведении практических занятий для бакалавров по дисциплине «Математические методы и алгоритмы функционирования киберфизических систем» (Рабочая Программа регистрационный номер №_25.22/385-Д, №_25.22/470-Д), разделы Программы:

Раздел 1. Теоретические основы моделирования киберфизических систем.

Раздел 3. Моделирование сетей передачи данных.

Раздел 4. Алгоритмы обработки результатов моделирования.

Раздел 5. Планирование и проведение экспериментов с моделями киберфизических систем.

Раздел 7. Алгоритмы управления функционированием киберфизических систем.

Раздел 8. Оценивание рисков при управлении функционированием киберфизических систем. Заключение.

В указанных дисциплинах используются следующие новые научные результаты, полученные Березкиным Александром Александровичем в диссертационной работе:

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.

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.

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.

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.

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.

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.

Полученные научные результаты использованы при реализации особо значимого проекта индустриального центра компетенций (ИЦК) «Спутниковая связь» в решении прикладной задачи «Разработка программно-аппаратного комплекса управления БАС в гибридных орбитально-наземных сетях связи».

Председатель комиссии:

и.о. зав.кафедрой



Е.В. Краева

Члены комиссии:

к.т.н., доцент



М.А. Бирюков

к.т.н., доцент

А.В. Пачин

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2849970

**Система интеллектуального кодирования кадров
видеопотока при управлении беспилотными системами
от первого лица**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования "Санкт-
Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича" (RU)*

Авторы: *Березкин Александр Александрович (RU), Ченский
Александр Александрович (RU), Паршин Антон Александрович
(RU), Парфенов Дмитрий Дмитриевич (RU), Киричек Руслан
Валентинович (RU)*

Заявка № 2024133558

Приоритет изобретения 07 ноября 2024 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 01 ноября 2025 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 07 ноября 2044 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Сертификат 00e570e4f7add8d531b4b8818e75f29506
Владелец *Зубов Юрий Сергеевич*
Действителен с 04.09.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2855032

**Система информационного обмена для управления
беспилотными комплексами в орбитально-наземных
гибридных сетях связи**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования "Санкт-
Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича" (RU)*

Авторы: *Березкин Александр Александрович (RU), Паршин
Антон Александрович (RU), Кукунин Дмитрий Сергеевич
(RU), Киричек Руслан Валентинович (RU)*

Заявка № 2024110639

Приоритет изобретения 17 апреля 2024 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 23 января 2026 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 17 апреля 2044 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 00a570e47ad38d531b4b8818e75f29506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.07.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023682435

**Модуль управления беспилотными системами от
первого лица в орбитально-наземных гибридных сетях
связи**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Санкт-
Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»
(СПбГУТ) (RU)*

Авторы: *Березкин Александр Александрович (RU), Паршин
Антон Александрович (RU)*

Заявка № 2023680968

Дата поступления 11 октября 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 25 октября 2023 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов