

ОТЗЫВ

официального оппонента, д.т.н., доцента Карташевского Игоря Вячеславовича на диссертацию Березкина Александра Александровича на соискание ученой степени доктора технических наук 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» по специальности 2.2.15 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Современные телекоммуникации, а точнее инфокоммуникации, стали одним из решающих факторов в развитии любого государства во всех его областях: на производстве и в управлении, в науке и образовании, в медицине и социальной сфере. Согласно этому, глубокую модернизацию и трансформацию претерпевают сети связи, обеспечивающие доставку различных сообщений с требуемыми показателями качества. При этом необходимо отметить быстро нарастающее разнообразие пользователей современных сетей, в том числе за счет появления различных беспилотных систем, робототехнических платформ и автономных датчиков.

На протяжении последних нескольких лет, нагрузка, создаваемая при передаче широкополосного видеопотока, стала сопоставима с традиционным трафиком, и в настоящее время продолжает увеличиваться опережающими темпами. Согласно прогнозам ведущих аналитических агентств (ITU-R, Cisco VNI), к 2030 году мировой парк беспилотных авиационных систем (БАС) превысит 100 миллионов единиц, при этом доля трафика сверхвысокой четкости (4K/8K) в реальном времени в общем объеме данных вырастет в геометрической прогрессии, достигая петабайтных значений в секунду.

При этом как пользователи, так регуляторы и организации по стандартизации предъявляют все более жесткие требования к ресурсам сетей связи по задержкам и пропускной способности, существенно отличающиеся от тех, которые выдвигаются к услугам по передаче текстовой и речевой информации. Для обеспечения прецизионного взаимодействия оператора с беспилотной системой в режиме FPV (First Person View) задержка «сквозного»

канала (End-to-End Delay) не должна превышать порогового значения в 100–140 мс, в то время как в современных гибридных сетях суммарная задержка, обусловленная многоскачковой ретрансляцией и обработкой в буферах, часто превышает 150–300 мс, что делает такое взаимодействие критически нестабильным.

В этой связи возникла необходимость в новой стратегии по распределению ресурсов сети, и, в частности, для нового подхода к организации гибридных орбитально-наземных сегментов связи. Фундаментальное противоречие между классической теоремой Шеннона-Хартли о предельной емкости и стохастической природой нестационарных каналов в гибридных сетях требует перехода от детерминированных методов управления к адаптивным. Развитие представлений по минимизации задержек привело к появлению методов нейросетевого кодирования, позволяющих аппроксимировать сложные зависимости в видеопотоке и достигать выигрыша в сжатии до 30–50% при сохранении семантической ценности кадра, а для обеспечения глобального покрытия возникла концепция интегрированных сетей SAGSIN (Space-Air-Ground-Sea Integrated Networks). Все это вместе привело к постановке целого ряда новых и весьма значимых научных задач, решение которых должно обеспечить обоснованное комплексное преобразование архитектуры систем информационного обмена на основе гибридных сетей связи и предоставление услуг операторам беспилотных систем с использованием технологий FPV.

В данном контексте, тема диссертационной работы Березкина А.А. представляется, несомненно, **актуальной** и перспективной, имеющей научное и практическое значение.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Работа содержит 523 страницы машинописного текста, список литературы включает 491 наименование. Все материалы, оформленные надлежащим образом, являют собой законченный труд с ясно сформулированной задачей и ее решением. Помимо этого, представлены рекомендации по практическому использованию авторских наработок. Четко и понятно сформулирована научная новизна и приведены доказательства,

подтверждающие достоверность полученных результатов.

Список используемой литературы является достаточно полным и отражает не только достижения автора диссертации, но и ряда других исследователей, в том числе зарубежных, работающих в данном или близком направлениях. Публикации автора доказывают актуальность и научную значимость исследуемых им проблем. Помимо этого, это подчеркивает широкую апробацию полученных Березкиным А.А. результатов среди известных профессионалов и научной общественности на различных конференциях и симпозиумов. Представленный автореферат диссертации, с учетом требований по его объему, убедительно отражает полученные основные выводы и наработки диссертационного исследования и может служить надежным источником информации, характеризующим выполненную научную работу.

Во **введении** соискатель раскрывает фундаментальное противоречие между потребностью в сверхмалых задержках информационных потоков для управления беспилотными системами и текущими ограничениями гибридных сетей связи. Автор обосновывает переход от классических методов обработки сигналов к интеллектуальным нейросетевым алгоритмам сжатия видеоданных. Сформулированная научная проблема характеризуется высокой степенью новизны, так как она объединяет задачи аэрокосмической связи с современными генеративными моделями машинного обучения, что крайне важно для развития отечественных технологий БАС.

В **первой главе** проводится глубокое исследование текущего состояния взаимодействия беспилотных систем и выявление факторов, вызывающих критические задержки в каналах передачи визуальной информации. Автор анализирует эволюцию архитектур SAGSIN и стандарты неземных сетей (NTN) в контексте национальных приоритетов развития связи. Особое внимание уделяется потенциалу глубокого обучения как инструмента преодоления «бутылочного горлышка» пропускной способности каналов, что создает теоретический фундамент для последующей разработки проприетарного стека протоколов и алгоритмов кодирования.

Вторая глава работы посвящена проектированию новой архитектуры

информационного обмена, адаптированной под нужды передачи информационных потоков с малой задержкой между оператором и беспилотной системой. Соискатель предлагает оригинальный прикладной протокол информационного обмена FPV-CTVP, который обеспечивает бесшовную интеграцию бортовых и наземных вычислительных ресурсов. В главе детально проработаны механизмы кросс-слойной оптимизации для адаптации к меняющимся условиям в каналах информационного обмена, позволяющие минимизировать джиттер и обеспечить стабильность видеопотока даже в условиях нестационарных параметров спутникового сегмента, что подтверждается результатами математического моделирования.

В **третьей главе** Березкин А.А. переходит к практической реализации методов нейросетевого сжатия FPV-видеопотока, предлагая использовать вариационные автокодировщики, диффузионные модели и нейросетевые модели сжатия контекста видеoinформации. Научный интерес представляет концепция кодека сжатия контекста, который фокусирует вычислительные ресурсы на наиболее значимых для оператора фрагментах изображения, оперируя статистикой его внутреннего латентного пространства. Предложенные методы позволяют существенно сократить объем передаваемых данных без потери семантической целостности видеокадра, что является значительным шагом вперед по сравнению с традиционными стандартами сжатия.

В **четвертой главе** рассматривается задача сокращения задержек путем внедрения алгоритмов экстраполяции и синтеза будущих кадров непосредственно на стороне оператора. Автор разрабатывает метод на основе нейросетевых моделей, способных предсказывать динамику сцены на основе анализа корреляционных связей предыдущих видеокадров в латентном пространстве признаков нейронной сети. Этот подход фактически позволяет нивелировать физические задержки распространения цифрового сигнала в гибридной сети связи и обеспечивая оператору субъективное ощущение мгновенного отклика системы управления.

В рамках **пятой главы** решается проблема оптимизации передачи команд взаимодействия оператора (команд ручного управления, FPV-команды) с

беспилотной системой в условиях дефицита сетевого ресурса. Соискатель предлагает методы агрегации и интеллектуального сжатия FPV-команд, которые позволяют снизить нагрузку на обратный канал связи. Разработанный нейросетевой кодек команд взаимодействия обеспечивает дополнительное их сжатие, что гарантирует сохранение контроля над беспилотным аппаратом даже при существенном снижении пропускной способности канала связи.

Заключительная **шестая глава** посвящена апробации предложенных решений в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным. Соискатель описывает комплексную методику оценки эффективности БАС и приводит результаты натурных испытаний и экспериментов на базе реальных каналов связи с использованием специализированного оборудования. Полученные данные подтверждают превосходство разработанных методов над существующими аналогами, а акты внедрения в деятельность ведущих отраслевых предприятий свидетельствуют о высокой практической востребованности результатов исследования.

Теоретическая значимость диссертационной работы А.А. Березкина заключается в развитии научно-методического аппарата построения и оценки каналов информационного обмена для взаимодействия оператора с беспилотными системами в гибридных орбитально-наземных сетях связи. Автором разработан новый комплекс взаимосвязанных моделей и методов, учитывающих специфику прикладного уровня FPV.

В работе получили развитие такие тематики, как модели каналов информационного обмена, устанавливающие зависимость между параметрами КИО и показателями эффективности их функционирования, с определением законов распределения задержек на основе натурных экспериментов, а также методы нейросетевого сжатия FPV-видеопотока на основе вариационных автокодировщиков и глубокого сжатия контекста, метода предсказания будущих кадров и метода адаптивного сжатия и агрегации команд взаимодействия оператора, основанные на обработке данных во внутреннем латентном пространстве признаков нейронной сети, что расширяет существующие представления о возможностях уменьшения задержки информационных потоков.

Существенное теоретическое значение имеет предложенный переход к многокритериальной оценке эффективности, где вместо традиционных частных критериев используется вероятность достижения комплекса целей функционирования беспилотной системы. Это формирует теоретическую основу для дальнейшего развития систем FPV в наземных и спутниковых сегментах гибридных сетей связи.

Практическая значимость работы заключается в создании конкретных технических решений, основными из которых являются:

- разработан нейросетевой видеокодек для кодирования FPV-видеопотока с низкой задержкой в гибридной орбитально-наземной сети связи, а также протокол прикладного уровня FPV-CTVP для управления информационными потоками беспилотной системы;
- достигнуто значительное снижение задержки и экономия пропускной способности как в геостационарном, так и в негеостационарном сегментах гибридной орбитально-наземной сети связи;
- разработана комплексная методика оценки эффективности функционирования системы информационного обмена, позволяющая оценить вероятность попадания показателей эффективности каналов информационного обмена в область заданных требований и обосновать параметры системы.

Результаты работы внедрены в практическую деятельность ФГУП «Космическая связь», АО «РЕШЕТНЕВ», ООО «КБ «Интеллектуальные приборы»», ФГБУ «16 ЦНИИИ» МО РФ, а также в учебный процесс СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, что подтверждается актами внедрения.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, представленных в работе, подтверждаются использованием фундаментального математического аппарата, включая методы теории информации, математической статистики и современные архитектуры глубокого обучения. Теоретические выводы автора логически непротиворечивы и базируются на апробированных моделях стохастических каналов связи. Высокая степень достоверности также подтверждается результатами натурных экспериментов, в ходе которых была продемонстрирована сходимость теоретических данных с практическими результатами. Результаты

диссертационной работы получили признание в профильных ведомствах, что нашло свое отражение в актах реализации и свидетельствах на разработанное программное обеспечение (в частности, на программные комплексы нейросетевого кодирования и протоколы управления БАС).

Отмечая значительную работу автора и достигнутые им результаты, имеющие научную ценность и практическую значимость, следует указать и ряд замечаний:

1. Первая глава работы (аналитический обзор) занимает 117 страниц (стр. 29–145), что составляет около четверти общего объема текста. При этом Глава 5, в которой рассматриваются критически важные для FPR взаимодействия с БАС методы сжатия и агрегации команд, изложена всего на 29 страницах (стр. 334–362). Такой перекоп в сторону обзора снижает удельный вес описания собственных прикладных результатов автора.

2. В структуре второй главы наблюдается смысловое наложение подразделов. Пункт 2.2.2 на стр. 160 называется «Постановка задачи и описание модели СИО», а пункт 2.2.4 на стр. 172 – вновь «Постановка задачи». Это создает избыточность и затрудняет понимание этапов формализации научной проблемы.

3. Автор утверждает, что распределение задержки прикладного уровня подчиняется закону усеченного двухпараметрического бета-распределения (формула 2.42). Для проверки гипотезы используются критерии Пирсона и Колмогорова-Смирнова. На стр. 181 автор указывает: «В результате проверки была получена величина статистики расхождения $\chi^2 = 3,94$. Согласно табличным значениям, соответствующая вероятность составила приблизительно 0,56». Однако при выборке в 10 000 итераций (как указано на стр. 178) использование классического критерия χ^2 требует строгого обоснования количества интервалов группирования (числа степеней свободы), которое в тексте опущено. Без указания числа степеней свободы и способа разбиения на интервалы значение $\chi^2=3,94$ не несет научного смысла и не позволяет однозначно подтвердить гипотезу.

4. В разделе 2.2.1 «Показатели эффективности СИО» автор приводит обширный перечень метрик оценки качества, включая формулы для

косинусного сходства (формула 2.4) и расстояния Хэмминга (формула 2.5). В тоже время, на стр. 158 автор сам же справедливо отмечает, что «Косинусное расстояние и расстояние Хэмминга менее предпочтительны для оценки качества передаваемого видеопотока...», так как они применяются в криптографии и поиске. Возникает закономерный вопрос о целесообразности включения данных метрик и их математического описания в основной текст главы, если в дальнейшем синтезе моделей (автор использует в основном DISTs и SSIM) они не применяются. Это искусственно перегружает работу.

5. В разделе 4.2 «Метод предсказания будущих кадров видеопотока...» автор формулирует Теорему 4.1 («Условие эффективности сокращения задержки») и приводит условие (формула 4.13). При доказательстве Теоремы 4.1 (стр. 318–319) соискатель вводит текстовое допущение: «Для простоты будем считать, что T_3^B одинаково для реального и предсказанного кадров...». На базе этого допущения строятся формулы моментов времени (4.15 – 4.18). Однако, как автор сам описывал в Главе 2 (формула 2.34), сетевая задержка включает в себя задержку в очередях и другие параметры, имеющие в гибридных (и особенно спутниковых) сетях выраженную стохастическую природу (джиттер). Допущение о том, что время доставки реального и предсказанного кадров будет строго одинаковым (детерминированным), является сильным идеализационным упрощением. В реальных условиях флуктуаций канала это может привести к десинхронизации упреждающего видеопотока с реальной телеметрией, что ставит под сомнение надежность метода в условиях сильного джиттера.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы А.А. Березкина. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на высоком теоретическом уровне решена научная проблема снижения 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, имеющая важное хозяйственное значение.

Таким образом, диссертационная работа Березкина А.А. 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» полностью соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства РФ 24 сентября 2013 г. N 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а её автор Березкин Александр Александрович заслуживает присвоения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

21.09.2026г.

Официальный оппонент,

Заведующий научно-исследовательской лабораторией «Инновационные проекты» ПГУТИ

д.т.н., доцент



И.В. Карташевский

Сведения об оппоненте:

Карташевский Игорь Вячеславович, гражданин Российской Федерации, доктор технических наук по специальности 05.12.13 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций», заведующий научно-исследовательской лабораторией «Инновационные проекты», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики». Адрес: ул. Льва Толстого, д. 23, г. Самара, 443010.

Телефон: (927) 013-15-13, E-mail: ivk@psuti.ru

Подпись Карташевского И.В. заверено
Ученый секретарь Ученого совета ПГУТИ,

к.э.н., доцент



Н.А. Стефанова