ОТЗЫВ НАУЧНОГО КОНСУЛЬТАНТА

Киричка Руслана Валентиновича

на диссертацию 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», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.15. – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Актуальность исследования.

Стремительное расширение сфер применения беспилотных систем, включая беспилотные авиационные системы, автономные наземные и морские платформы, закономерно сопровождается ростом требований к телекоммуникационному обеспечению процессов управления и мониторинга. Наиболее жесткие требования формируются в режиме дистанционного взаимодействия, т.е. управления от первого лица (FPV), при которых оператор принимает решения преимущественно на основе поступающего видеопотока и путём отправки команд взаимодействия корректирует движение удалённого объекта. В этих условиях задержки передачи видеоданных и команд, их вариативность, а также рассинхронизация информационных потоков непосредственно влияют на точность маневрирования, безопасность применения и вероятность достижения цели функционирования беспилотной системы.

Особую значимость рассматриваемой проблеме придает переход к гибридным орбитально-наземным сетям связи, развитие которых соответствует современным направлениям построения отечественной информационной инфраструктуры с интеграцией спутниковых и наземных сегментов для обеспечения глобального покрытия и устойчивости связи, что является ключевым компонентом Стратегии развития отрасли связи Российской Федерации на период до 2035 года. Вместе с тем стоит отметить, что

включение спутникового сегмента, особенно на геостационарных и средних орбитах, приводит к существенному росту задержек, ограничению доступной пропускной способности и усложнению обеспечения требуемого перцептивного качества FPV-видео. В этой связи диссертационная работа Березкина А.А., направленная на разработку комплекса моделей и методов по уменьшению задержки информационных потоков при взаимодействии с беспилотными системами в гибридных орбитально-наземных сетях связи, является актуальной, своевременной и имеет существенное значение для развития теории и практики телекоммуникационных систем.

Следует отметить, что соискателем корректно сформулированы цель и задачи исследования, охватывающие анализ требований к дистанционному взаимодействию, разработку архитектуры системы информационного обмена, построение моделей каналов информационного обмена беспилотных систем для наземного и спутникового сегментов, разработку методов нейросетевого сжатия видеоинформации и команд взаимодействия оператора, а также экспериментальную проверку предложенных решений. Такая постановка исследования свидетельствует о его системном характере и методологической целостности.

Архитектурные решения (включая прикладные механизмы управления информационными потоками) обоснованы через вероятностную модель эффективности и подтверждены экспериментально измеряемыми показателями на уровне приложения. Существенным достоинством является корректная постановка требований к перцептивному качеству восстановленного FPV-видеопотока для решаемой задачи: соискатель демонстрирует понимание ограничений традиционных объективных метрик (PSNR/SSIM) применительно к нейросетевым видеокодекам и связывает требования к такому качеству с вероятностью достижения цели функционирования беспилотной системы, что снижает субъективность экспертных оценок и повышает воспроизводимость результатов. Резюмируя, можно сказать, что в диссертации сформулирована и решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение,

результаты исследования должны иметь хорошие перспективы, поскольку широкомасштабное внедрение механизмов взаимодействия с беспилотными системами на значительном удалении от оператора насущно необходимо в краткосрочной перспективе, актуальность исследования при этом не вызывает сомнений.

Научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

Научная новизна диссертационной работы состоит в разработке и исследовании целостного комплекса моделей, методов и архитектурных решений, ориентированных на снижение задержки информационных потоков на уровне приложения в каналах информационного обмена при взаимодействии с беспилотными системами в гибридных орбитально-наземных сетях связи. В отличие от известных работ, в диссертации проблема уменьшения задержки рассматривается не фрагментарно, а как многосвязанная задача, включающая видеопоток, команды взаимодействия, прикладные протоколы обмена, особенности спутникового сегмента и критерии эффективности функционирования беспилотных систем.

К числу наиболее существенных научных результатов следует отнести разработанная архитектура системы информационного обмена для взаимодействия оператора с беспилотными системами, учитывающая в своем составе спутниковые группировки на геостационарной и низкой околоземной орбитах. Нейросетевой подход с замкнутым контуром статистического мониторинга показателей эффективности функционирования системы информационного обмена, предложенный соискателем, позволил в полной мере задействовать механизмы адаптации информационных потоков к изменяющимся условиям в каналах информационного обмена, что в конечном итоге позволило задействовать спутниковые сети связи на геостационарной орбите в контуре такого взаимодействия, снизив в свою очередь задержки передачи FPV-видеопотока до уровней, соизмеримых с задержками в наземном сегменте фрагмента гибридной сети связи. Такая новая архитектура является сутью первого научного результата.

Такой масштабный подход к изменению архитектуры и, как было сказано ранее, включение космического сегмента в контур FPV-взаимодействия с беспилотными системами в гибридных сетях связи, требует разработки модельного аппарата каналов информационного обмена, что является вторым научным результатом. Разработанные соискателем модели таких каналов позволили установить зависимость между параметрами и показателями эффективности их функционирования. Следует отметить, что параметры моделей обоснованы на основе серии натурных экспериментов над реальными каналами связи как наземного, так и спутникового сегментов. Это закладывает важную основу для оценки пригодности существующих систем взаимодействия оператора с беспилотными системами для использования в среде создаваемой гибридной сети связи. Также полученные результаты нашли отражение далее в шестом научном результате.

Самостоятельную и важную научную ценность имеют разработанные соискателем методы нейросетевого сжатия FPV-видеопотока на основе нейросетевых моделей глубокого обучения различных архитектур, что является третьим научным результатом. Автор предлагает перейти от хорошо изученного пиксельного пространства во внутреннее многомерное латентное признаковое пространство нейронной сети, в котором описательная часть сцены (полетной обстановки) формируется в объектах более высокого порядка. Это позволяет сохранить самую важную информацию о геометрии объектов, что важно для достижения цели функционирования беспилотной системы, и задействовать потенциал для существенного сжатия видеопотока. В итоге такой переход позволил использовать низкоскоростные каналы связи для передачи информационных потоков беспилотных систем, что ранее было недоступно для стандартных видеокодеков. Все полученные результаты были подтверждены автором экспериментально на базе реальных каналов связи, что, безусловно, добавляет им практической ценности.

Четвертый научный результат посвящен проблеме уменьшения задержки передачи цифрового FPV-видео через космический сегмент фрагмента

гибридной сети связи. Как известно, спутниковые каналы связи на геостационарной орбите характеризуются большой задержкой распространения, что влечет за собой также увеличение задержек при спутниковом цифровом видеовещании, например, по стандарту DVB-S2. Автором предложен метод уменьшения задержки FPV-видеопотока посредством нейросетевого предсказания кадров, позволяющий компенсировать не только задержки сериализации и ожидания в очередях, но и в определенной степени задержку распространения цифрового FPV-видеопотока, что особенно существенно сказывается при передаче данных через спутниковый сегмент гибридной сети связи. Данный подход является частью адаптационного механизма в рамках архитектуры информационного обмена, отраженного в первом научном результате, что, безусловно, говорит о согласованности научных результатов между собой. В рамках экспериментальной части, автор убедительно показал, что такое предсказание возможно в том числе при различной динамике FPV-видео.

Важным показателем взаимодействия оператора с беспилотной системой в режиме FPV также является рассинхронизация информационных потоков (FPV-видеопоток, команды взаимодействия). Это напрямую влияет на восприятие удаленной обстановки оператором, а также адекватность и своевременность передачи информационного потока команд воздействия в направлении беспилотной системы с его стороны. Ужесточение требований к полосе пропускания канала связи для передачи FPV-видеопотока должно сопровождаться такими же жесткими требованиями и к каналу передачи информационного потока команд взаимодействия оператора с беспилотной системой. В диссертации разработан метод адаптивного сжатия и агрегации команд взаимодействия оператора на основе нейросетевых автокодировщиков и помехоустойчивого кодирования, ориентированный на функционирование в каналах с ограниченной пропускной способностью, что представляет собой пятый научный результат. Автором предлагается расширить подход, описанный в третьем научном результате, и на пространство команд

взаимодействия, где использование механизмов помехоустойчивого кодирования позволяет сжимать данные со слабой корреляционной зависимостью. Применение помехоустойчивых кодов к латентному признаковому пространству является существенно новым и ранее не описанным в научной литературе. Тут следует отметить, что соискатель заложил основу для дальнейших исследований в области латентных признаковых пространств применительно к задачам взаимодействия с беспилотными системами в режиме FPV, что, безусловно, является значимым научным направлением.

Завершает предложенный научный комплекс разработанная методика многокритериальной оценки эффективности, в которой в качестве интегрального показателя используется вероятность достижения комплекса целей функционирования беспилотной системы, что является шестым научным результатом. Предложенная в диссертации методика позволяет оценить вероятность попадания значений показателей эффективности в область заданных требований к качеству каналов информационного обмена и на основе ее оценки обосновать облик системы информационного обмена. Использование второго научного результата в предложенном комплексном подходе позволяет произвести объективную сравнительную оценку существующих и проектируемых систем при функционировании в различных гибридных каналах информационного обмена. Такая оценка позволяет обосновать параметры систем FPV-взаимодействия и оценить их пригодность для функционирования в гибридной сети связи, что дает возможность более эффективного использования ресурсов разработчиков таких систем, в том числе на уровне государства.

Существенной научной новизной обладает подход к обоснованию требований к перцептивному качеству FPV-видеопотока на уровне приложения, в рамках которой требования к качеству определяются не экспертно, а на основе вероятности достижения цели функционирования беспилотной системы. Такой подход представляется принципиально важным,

поскольку позволяет перейти от использования ограниченно применимых универсальных метрик к функционально значимой оценке перцептивного качества восстановленного видеопотока при взаимодействии оператора с реальной беспилотной системы. В теоретическом плане автор предлагает рассматривать достижение цели функционирования беспилотной системы не изолированно, а как важный показатель, влияющий на облик всей архитектуры информационного обмена. Такой подход является частью предложенной комплексной методики.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в развитии научных основ построения систем информационного обмена для взаимодействия с беспилотными системами в гибридных орбитально-наземных сетях связи, в расширении методов оценки эффективности телекоммуникационных систем реального времени, а также в развитии подходов к нейросетевому сжатию видеоинформации и команд взаимодействия оператора для задач контроля беспилотных систем различного назначения. Полученные результаты формируют научно обоснованную основу для дальнейших исследований в области связи для удалённого и распределенного управления беспилотными системами.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в первую очередь в снятии барьеров на использования спутниковых каналов связи с большими задержками в задачах дистанционного взаимодействия с беспилотными системами в неограниченном масштабе, а также доведении разработанных решений до уровня, пригодного для применения при проектировании таких систем в разнородных (гибридных) каналах связи и возможности их использования в различных отраслях народного хозяйства.

Заслуживает положительной оценки и то обстоятельство, что результаты диссертационного исследования доведены до практического использования в профильных отраслевых организациях, в том числе в ФГУП «Космическая связь», АО «РЕШЕТНЕВ», ООО «КБ «Интеллектуальные приборы», ФГБУ «16 ЦНИИИ» Минобороны России и СПбГУТ. Наличие актов реализации и

патентных материалов подтверждает прикладную востребованность и научную зрелость полученных результатов.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и результатов, сформулированных в диссертационной работе.

Обоснованность научных положений, выводов и результатов, сформулированных в диссертации, подтверждаются корректным использованием математического аппарата, масштабным натурным и имитационным моделированием, большим числом опубликованных работ в Российской Федерации и за рубежом, обсуждением результатов диссертации на Российских и Международных научно-технических конференциях.

Важным достоинством диссертации является согласованность теоретических результатов, архитектурных решений и результатов экспериментальной апробации. Выводы по разделам логически следуют из представленного материала, количественные оценки имеют прикладной смысл, а предложенные решения сопоставлены с существующими подходами. Существенно и то, что основные положения диссертации апробированы на российских и международных научно-технических конференциях, а результаты исследования отражены в значительном числе публикаций, включая статьи в изданиях из перечня ВАК и работы, индексируемые в международных базах цитирования.

Соискатель Березкин А.А. проявил высокий уровень самостоятельности и научной квалификации. В ходе выполнения диссертационной работы соискатель продемонстрировал умение формулировать и решать сложные научно-технические задачи, грамотно сочетать методы теоретического анализа, математического и имитационного моделирования с экспериментальной проверкой, а также аргументированно представлять и интерпретировать полученные результаты.

Отмечая высокую завершенность исследования, целесообразно указать на некоторые направления дальнейшего развития результатов:

1. Расширение статистической базы измерений в дополнительных сценариях использования беспилотных систем;

2. Развитие адаптивных механизмов выбора режимов кодирования/ предсказания в зависимости от текущего состояния канала;

3. Расширение анализа совместного влияния задержки, потерь и качества на показатели безопасности при взаимодействии оператора с беспилотной системой.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают научной и практической ценности диссертации.

Выводы: Диссертационная работа 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» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение для развития систем, сетей и устройств телекоммуникаций и заключающаяся в разработке комплекса моделей каналов информационного обмена и методов по уменьшению задержки информационных потоков в каналах информационного обмена при взаимодействии с беспилотными системами в условиях значительных задержек передачи данных в спутниковых каналах связи космического сегмента гибридных орбитально-наземных сетей связи.

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.2.15 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций по пунктам 1, 2, 3, 4, 5, 11, 18 и 19, а по своему содержанию, научной новизне, теоретической и практической значимости, степени обоснованности и достоверности полученных результатов отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, в том числе требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842. Автореферат адекватно отражает основное содержание диссертационной работы.

Считаю, что Березкин Александр Александрович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

31.03.2026

Научный консультант,
Ректор СПбГУТ,
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки Санкт-Петербурга [redacted] Р.В. Киричек

Подпись (-и) руки Р.В. Киричек
заверяю
[redacted]ния персоналом
Д. Смородинцева 01.04.26 г.

Организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)
Юридический адрес: наб. р. 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, e-mail: rector@sut.ru, web-сайт: www.sut.ru