

Анализ задержек передачи видеопотока FPV-управления БАС в мобильных сетях при использовании нейросетевых кодеков

А. А. Березкин¹, А. А. Ченский², Р. В. Киричек³

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

¹berezkin.aa@sut.ru, ²chenskii.aa@sut.ru, ³kirichek@sut.ru

Аннотация. В сетевых системах реального времени предъявляются жесткие требования к сетевой задержке. К таким системам относится управление беспилотными авиационными системами от первого лица. Для проверки удовлетворения системой реального времени требованиям необходимо измерение сетевой задержки. Существует ряд программных средств измерения сетевой задержки на сетевом и транспортном уровнях модели OSI. Тем не менее, данные средства не учитывают аспектов работы протоколов прикладного уровня. Передача кадров видеопотока при управлении беспилотными авиационными системами относится к сетевым системам реального времени. Соответственно, для измерения задержек кадров видеопотока требуются специализированные программные средства, учитывающие составляющую задержки прикладного уровня. В настоящей работе анализируются задержка и потери кадров видеопотока, сжатых нейросетевым кодеком, в зависимости от их размера при передаче данных через мобильные сети связи. Результаты позволяют оценить актуальность кадров видеопотока, сжатых нейросетевыми кодеками, при управлении беспилотными системами на большие расстояния.

Ключевые слова: сетевая задержка; LTE; видеопоток; управление от первого лица; беспилотное воздушное судно; беспилотная авиационная система; задержка видеопотока

I. ВВЕДЕНИЕ

К системам реального времени предъявляются требования по максимально допустимой задержке выполнения операций [1, 2]. В системах реального времени, взаимодействие между элементами которых обеспечивается сетями с коммутацией пакетов, необходимо учитывать сетевую задержку. К таким системам относится, в частности, управление беспилотными воздушными судами (БВС) [3] от первого лица (FPV-управление).

FPV-управление активно используется во множестве сфер для выполнения ряда задач, которые невозможно или сложно автоматизировать [4]. В рамках FPV-управления выделяется две линии связи между БВС и станцией внешнего пилота (СВП): линия связи с землёй и линия связи с бортом. По линии связи с землёй проводится передача кадров видеопотока с БВС на СВП. По линии связи с бортом проводится передача команд управления с СВП на БВС.

Беспилотные авиационные системы (БАС) содержат: БВС, СВП, канал связи между БВС и СВП. Канал связи делится на линию связи с землёй и линию связи с бортом.

В последние годы проводились активные исследования [4–8] нейросетевых кодеков, которые предназначены для передачи кадров видеопотока в системах FPV-управления БАС по сетям связи с ограниченной пропускной способностью. К сетям связи с ограниченной пропускной способностью относятся гибридные орбитально-наземные сети связи (ГОНСС), состоящие из наземного и космического сегментов.

Космический сегмент [9, 10] используется для FPV-управления в удалённых областях, в которых отсутствует покрытие мобильными сетями либо доступны только устаревшие сети связи, не отвечающие требованиям FPV-управления по качеству обслуживания. Как указывается в Стратегии развития отрасли связи Российской Федерации до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 24 ноября 2023 г. №3339-р, создаваемые ГОНСС потенциально позволят обеспечить возможность FPV-управления БАС в режиме реального времени на всей территории Российской Федерации.

В качестве сетей наземного сегмента ГОНСС для FPV-управления применяются мобильные сети связи. В настоящей работе рассматриваются задержки FPV-управления в мобильных сети связи третьего (3G) [11] и четвёртого (LTE) [12] поколений.

В то же время, как показано в [13], использование нейросетевых кодеков для обеспечения высокой степени сжатия кадров FPV-видеопотока для передачи их по каналам ГОНСС требует значительных вычислительных ресурсов и приводит к дополнительным задержкам FPV-управления. В свою очередь использование стандартных кодеков приводит к низкой степени сжатия кадров FPV-видеопотока и также приводит к задержке.

Это приводит к проблеме оценки задержки кадров видеопотока в зависимости от степени сжатия кадров (применительно как к стандартным, так и к нейросетевым кодекам), которой и посвящена настоящая работа. В ней проводится измерение прикладных задержек видеопотока без учёта времени кодирования и декодирования нейросетевыми кодеками, которые зависят от конкретного оборудования исполнения нейросетевых моделей.

Научная статья подготовлена в рамках прикладных научных исследований СПбГУТ, регистрационный номер 1024032900105-1-2.2.4;2.2.5;2.2.6 в ЕГИСУ НИОКТР.

Текущая работа является продолжением исследования [14], в котором проводились исследования по измерению задержки передачи кадров FPV-видеопотока в канале информационного обмена (КИО) на различных расстояниях между БВС и СВП на территории Российской Федерации. Настоящая работа выступает развитием исследования в части международной локации, а именно измерение задержки передачи кадров FPV-видеопотока в КИО при передаче видеопотока на большое расстояние.

II. НЕЙРОСЕТЕВОЙ КОДЕК

Обобщенная структура нейросетевого кодера представлена на рис. 1 (кодер) и рис. 2 (декодер).

На вход нейросетевого кодера поступает кадр видеопотока f . Он последовательно: интерполируется в разрешение 512x512 методом суперсэмплинга (SSAA); кодируется вариационным автокодировщиком KL-f16; квантуется (Q) и сжимается (C) в сжатую бинарную последовательность bin .

На вход нейросетевого декодера поступает сжатая бинарная последовательность bin . Она последовательно: декомпрессируется (DC), деквантуется (DQ), декодируется вариационным автокодировщиком KL-f16 и интерполируется в исходное разрешение методом бикубической интерполяции (BQ).

Дополнительно в нейросетевых кодере и декодере к интерполированному кадру x тензору латентного пространства признаков (ЛПП) T , применяется алгоритмы подавления артефактов (AS).

III. FPV-УПРАВЛЕНИЕ КАК СИСТЕМА С УПРАВЛЕНИЕМ

FPV-управление может быть представлено как система с управлением по состоянию с неполной информацией [15] (рис. 3), где: N – данные полётной обстановки; Y – изменение полётной обстановки вследствие изменения положения; Y' – кадры видеопотока, передающиеся с $S1$ (объекта управления) БАС по линии связи с землёй на $S2$ (управляющую систему) СВП, искажённые вследствие передачи по сети связи, а также сжатия и восстановления; X – команды управления БВС, которые также могли исказиться.

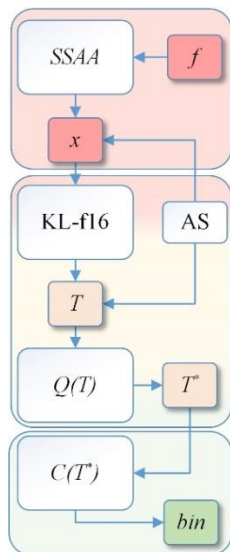


Рис. 1. Нейросетевой кодер

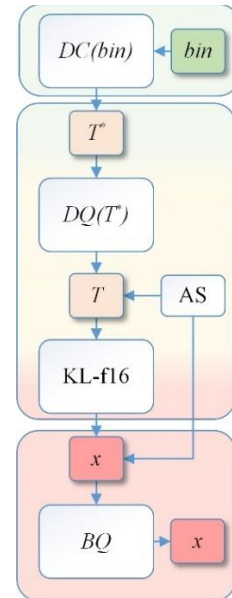


Рис. 2. Нейросетевой декодер

При этом кадры видеопотока частично (в силу искажений и ограниченности обзора камеры) отражают полётную обстановку [15]:

$$Y' \subset Y.$$

Операции управления оцениваются по трём показателям качества: результативность, ресурсоёмкость и оперативность [15]. Результативность определяется как соответствие процесса изменения состояний БАС z поставленной цели. В рамках FPV-управления – соответствие изменения положения БВС в пространстве в рамках выполнения полётной задачи. Ресурсоёмкость в рамках FPV-управления определяется как потребляемые для формирования, передачи и реализации команд управления X ресурсы. К этим ресурсам относятся: заряд батарей БАС, топливо, механический ресурс аппаратных компонентов БАС (износ), сетевая полоса пропускания, вычислительные ресурсы БАС и СВП. Оперативность в рамках FPV-управления определяется как соответствие передаваемых команд управления X текущей обстановке.

Пусть t_1 – время полётной обстановки N_1 , а t_2 – время поступления команд управления на основе данной полётной обстановки X_1 . Тогда оперативность FPV-управления характеризуется временем задержки кадров видеопотока (прикладного уровня) T_s^B :

$$T_s^B = t_1 - t_2 = t_{\text{КИО}} + t_C + t_D \text{ (мс)},$$

где t_C – задержка работы кодера, $t_{\text{КИО}}$ – задержка передачи кадра видеопотока в КИО, t_D – задержка работы декодера. Задержка измеряется в мс.

В свою очередь задержка передачи кадра видеопотока в КИО определяется по формуле [14]:

$$t_{\text{КИО}} = t_{\text{enc}} + t_N + t_{\text{dec}} \text{ (мс)},$$

где t_N – сетевая задержка кадров видеопотока между СВП и БВС, t_{enc} – задержка инкапсуляции полезной нагрузки в пакеты, t_{dec} – задержка декапсуляции пакетов и восстановления полезных нагрузок.

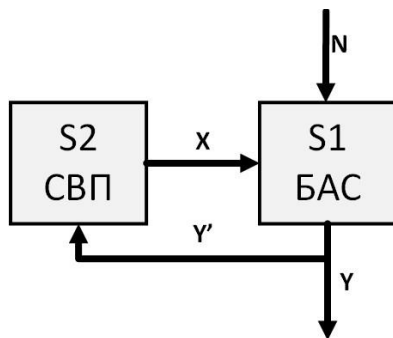


Рис. 3. FPV-управление как система с управлением

Кодер отвечает за кодирование кадров видеопотока на стороне БАС, а декодер – за их восстановление из кодированного представления на стороне СВП. Задержка передачи кадров видеопотока в КИО включает в себя задержки низших уровней сетевой модели OSI [16, 17], а также функции прикладного уровня по разделению полезной нагрузки на множество пакетов, составлению и обработке заголовков прикладного уровня, восстановлению полезной нагрузки из нескольких пакетов в нужном порядке. На задержку кадров видеопотока влияет битрейт системы FPV-управления, определяемый как:

$$bitrate = \frac{FPS \times 8 \times MSize}{1024} \left(\frac{\text{Кбит}}{\text{с}} \right),$$

где FPS – требуемое количество кадров в секунду, а $MSize$ – размер сжатого представления кадра, получаемого на кодере (байт). $MSize$ в свою очередь зависит от используемых кодера и декодера.

IV. ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ЗАДЕРЖЕК ВИДЕОПОТОКА

Для оценки оперативности операции управления и зависимости между задержкой передачи кадров видеопотока по КИО $t_{кио}$ и размером сжатых представлений кадров $MSize$ разработано программное обеспечение. Она реализована в виде скриптов Python 3.11 [18] с использованием модулей стандартной библиотеки `csv`, `socket`, `argparse`, `datetime`, `time`, `signal` и `struct`. Данная система состоит из двух частей: клиента и сервера.

Принцип измерения задержки в канале информационного обмена. Есть $number$ полезных нагрузок размером $payload$ байт. Каждая полезная $payload_i$ делится на

$$n = \left\lceil \frac{payload}{cut} \right\rceil$$

пакетов, последний из которых содержит

$$payload_i - \left\lfloor \frac{payload_i}{cut} \right\rfloor \text{ байт,}$$

а остальные – cut байт. Для эмуляции заголовка прикладного уровня к каждому пакету дополнительно добавляется 20 технических байт. Пакеты отправляются по протоколу UDP [18] с клиента на сервер с интервалом 1 мс. Таймаут подключения – 5 секунд. Если все пакеты, относящиеся к полезной нагрузке некоторого номера, получены, они упорядочиваются на сервере и

отправляются обратно на клиент. Возвращённые пакеты упорядочиваются на клиенте, после чего идёт сравнение полезных нагрузок.

Результаты записываются в CSV-файл [19]. Колонки данных: «id» – номер полезной нагрузки, «payload_size» – размер полезной нагрузки (байт), «latency» – задержка (мс), «is_good» – был ли корректно получен пакет (0 или 1).

Клиент сервера запускается с несколькими ключами (табл. 1).

ТАБЛИЦА I. Ключи запуска

Ключ	Описание	Тип данных Python
-n, --number	Количество полезных нагрузок	int
-s, --payload	Размер полезной нагрузки, байт	int
-f, --statfile	Имя CSV-файла статистики	str
-i, --ip	IP-адрес сервера	str
-p, --port	Порт сервера	int
-c, --cut	Предел полезной нагрузки на пакет, байт	int

V. ЭКСПЕРИМЕНТ

Разработанное программное обеспечение использовано для измерения задержки кадров FPV-видеопотока прикладного уровня в зависимости от их размера в мобильных сетях 3G (рис. 4) и LTE (рис. 5). Измерения проводились при $payload$, равном 100, 300, 500, 700, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 7000, 10000, 15000, 20000, 30000, 50000, 70000, 100000, 500000 байт.

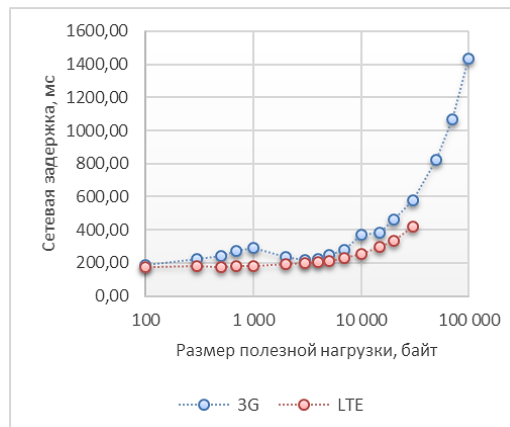


Рис. 4. Зависимость задержки кадров видеопотока от их размера

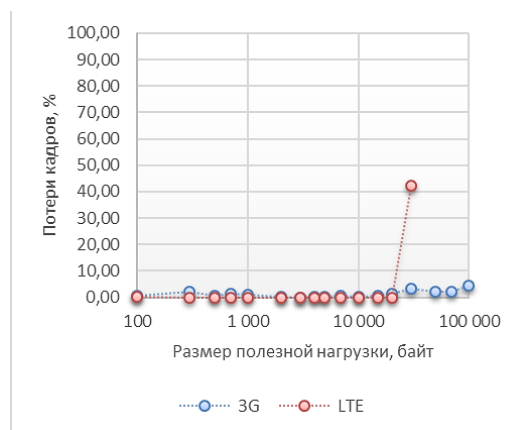


Рис. 5. Зависимость потерь кадров видеопотока от их размера

Результаты экспериментов по передаче такой нагрузки на большое расстояние показали незначительные изменения задержки в КИО на базе 3G и LTE сетях при изменении полезной нагрузки в пределах 100-10000 байт. Прослеживается увеличение задержек при увеличении полезной нагрузки до 1000 байт, далее уменьшение приблизительно до 3000 байт и постепенное линейное увеличение задержки при полезной нагрузке больше 3000 байт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе FPV-управление БВС рассмотрено как система с управлением, обоснована необходимость измерения задержки кадров видеопотока в КИО, предложена методика измерения задержки кадров видеопотока в КИО, реализована программное обеспечение, использующее данную методику, а также проведены эксперименты по измерению прикладной задержки видеопотока в наземном сегменте ГОНСС: мобильных сетях третьего (3G) и четвёртого (LTE) поколений.

Данная система предназначена для оценки оперативности FPV-управления БАС в ГОНСС, но допускается её применение и в других сетях, в частности в мобильных.

Результаты экспериментов по измерению задержки передачи кадров FPV-видеопотока по КИО показывают незначительные измерения задержки в 3G и LTE сетях при изменении полезной нагрузки в пределах 100–10000 байт. Задержка при этом составляет 200–300 мс.

Задержки передачи кадров FPV-видеопотока в КИО на большом расстоянии в 2–4 раза превышает задержки, полученные в исследовании [14]. При этом закономерность увеличения задержки при увеличении размера полезной нагрузки сохраняется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Литвин В. Г., Мусатов А. А., Литвин Ю. В. Определение требований ко времени выполнения запросов компонентами системы реального времени методами Бутстрепа // Автоматизация процессов управления. 2015. № 3(41). С. 41–48.
- [2] Lauer M., Boniol F., Pagetti C., Ermont J. End-to-end latency and temporal consistency analysis in networked real-time systems // International Journal of Critical Computer-Based Systems 6. 2014. Т. 5. № 3-4. С. 172-196.
- [3] ГОСТ Р 57258-2016. Системы беспилотные авиационные. Термины и определения. Москва, СтандартИнформ. 2016.

- [4] Ченский А.А., Березкин А.А., Киричек Р.В., Захаров А.А. Исследование методов квантования латентного пространства вариационного автокодировщика для кадров FPV видеопотока. Часть I // Электросвязь. Санкт-Петербург, 2024. № 6. С. 58-64.
- [5] Березкин А.А., Ченский А.А., Киричек Р.В., Захаров А.А. Исследование методов латентного сжатия видеопотока при FPV управлении беспилотными системами // Электросвязь. 2024. № 6. С. 46-56.
- [6] Березкин А.А., Ченский А.А., Киричек Р.В., Захаров А.А. Исследование методов квантования латентного пространства вариационного автокодировщика для кадров FPV видеопотока. Часть II // Электросвязь. 2024. № 7. С. 26-35.
- [7] Березкин А.А., Ченский А.А., Киричек Р.В., Захаров А.А. Исследование конфигураций нейросетевых кодеков для адаптивной системы сжатия кадров FPV-видеопотока при управлении беспилотными системами. Часть I. Методика // Электросвязь. 2024. № 9. С. 42-51.
- [8] Березкин А.А., Ченский А.А., Киричек Р.В., Захаров А.А. Исследование конфигураций нейросетевых кодеков для адаптивной системы сжатия кадров FPV-видеопотока при управлении беспилотными системами. Часть II. Эксперимент // Электросвязь. 2024. № 10. С. 59-69.
- [9] Mukherjee J., Ramamurthy B. Communication technologies and architectures for space network and interplanetary internet // IEEE communications surveys & tutorials. 2012. Т. 15. №. 2. С. 881-897.
- [10] Abdelsadek M. Y. et al. Future space networks: Toward the next giant leap for humankind // IEEE Transactions on Communications. 2022. Т. 71. №. 2. С. 949-1007.
- [11] Smith C., Collins D. 3G wireless networks. McGraw-Hill, Inc., 2001.
- [12] Varshney U. 4G wireless networks // IT Professional. 2012. Т. 14. №.5. С. 34-39.
- [13] Березкин А.А., Ченский А.А., Киричек Р.В. Исследование границ интенсивности видеопотока при FPV-управлении БПЛА в режиме предсказания кадров. Часть I: модели и методы // Вестник СибГУТИ. 2024. Т. 18. № 3. С. 115-139.
- [14] Березин А.А., Вивчарь Р.М., Ченский А.А., Киричек Р.В. Исследование задержки кадров видеопотока в канале информационного обмена наземного сегмента гибридной сети связи при FPV-управлении БАС // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 1. С. 7–17.
- [15] Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении. Учебное пособие. Москва : Финансы и статистика, 2013. 368 с.
- [16] Alani M. M., Alani M. M. OSI model // Guide to OSI and TCP/IP Models. 2014. С. 5-17.
- [17] Bora G. et al. OSI reference model: An overview // International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT). 2014. Т. 7. №.4. С. 214-218.
- [18] Python 3.11.0 // Python. URL: <https://www.python.org/downloads/release/python-3110/> (дата обращения: 29.01.2025).
- [19] Larzon L.A., Degermark M., Pink S. UDP lite for real time multimedia applications. Hewlett-Packard Laboratories, 1999.
- [20] Mitlöhner J., Neumaier S., Umbrich J., Polleres A. Characteristics of open data CSV files // 2016 2nd International Conference on Open and Big Data (OBD). IEEE, 2016. С. 72-79.