

Адаптивный контроль интенсивности видеопотока при передаче FPV-трафика беспилотных систем

А. А. Березкин, А. А. Паршин, А. А. Лазарев

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

berezkin.aa@sut.ru, parshin.aa@sut.ru, lazarev.aa@sut.ru

Аннотация. Процесс управления беспилотными системами от первого лица через гибридные орбитально-наземные сети связи в высокой степени зависит от качества передачи видеопотока и его рассинхронизации с командами управления. Вследствие случайной природы и величины задержек пакетов и потерь в данных сетях возникают задержки передачи видеопотока в приложении FPV управления. В статье предложена адаптивная система контроля FPS на стороне станции внешнего пилота, в основе которой лежат статистические методы обработки на базе контрольных карт Шухарта и моделей временных рядов. Применение данных методов обеспечивает своевременный контроль за интенсивностью видеопотока в случае существенных изменений качества канала связи и восстановление потерянных кадров на базе нейросетевой предсказательной модели.

Ключевые слова: беспилотная система, сжатие видео, контрольные карты Шухарта, адаптивная система, машинное обучение

I. ВВЕДЕНИЕ

Растущие требования пользователей к количеству и качеству передаваемых данных, а также широкое использование сетей связи в зонах критической инфраструктуры требуют применения новых подходов в телекоммуникационных сетях, позволяющих автоматизировать работу и повысить уровень безопасности передаваемой информации.

Одним из важнейших этапов развития технологий в отрасли связи является появление гибридных орбитально-наземных сетей связи (ГОНСС), включающих в себя низкоорбитальные спутниковые группировки и наземный сегмент различных сетей связи [1]. Как правило, в качестве наземного сегмента в таких сетях используются мобильные сотовые сети связи. Благодаря использованию интерфейсов LTE и LoRa в космическом сегменте и интеграции с наземной инфраструктурой связи, спутниковые и орбитально-наземные гибридные сети связи будут оказывать серьезное влияние не только на спутниковую связь, но и на сектор фиксированной и мобильной связи во всем мире. В настоящее время работы по развитию таких группировки ведутся дочерними структурами госкорпорации «Роскосмос» в рамках федерального

проекта «Сфера» АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва».

Одними из основных пользователей ГОНСС могут выступать различные беспилотные системы (БС).

В настоящее время существует множество работ, посвященных технологиям взаимодействия, управления и развития сенсорных и летающих сетей на базе беспилотных летательных аппаратов [2-6], а также адаптивным методам использования ресурсов прямого радиоканала в различных приложениях [7, 8]. Однако в настоящее время особенно актуальной становится задача разработки проектных решений для организации канала информационного обмена (КИО), используемого для управления БС в ГОНСС. Для того чтобы БС могли эффективно выполнять свои целевые задачи, они часто полагаются на использование качественных каналов для FPV (First Person View – вид от первого лица) управления.

Процесс управления БС от первого лица в высокой степени зависит от качества передачи видеопотока и его рассинхронизации с командами управления. Величины задержек выше допустимых уровней или прерывание потока данных могут дезориентировать оператора и привести к потере управления.

На рис. 1 представлен вариант схемы ГОНСС для управления БС от первого лица, где в состав центра управления включена станция внешнего пилота (СВП), а также центральная (ЦССС) и региональные (РССС) станции спутниковой связи [9].

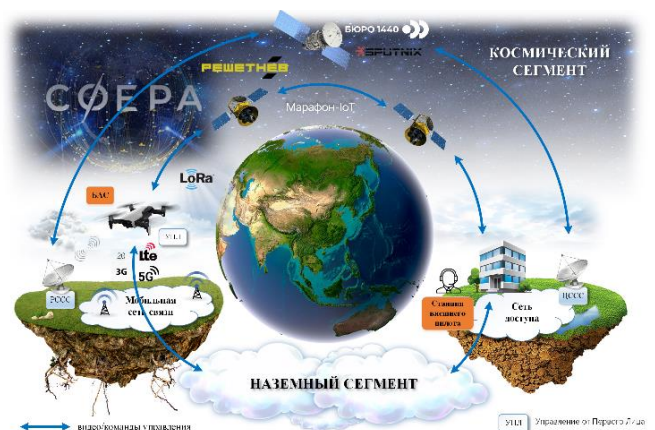


Рис. 1. Структура гибридной орбитально-наземной сети связи

Научная статья подготовлена в рамках прикладных научных исследований СПбГУТ, регистрационный номер 1023031600087-9 в ЕГИСУ НИОКТР.

II. ТЕРМИНАЛЫ БС И СВП

Структурная схема КИО (рис. 2) включает в себя терминалы БС и СВП, которые функционально включают в себя:

- нейросетевые диффузионные кодеры, декодеры и блоки сверхразрешения (SR – super-resolution) – обеспечивают интеллектуальное сжатие FPV-видеопотока для передачи в низкоскоростных каналах связи [10, 11];

- компенсаторы – обеспечивают балансировку FPS на стороне БС с учётом задержек в канале передачи данных;
- анализаторы КИО – вырабатывают параметры статистической устойчивости передачи FPV-трафика;
- модули КИВ (контроля интенсивности видеопотока) – обеспечивают равномерную передачу FPV-видеопотока на СВП с использованием нейросетевых предсказательных моделей [12];

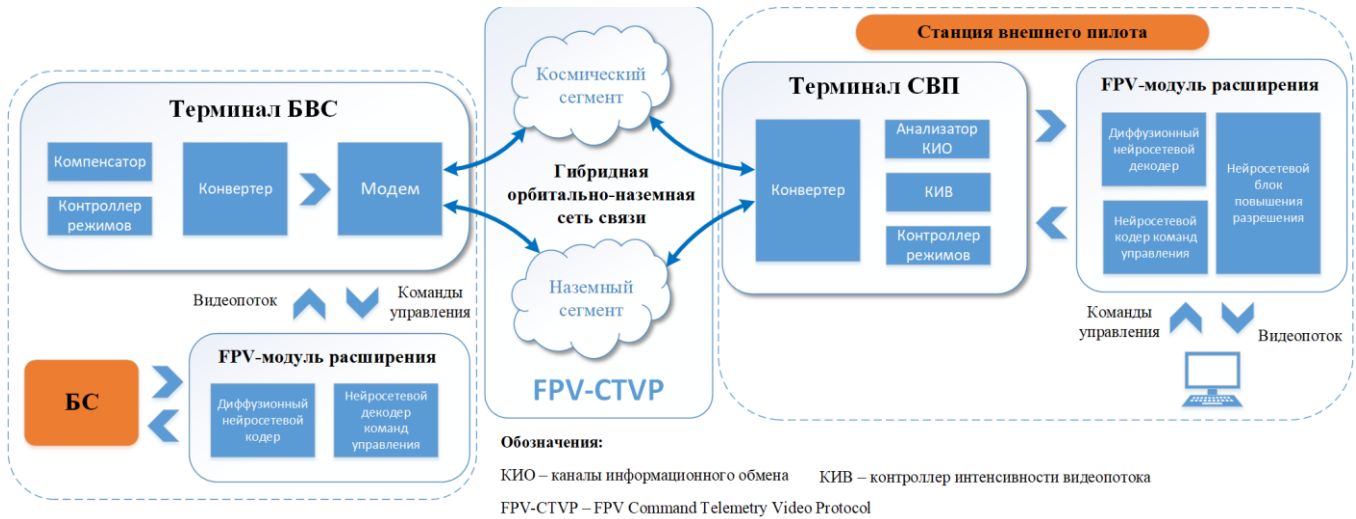


Рис. 2. Структура системы информационного обмена для управления БС в гибридной орбитально-наземной сети связи

- контроллеры режимов – обеспечивают функционирование терминалов в заданных режимах работы;
- конвертеры протокола FPV-CTVP (FPV-Command Telemetry Video Protocol) – реализуют работу протокола прикладного уровня FPV-CTVP, обеспечивающего передачу основных и служебных информационных потоков как в открытом, так и в зашифрованном виде.
- аппаратуру доступа (модем) – реализуют доступ к ресурсам сетей / каналов передачи данных в наземном или космическом сегментах, могут быть интегрированы в аппаратную часть терминалов либо быть внешними по отношению к терминалам (с подсоединением к терминалам с использованием различных проводных и беспроводных интерфейсов и протоколов);
- блоки шифрования – реализуют алгоритмы шифрования / дешифрования информационных потоков в различных режимах, могут быть выполнены аппаратно или программно.

III. МОДЕЛИ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

С учетом невозможности в ряде случаев определить причину и, соответственно, момент начала ухудшения качества видеосигнала, необходима разработка системы для решения двух основных задач:

1. Своевременное выявление отклонений качества сигнала и включение алгоритмов автоматизированной коррекции.

2. Контроль полноты восстановления и принятие решения об информировании оператора о некорректированном ухудшении качества принимаемого сигнала.

Интегральной характеристикой качества получаемого видеозображения является частота кадров в секунду (frames per second – FPS). На рис. 3 представлен пример такого процесса с эпохами стабильного качества (25 fps), ухудшения и, соответственно, включения механизмов коррекции, и восстановления.

На рис. 3 стрелками показаны моменты, когда процесс контроля FPS начал ухудшаться и, соответственно, началось плато стабильного качества. Первую задачу составляет качественное и своевременное обнаружение момента существенного изменения качества процесса, а вторую – сравнение состояний процесса до и после события «ухудшение-коррекция».

Для решения первой задачи предлагается рассматривать процесс, как временной ряд, и применять для его анализа математико-статистический аппарат поиска т. н. точки изменения (change-point detection). Для решения данной задачи могут применяться методы и модели машинного обучения, в частности, представленные в двух Python-библиотеках:

1. Roerich [13, 14] – содержит реализацию метода, основанного на прямой оценке отношения плотностей вероятностей процессов. Метод сравнивает две последовательные выборки задаваемого размера из всей записи процесса. Если между выборками нет точки изменения, то они имеют одинаковое распределение

плотностей вероятности, иначе точка изменения находится в диапазоне расположения двух выборок. Повторение этого сравнения для всех пар наблюдений последовательно помогает определить положения всех точек изменения во всём временном ряде. Для реализации данного метода используются два алгоритма:

- градиентный бустинг по деревьям решений – использование ансамбля слабо обучаемых деревьев решений для классификации и

регрессии. Бустинг подразумевает преобразование слабо обученных моделей в хорошо обученные, посредством выявления слабых моделей на основании градиентов функции потерь;

- нейросетевая классификация и регрессия – представлена в виде однослойной нейронной сети с 10-ю скрытыми нейронами с тангенциальной функцией активации и 1-м нейроном с сигмоидной функцией активации.

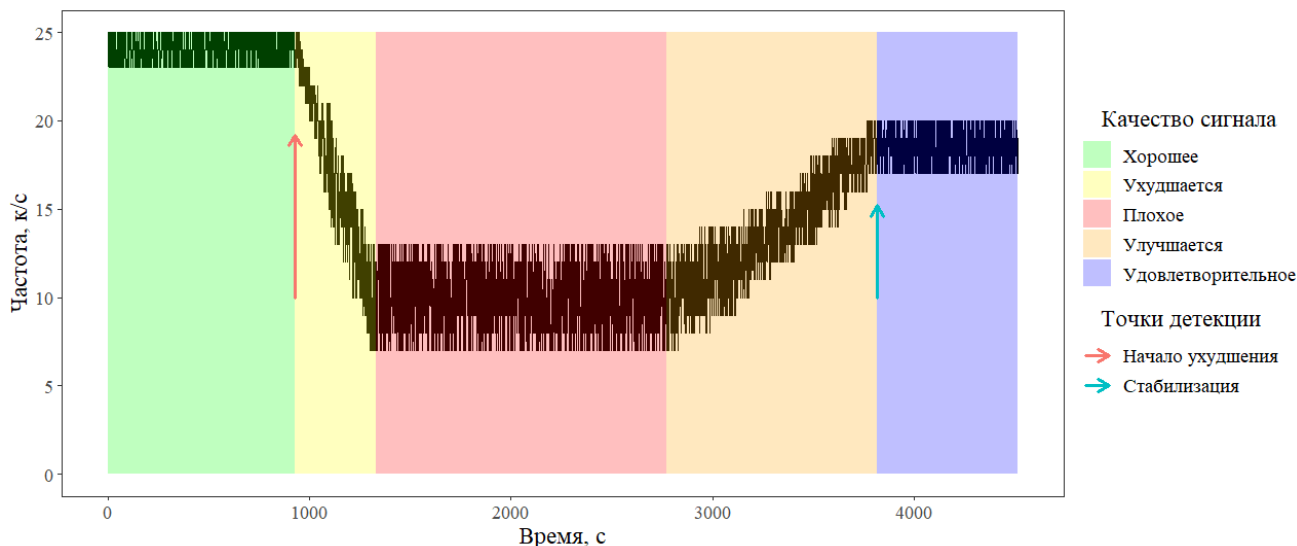


Рис. 3. Пример процесса изменения FPS

2. Skoltech Anomaly Benchmark (SKAB) – бенчмарк для задач обнаружения аномалий в промышленности, в частности в сигналах, с реализацией нескольких алгоритмов машинного обучения. Наилучшими по результатам представленных NAV-тестов [15] являются:

- Isolation Forest – обнаруживает аномалии с помощью бинарных деревьев. Алгоритм разбивает пространство данных случайным образом, используя случайно выбранные атрибут и точку разделения. Для получения оценки аномалий используется мера длины пути или аппроксимация. Имеет самый высокий рейтинг по NAV-тестам в среднем и для получения ошибок I-го рода [16]. Ансамбль создаётся для отдельного сигнала или набора сигналов. Аномалией будет помечаться та часть сигнала, разбитая алгоритмом, которая имеет короткую среднюю длину пути на i -ом дереве.
- Многомасштабный сверточный рекуррентный кодер-декодер (MSCRED) – глубокая нейронная сеть. Сеть строит многомасштабные матрицы сигнатур, затем используется сверточный кодер для кодирования межсенсорных корреляций. Сверточный декодер используется для восстановления входных матриц сигнатур, а остаточные матрицы сигнатур дополнительно используются для обнаружения и диагностики аномалий. Имеет самый высокий рейтинг для получения ошибок II-го рода [17].

IV. КОНТРОЛЬНЫЕ КАРТЫ ШУХАРТА

Для решения второй задачи предлагается рассматривать процесс, как маркер состояния КИО, и оценивать это состояние в целом при помощи контрольных карт Шухарта.

Контрольная карта – это средство, использующее подходы статистического управления процессами, важность которых для управления производственными процессами была впервые показана доктором У. Шухартом в 1924 г. [18]

Применительно к задаче контроля интенсивности FPS видеопотока, теория контрольных карт различает два вида изменчивости:

1. Изменчивость FPS из-за «случайных причин», обусловленная бесчисленным набором разнообразных причин, присутствующих постоянно, которые нелегко или невозможно выявить. Каждая из таких причин составляет очень малую долю общей изменчивости FPS, и ни одна из них не значима сама по себе. Тем не менее, сумма всех этих причин измерима и предполагается, что она внутренне присуща процессу. Исключение или уменьшение влияния обычных причин на FPS требует управленческих решений и выделения ресурсов на улучшение интенсивности видеопотока и канала связи «БС-СВП» в целом.

2. Реальные перемены в интенсивности видеопотока («особые причины»). Они могут быть следствием некоторых определяемых причин, не присущих процессу внутренне. Эти выявляемые причины рассматриваются как «неслучайные» или «особые» причины изменения.

В задаче FPV управления цель контрольных карт - обнаружить неестественные изменения в потоке видеокadres и дать критерии для обнаружения отсутствия статистической управляемости. Процесс находится в статистически управляемом состоянии, если изменчивость вызвана только случайными причинами. При определении этого приемлемого уровня изменчивости любое отклонение от него считается результатом действия особых причин в КИО. В этом случае следует принять меры по восстановлению интенсивности видеопотока на стороне станции внешнего пилота.

Данный метод позволяет оценивать диапазон функционирования стабильных эпох FPS, в данном случае эпохи до ухудшения качества и эпохи после восстановления. При совпадении или близости данных диапазонов делается вывод об успешной компенсации потери качества, при несовпадении компенсация признается неудовлетворительной, и происходит оповещение оператора системы.

Цикл работы системы коррекции FPS представлен на рис. 4.



Рис. 4. Цикл работы системы коррекции FPS

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интенсивность видеопотока на стороне СВП напрямую влияет на его задержку, и, как следствие на восприятие окружающей среды БС оператором при управлении от первого лица. Адаптивная компенсация кадров видеопотока (например, с помощью нейросетевых предсказательных моделей) обеспечивает более плавную передачу видеопотока на стороне СВП и своевременное реагирование оператора на события окружающей среды БС. Комплексное использование методов машинного обучения для своевременной детекции точки изменения интенсивности потока кадров на стороне СВП, а также статистических методов на базе контрольных карт Шухарта для контроля статистической устойчивости FPS, позволяет своевременно адаптироваться к изменениям качества канала связи при управлении БС от первого лица при передаче видеопотока через различные сегменты гибридной орбитально-наземной сети связи, характеризующиеся различными величинами задержек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Стратегия развития отрасли связи Российской Федерации на период до 2035 года // government.ru URL: <http://government.ru/news/50304/> (дата обращения: 04.01.2024).
- [2] Кучерявый А.Е., Владыко А.Г., Киричек Р.В. Теоретические и практические направления исследований в области летающих сенсорных сетей // Электросвязь. 2015. №7. С. 9-11.
- [3] Динь Ч.З., Киричек Р.В. Метод взаимодействия БПЛА в быстро разворачиваемых летающих сетях для экстренных служб // 74-я Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. Санкт-Петербург. 2019. С.141-143.
- [4] Кучерявый А.Е., Аль-Кадами Н.А. Покрытие, связность и плотность в двумерных и трехмерных беспроводных сенсорных сетях // Электросвязь. 2015. №9. С. 6-10.
- [5] Долгушев Р.А., Киричек Р.В., Владыко А.Г., Кучерявый А.Е. Программно-конфигурируемая архитектура взаимодействия наземного сегмента и беспилотного летательного аппарата в летающих сенсорных сетях // Интернет вещей и 5G. Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Санкт-Петербург. 2016. С. 1-6.
- [6] Киричек Р.В. Сети беспилотных летательных аппаратов как элемент инфраструктуры умных городов // 72-я Всероссийская научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвящённая Дню Радио. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Санкт-Петербург. 2017. С. 166-167.
- [7] Иванов М.С., Пономарев А.В., Макаренко С.И. Повышение скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами за счет адаптивного управления сетевым частотно-временным ресурсом с учетом интенсивности передаваемого трафика // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 1. С. 104-139.
- [8] Иванов М.С., Шушков А.В., Макаренко С.И. Методика повышения скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами за счет адаптивного использования энергетического, сигнального и частотного сетевых ресурсов. Часть I. Модели и методика повышения скорости передачи данных // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 1. С. 125-219.
- [9] Березкин А.А., Вивчарь Р.М., Киричек Р.В. Многокритериальная оценка эффективности управления беспилотными системами в гибридных сетях связи // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 1. С. 18-25.
- [10] Березкин А.А., Вивчарь Р.М., Слепнев А.В., Киричек Р.В., Захаров А.А. Метод сжатия видеопотока при управлении беспилотными системами в гибридных орбитально-наземных сетях связи // Электросвязь. 2023. №10. С. 48-56.
- [11] Березкин А.А., Вивчарь Р.М., Киричек Р.В., Захаров А.А. Метод декомпрессии FPV-видеопотока от беспилотных систем на основе латентной диффузионной нейросетевой модели // Электросвязь. 2024. №1. С. 42-53.
- [12] Березкин А.А., Савелов Д.Ю., Суходоева А.В., Туманов И.А., Киричек Р.В. Исследование нейросетевых моделей предсказания видеопотока при управлении беспилотными системами от первого лица // Труды НИИР. 2023. №3-4. С. 40-56.
- [13] Hushchyn M., Ustyuzhanin A. Generalization of change-point detection in time series data based on direct density ratio estimation // Journal of Computational Science. 2021. Т. 53. С. 101385.
- [14] Hushchyn M., Arzumatov K., Derkach D. Online neural networks for change-point detection // arXiv preprint arXiv:2010.01388. 2020.
- [15] Liu F.T., Ting K.M., Zhou Z.H. Isolation forest // 2008 IEEE 8th International Conference on Data Mining. IEEE, 2008. С. 413-422.
- [16] Lavin A., Ahmad S. Evaluation Real-Time Anomaly Detection Algorithms – The Numanta Anomaly Benchmark // 2015 IEEE 14th International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA). IEEE, 2015. С. 38-44.
- [17] Zhang C., Song D., Chen Y., Feng X., Lumezanu C., Cheng W., Ni J., Zong B., Chen H., Chawla N.V. A Deep Neural Network for Unsupervised Anomaly Detection and Diagnosis in Multivariate Time Series Data // Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence. 2019. Т. 33. №. 01. С. 1409-1416.
- [18] Shewhart W.A. Economic Control of Manufactured Product. New York: D.Van Norsrand, Co, 1931. 501 с.