

УПРАВЛЕНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ИНТЕНСИВНОСТИ FPV-ВИДЕОПОТОКА НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ ШУХАРТА

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-1-4-19

Manuscript received 10 October 2025;
Accepted 17 December 2025

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, соглашение № 071-03-2025-005, "Прикладные научные исследования в области создания и развития систем телеметрии, управления и связи для беспилотных авиационных систем на период до 2030 года с учетом импортозамещения" (регистрационный номер ПТНИ: 1024032900105-1).

Березкин Александр Александрович,
Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч Бруевича,
Санкт-Петербург, Россия, berezkin.aa@sut.ru

Киричек Руслан Валентинович,
Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч Бруевича,
Санкт-Петербург, Россия, kirichek@sut.ru

Ключевые слова: контрольные карты Шухарта, статистическое управление процессом, видеопоток, интенсивность видеопотока, управление от первого лица, беспилотное воздушное судно, БПЛА, беспилотная авиационная система, FPV-управление

В работе исследована возможность использования статистического механизма контрольных карт Шухарта для определения факта выхода процесса, описывающего изменение интенсивности FPV-видеопотока на стороне внешнего пилота, из состояния статистической управляемости для включения компенсационных механизмов. Исследована возможность применения метода расчёта значений контрольных границ, основывающийся на использовании стандартного отклонения, а также на основе размаха из ГОСТ Р 50779.42-99 "Статистические методы. Контрольные карты Шухарта". Обоснована необходимость использования моментарного FPS. Показано, что метод расчёта значений контрольных границ, основывающийся на использовании стандартного отклонения, показывает себя более стабильным и допускает меньше ошибок, чем метод, который основывается на использовании размаха. Установлено, что лучшее соотношение между ложными обнаружениями и ложными отсутствиями обнаружений выходов процесса из управляемого состояния достигается при размере подгрупп равной 19.

Информация об авторах:

Березкин Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры программного обеспечения и вычислительной техники, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч Бруевича, Санкт-Петербург, Россия. <http://orcid.org/0000-0002-1748-8642>

Киричек Руслан Валентинович, доктор технических наук, профессор, ректор, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч Бруевича, Санкт-Петербург, Россия. <http://orcid.org/0000-0002-8781-6840>

Для цитирования:

Березкин А. А., Киричек Р. В. Управление стохастическим процессом интенсивности FPV-видеопотока на основе контрольных карт Шухарта // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №1. С. 4-19.

For citation:

A. A. Berezkin, R. V. Kirichek, "FPV video stream intensity stochastic process control with Shewhart control charts," *T-Comm*, 2026, vol. 20, no. 1, pp. 4-19. (in Russian)

Введение

Беспилотные воздушные суда (БВС) – это беспилотные воздушные аппараты, которые управляются без нахождения внутри них пилота. В двадцатых годах 21 века они находят активное применение в: логистике (такие компании, как Amazon, UPS Express, Matternet, SF Express, Taobao и Jingdong Group начали применение БВС [1-3]); сельском хозяйстве [2-9]; экологическом мониторинге [2, 8, 9]; получении данных с сенсоров [2, 10-13] – узлов интернета вещей [14]; предоставлении услуг подключения к сети Интернет в удалённых районах [2]; картографии [3, 8, 9, 15, 16]; оценке риска недвижимого имущества при землетрясениях [16]; чрезвычайных ситуациях [3, 8, 9, 16, 17]; строительстве [3, 8, 9, 16]; контроле энергетических коммуникаций [3, 8, 9]; контроле дорожного трафика [8, 9]; кинематографе [9]; метеорологии [8, 9].

При сложности или невозможности выполнения полётных заданий в некоторой области применения БВС управляется от первого лица (FPV – first person view) [18, 19]. Для FPV-управления БВС применяются беспилотные авиационные системы (БАС). Согласно ГОСТ Р 59519-2021 «Системы беспилотные авиационные. Компоненты беспилотных авиационных систем», БАС состоит из: БВС, станции внешнего пилота (СВП) и канал передачи данных между БВС и СВП (также канал информационного обмена – КИО). СВП используется внешним пилотом (ВП) для управления БВС. При этом, как уточнено в ГОСТ Р 57258-2016 «Системы беспилотные авиационные. Термины и определения», КИО состоит из: линии связи с землёй и линии связи с бортом. Линия связи с землёй – это канал БВС – СВП. По ней отправляются: видеопоток, телеметрия. Линия связи с бортом – это канал СВП – БВС. По ней отправляются команды управления (КУ), формируемые ВП. Для проведения FPV-управления каждое БВС должен однозначно идентифицироваться в сети связи [22-24].

FPV-управление БВС проводится для выполнения некоторого полётного задания. Существует множество событий, возникающих при выполнении полётного задания,

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_{FN}\}$$

мощности множества FN , а также множество моментов времени событий возникновения данных событий

$$ST = \{st_1, st_2, \dots, st_{FN}\}$$

той же мощности множества. Пусть существует такое подмножество полётных заданий $DS \subset S$, что

$$DS = \{ds_1, ds_2, \dots, ds_{DFN}\}$$

и его мощность множества составляет DFN , причём ему соответствует подмножество моментов времени событий возникновения

$$FST = \{dst_1, dst_2, \dots, dst_{DFN}\}.$$

Множество DS содержит события, которые угрожают срыву выполнения полётного задания. К нему, например, может относиться появление птицы, которая летит в сторону БВС либо изменение траектории БВС вследствие порыва

ветра. У каждого из событий множества DS есть время реагирования:

$$FRT = \{drt_1, drt_2, \dots, drt_{DFN}\}.$$

Если на БВС поступили КУ, которые позволяют избежать срыв полётного задания при возникновении событий множества DS , на интервалах времени

$$\{[dst_1; dst_1 + drt_1], [dst_2; dst_2 + drt_2], \dots, [dst_{DFN}; dst_{DFN} + drt_{DFN}]\},$$

то выполнение полётного задания продолжится. Если требуемые КУ поступили позднее или не поступили вовсе, то выполнение полётного задания проваливается и возникает риск потери БВС.

Для того, чтобы КУ поступила на БВС, необходимо: передача кадра видеопотока, содержащего событие множества DS , с БВС на СВП; реакция ВП и формирование КУ; передача КУ с СВП на БВС; КУ должна быть применена. Пусть T_3^B – время передачи видеопотока, T_{3i}^P – время реакции ВП, T_3^Y – время передачи КУ, а T_{3i}^{Π} – время применения КУ (выполнения БВС действий, направленных на устранение угрозы срыва полётного задания) на событие ds_i . Суммарная задержка реакции на событие ds_i составляет (рис. 1)

$$T_{\Sigma i} = T_3^B + T_3^P + T_3^Y + T_{3i}^{\Pi} \quad (1)$$

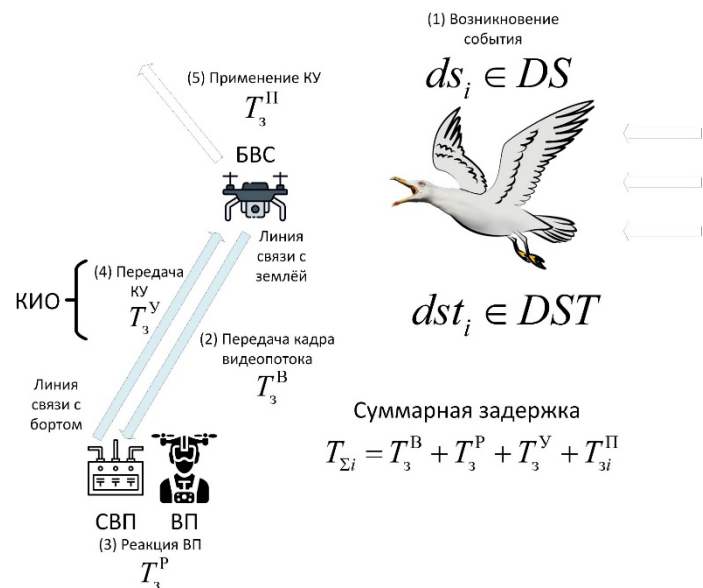


Рис. 1. Реакция на опасное событие

При этом полётное задание не будет сорвано при условии

$$T_{\Sigma i} \leq drt_i. \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует, что время реагирования внешнего пилота T_3^P должно быть менее

$$\{drt_1 - T_3^B - T_3^Y - T_{3i}^{\Pi}, drt_2 - T_3^B - T_3^Y - T_{3i}^{\Pi}, \dots, drt_{DFN} - T_3^B - T_3^Y - T_{3DFN}^{\Pi}\}.$$

Реакция КУ определяется как человеческими, так и техническими факторами. Человеческие факторы включают: время восприятия кадра видеопотока, время непосредственного формирования КУ, время ввода КУ через СВП. Технические факторы включают: качество видеопотока, частоту камеры, интенсивность видеопотока.

Настоящее исследование посвящено проблеме низкой интенсивности видеопотока.

Проблема низкой интенсивности видеопотока возникает по причине: длительного времени кодирования и декодирования кадров видеопотока (характерно для нейросетевых кодеков [3, 8, 9, 18, 19, 25-27]); уменьшения полосы пропускания и потерь в КИО. Проблема низкой интенсивности видеопотока в связи с длительным временем кодирования и декодирования кадров видеопотока была детально рассмотрена в [28]. Для неё характерна постоянная низкая интенсивность видеопотока без значительных отклонений во времени. В настоящей работе рассматривается проблема низкой интенсивности видеопотока в связи с изменениями полосы пропускания и потерь кадров видеопотока в КИО.

Пусть на СВП есть буфер кадров видеопотока и буфер отображения. Во время полётного задания на буфер кадров видеопотока поступают кадры видеопотока с БВС. Буфер кадров видеопотока содержит множество кадров

$$F = \{f_1, f_2, \dots, f_{BFN}\}$$

мощности множества BFN , причём кадры поступили на буфер вовремя

$$TF = \{tf_1, tf_2, \dots, tf_{BFN}\}$$

соответственно.

Пусть данные об опасном событии $ds_i \in DS$ поступили на СВП на кадре видеопотока f_i во время tf_i . После этого кадр f_i поступил на буфер отображения, на котором ВП оценил полётную обстановку и сформировал соответствующие КУ. Тогда время съёмки кадра

$$tfs_i = tf_i - T_s^B$$

в общем случае не равно времени возникновения события (рис. 2):

$$tfs_i > dst_i.$$

Допустим, событие могло быть отражено в кадре видеопотока f_{i-1}^* , который был утерян при передаче. Либо из-за уменьшения полосы пропускания могла возникнуть дополнительная задержка при передаче кадра видеопотока f_i . Это приводит к уменьшению интенсивности видеопотока. Задержка кадров видеопотока показывает, насколько они оперативны. Интенсивность видеопотока в свою очередь показывает, с какой частотой и динамикой отражаются изменения полётной обстановки. Для формирования требуемых КУ ВП может быть необходимо видеть опасную ситуацию ds_i в динамике. Проблема малой интенсивности видеопотока состоит в том, что опасные события из множества ds_i отражаются на кадрах видеопотока, между которыми существует относительно большая задержка

$$T = \frac{1000}{FPS} (\text{мс}), \quad (3)$$

где FPS (frame per seconds – (количество) кадров в секунду)– интенсивность видеопотока (к/с).

Необходимость просмотра нескольких таких кадров приводит к увеличению время реакции T_{zi}^P и в конечном счёте негативно влияет на задержку. Кроме того, если опасное событие ds_i произошло между кадрами, снятыми камерой, низкая интенсивность видеопотока приводит к дополнительной задержке ожидания кадра видеопотока с событием в несколько десятков миллисекунд.

Следовательно, низкая интенсивность видеопотока приводит к снижению оперативности реагирования на опасные ситуации и снижает вероятность успешного выполнения полётного задания.

Как указано в Стратегии развития отрасли связи до 2035 года, утверждённой постановлением правительства от 24 ноября 2023 года №3339-р, гибридные орбитально-наземные сети связи (ГОНСС) позволят обеспечить FPV-управление БВС на всей территории Российской Федерации. Они состоят из наземного и космического сегментов (рис. 3 [29]). Наземный сегмент ГОНСС составляют мобильные сети. Космический сегмент ГОНСС составляют спутниковые сети связи. Полоса пропускания наземных [30-32] и особенно спутниковых сетей связи зависит от погодных условий [33-35]. Соответственно, при FPV-управлении БВС по ГОНСС возникает проблема низкой интенсивности видеопотока. Так как погодные условия изменяются со временем, то проблема низкой интенсивности видеопотока в связи с погодными условиями в различные моменты времени может быть более или менее выражена.

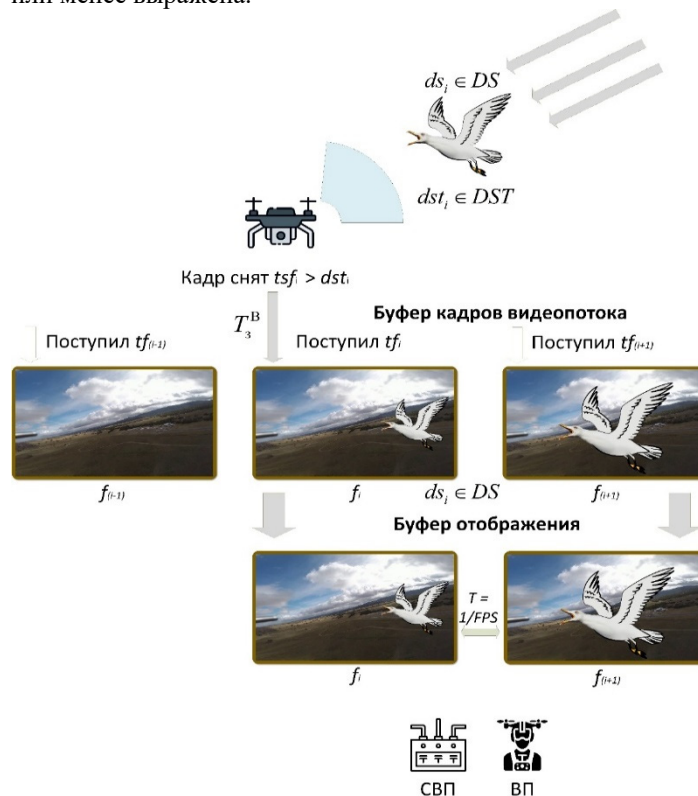


Рис. 2. Проблема низкой интенсивности видеопотока



Рис. 3. Гибридная орбитально-наземная сеть связи

Во избежание увеличения времени реакции ВП T_{zi}^P и как следствие увеличения суммарной задержки реакции на событие T_{Σ} необходимо поддерживать заданную интенсивность видеопотока FPS . В работе [29] был сделан краткий и общий обзор методов контроля интенсивности видеопотока. Из данных методов в настоящем исследовании детально рассматривается применение карт Шухарта [36] для контроля интенсивности видеопотока. Данный метод требует наименьших вычислительных ресурсов из методов, предложенных в [29], и таким образом наиболее подходит для работы в режиме реального времени.

Применение данного метода предполагается в составе системы информационного обмена для управления БВС в ГОНСС (рис. 4 [29]) в блоке анализатора канала информационного обмена (КИО) для адаптивного режима контроля интенсивности видеопотока.

Система информационного обмена для управления БВС в ГОНСС состоит из: беспилотного судна (БС), FPV-модулей расширения на БВС и СВП, а также терминалов БВС и СВП.

Связь между терминалами БВС и СВП осуществляется с помощью протокола FPV-CTVP (FPV control telemetry video

protocol – протокол управления, телеметрии и видео для управления от первого лица).

FPV-модуль расширения на БВС содержит нейросетевой кодер кадров видеопотока NVC (Neural video codec – нейросетевой видеокодек) и нейросетевой декодер КУ NCC (Neural control codec – Нейросетевой кодек управления). FPV-модуль расширения на СВП содержит нейросетевой декодер кадров видеопотока NVC, нейросетевой кодер КУ NCC и нейросетевой блок повышения разрешения.

Термин БВС содержит: компенсатор для выкалывания части кадров; контроллер режимов кодирования кадров видеопотока и КУ; конвертер для инкапсуляции и декапсуляции пакетов FPV-CTVP и модем для отправки и получения данных по сети. Терминал СВП содержит: конвертер с функциями, схожими с конвертером в терминале БВС; модуль анализатора КИО; модуль контроля интенсивности видеопотока (КИВ). Функциональность адаптивных режимов контроля интенсивности видеопотока и задержки реализуется в КИВ. При этом управление параметрами данного режима проводится в анализаторе КИО.

Соответственно, метод статистического управления процессом интенсивности видеопотока предназначен для использования в анализаторе КИО для выработки параметров адаптивных режимов. В данной работе рассматривается его применение к адаптивному режиму контроля интенсивности видеопотока, который имеет параметр NI – число интерполируемых кадров.

1 Контрольные карты Шухарта

Контрольные карты Шухарта были представлены Уолтером Эндрю Шухартом (англ. Walter Andrew Shewhart) в 1931 году в книге «Экономический контроль качества произведенного продукта» (англ. «Economic control of quality of manufactured product») [36]. Основная область применения контрольных карт Шухарта – это управление качеством производственных продуктов.

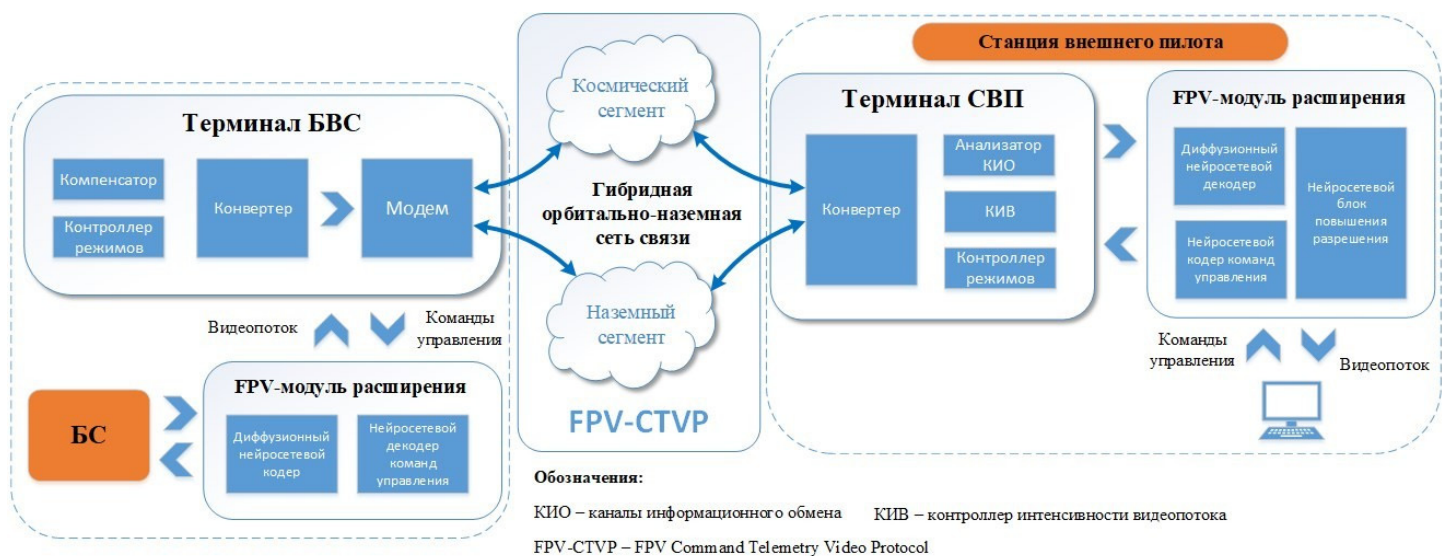


Рис. 4. Система информационного обмена для управления БВС в ГОНСС

Карты Шухарта имеют эмпирическую ценность для принятия решений и не должны использоваться для проверки статистических гипотез [36].

Пусть у некоторого производственного продукта есть некоторая характеристика U . Предполагается, что она распределена по нормальному закону [36]. Данная характеристика имеет:

- среднее значение \bar{U} [37]:

$$\bar{U} = \frac{\sum_{k=1}^N U_k}{N},$$

где N – количество измерений значений характеристики,

- выборочное стандартное отклонение σ [37]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (U_k - \bar{U})^2}{N-1}},$$

- скользящий размах R :

$$R_i = U_i - U_{i-1}$$

- средний скользящий размах \bar{R} :

$$\bar{R} = \frac{\sum_{k=1}^K R_k}{N}.$$

Существуют UCL (upper control line – верхняя контрольная линия) и LCL (lower control line – нижняя контрольная линия).

$$UCL = \bar{U} + 3 \times \sigma_{\bar{U}} = \bar{U} + \frac{3 \times \sigma}{\sqrt{N}},$$

$$LCL = \bar{U} - 3 \times \sigma_{\bar{U}} = \bar{U} - \frac{3 \times \sigma}{\sqrt{N}},$$

где $\sigma_{\bar{U}}$ – стандартное отклонение среднего значения [36, 38]:

$$\sigma_{\bar{U}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}.$$

Если некоторое значение U_i удовлетворяет одному из условий [36]:

$$U_i > UCL, \tag{4}$$

$$U_i < LCL, \tag{5}$$

то значение характеристики принимается неприемлемым, и считается, что производственный процесс вышел из управляемого состояния (рис. 5: точки с зелёной обводкой показывают приемлемые значения, а с красной – неприемлемые). В этом случае необходимо остановить производственный процесс для выявления неполадок.

Допускаются также дополнительные критерии неуправляемости процесса: возрастание или убывание нескольких последовательных значений, нахождение нескольких последовательных значений выше или ниже

центральной линии, определяемой средним значением характеристики \bar{U} .

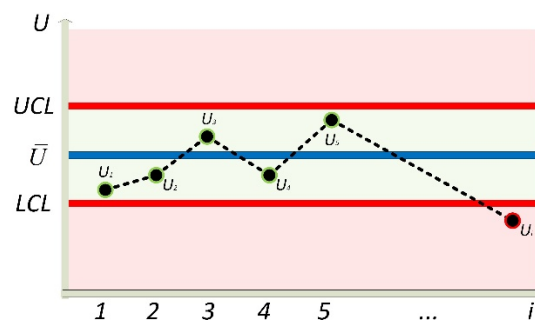


Рис. 5. Применение контрольных карт Шухарта

При этом использование индивидуальных значений характеристики имеет недостатки. Так измерение одного значения характеристики, которое выходит за границы $LCL-UCL$, может быть выбросом, не свидетельствующим о нарушении производственного процесса. Индивидуальные значения имеют большую флуктуацию. Кроме того, индивидуальные значения могут отклоняться от нормального распределения. Для получения более стабильных значений анализируются подгруппы параметров. Согласно центральной предельной теореме, выборочные средние значений при увеличении размера выборки приближаются к нормальному распределению, даже если отдельные значения не этому распределению не подчиняются [39].

Пусть n измерений значений характеристики U объединены в подгруппу. Тогда каждая из подгрупп характеризуется в том числе:

- средним значением подгруппы $\overline{U^{(n)}}$ [37]

$$\overline{U^{(n)}} = \frac{\sum_{k=1}^n U_k}{n} \tag{6}$$

- выборочным стандартным отклонением подгруппы $\sigma^{(n)}$ [37]

$$\sigma^{(n)} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (U_k^{(n)} - \overline{U^{(n)}})^2}{n-1}} \tag{7}$$

- размахом подгруппы $R^{(n)}$ [36]

$$R^{(n)} = \max(U^{(n)}) - \min(U^{(n)}) \tag{8}$$

При этом добавляются новые статистические характеристики:

- среднегрупповое среднее [36]:

$$\overline{\overline{U^{(n)}}} = \frac{\sum_{k=1}^K \overline{U_k^{(n)}}}{K} \tag{9}$$

где K – количество подгрупп,

- среднегрупповое выборочное стандартное отклонение [36]:

$$\overline{\sigma^{(n)}} = \frac{\sum_{k=1}^K \sigma_k^{(n)}}{K} \quad (10)$$

- среднегрупповой размах:

$$\overline{R^{(n)}} = \frac{\sum_{k=1}^K R_k^{(n)}}{K} \quad (11)$$

Тогда, согласно [36], UCL и LCL находятся соответственно как:

$$UCL = \overline{U^{(n)}} + 3 \times \sigma_{\overline{U}} = \overline{U^{(n)}} + 3 \times \frac{\overline{\sigma^{(n)}}}{c_2 \times \sqrt{N}},$$

$$LCL = \overline{U^{(n)}} - 3 \times \sigma_{\overline{U}} = \overline{U^{(n)}} - 3 \times \frac{\overline{\sigma^{(n)}}}{c_2 \times \sqrt{N}},$$

где $\sigma_{\overline{U}}$ оценивается как:

$$\sigma_{\overline{U}} = \frac{\overline{\sigma^{(n)}}}{c_2 \times \sqrt{N}},$$

где c_2 – корректирующий коэффициент, который берётся из таблицы 1 [36]

Таблица 1

Значения корректирующего коэффициента для различного размера подгрупп

n	c_2	n	c_2
3	0,72360	22	0,96545
4	0,79788	23	0,96697
5	0,84069	24	0,96837
6	0,86863	25	0,96965
7	0,88820	30	0,97475
8	0,90270	35	0,97839
9	0,91388	40	0,98111
10	0,92275	45	0,98322
11	0,92996	50	0,98491
12	0,93594	55	0,98629
13	0,94098	60	0,98744
14	0,94529	65	0,98841
15	0,94901	70	0,98924
16	0,95225	75	0,98996
17	0,95511	80	0,99059
18	0,95765	85	0,99115
19	0,95991	90	0,99164
20	0,96194	95	0,99208
21	0,96378	100	0,99248

Применение контрольных карт Шухарта на территории Российской Федерации стандартизировано по ГОСТ Р 50779.42-99 «Статистические методы. Контрольные карты Шухарта». Этот ГОСТ представляет собой перевод международного стандарта ИСО 8258-91 «Контрольные карты Шухарта» (англ. ISO 8258:1991 «Shewhart control charts»).

Перед построением контрольных карт Шухарта выполняется сбор предварительной выборки значений характеристик. Либо из данной выборки непосредственно строятся карты индивидуальных значений, либо данная

выборка делится на подгруппы, и строятся карты подгрупп. Точное значение предварительной выборки не указано. В ГОСТ приведены примеры

Расчёты, которые проводятся для вычисления UCL и LCL , имеют отличия между ГОСТ и [36].

Так для среднего индивидуальных значений UCL и LCL вычисляются соответственно по формулам

$$UCL = \overline{U} + E_2 \times \overline{R},$$

$$LCL = \overline{U} - E_2 \times \overline{R},$$

где коэффициент E_2 вычисляется по формуле

$$E_2 = \frac{3}{d_2},$$

где значение коэффициента d_2 находится из таблицы 2.

Для средних значений подгрупп UCL и LCL могут вычисляться двумя способами.

- Первый способ: с использованием среднегруппового размаха $\overline{R^{(n)}}$:

$$UCL = \overline{U^{(n)}} + A_2 \times \overline{R^{(n)}} \quad (12)$$

$$LCL = \overline{U^{(n)}} - A_2 \times \overline{R^{(n)}} \quad (13)$$

где значение коэффициента A_2 находится из таблицы 2.

- Второй способ: с использованием среднегруппового стандартного отклонения $\overline{\sigma^{(n)}}$:

$$UCL = \overline{U^{(n)}} + A_3 \times \overline{\sigma^{(n)}} \quad (14)$$

$$LCL = \overline{U^{(n)}} - A_3 \times \overline{\sigma^{(n)}} \quad (15)$$

где значение коэффициента A_3 находится из таблицы 2.

Таблица 2

Коэффициенты для расчёта UCL и LCL по ГОСТ Р 50779.42-99

n	c_2	A_2	A_3	n	d_2	A_2	A_3
2	1,128	1,880	2,659	14	3,407	0,235	0,817
3	1,693	1,023	1,954	15	3,472	0,223	0,789
4	2,059	0,729	1,628	16	3,532	0,212	0,763
5	2,326	0,577	1,427	17	3,588	0,203	0,739
6	2,534	0,483	1,287	18	3,640	0,194	0,718
7	2,704	0,419	1,182	19	3,689	0,187	0,698
8	2,847	0,373	1,099	20	3,735	0,180	0,680
9	2,970	0,337	1,032	21	3,778	0,173	0,663
10	3,078	0,308	0,975	22	3,819	0,167	0,647
11	3,173	0,285	0,927	23	3,858	0,162	0,633
12	3,258	0,266	0,886	24	3,895	0,157	0,619
13	0,266	0,249	0,850	25	3,931	0,153	0,606

В ГОСТ Р 50779.42-99 приведены не только карты для средних значений характеристики U , но и другие виды: для стандартных отклонений, размахов, медиан. Кроме того, существует тип карт с альтернативными значениями. Данные разновидности карт в настоящей работе не рассматриваются.

2 Метод статистического управления процессом интенсивности видеопотока

Пусть длина временного интервала между отображением кадров f_i и $f_{(i-1)}$ равно T мс. Тогда интенсивность видеопотока в момент времени поступления кадра f_i вычисляется по формуле (3). Новые значения интенсивности видеопотока измеряются каждые T мс. При этом значения T для нейросетевого декодера NVC определяется как

$$T_i = t_{DC} + t_{DCD} + t_{DQ} + t_{AS} + t_{II} + \Delta t_i^{ext} \text{ (мс)},$$

где t_{DCD} – время декодирования, t_{DC} – время декомпрессии, t_{DQ} – время деквантования, t_{AS} – время подавления артефактов, t_{II} – время интерполяции (блоком интерполяции 2 на нейросетевом декодере [19]), Δt_i^{ext} – дополнительная задержка, которая определяется: ограниченной полосой пропускания КИО, низкой интенсивностью видеопотока на нейросетевом кодере NVC, потерями кадров видеопотока в КИО.

Как показано в [19, 28], время выполнения таких операций, как кодирование t_{CD} и декодирование t_{DCD} видеопотока нейронной сетью вида «вариационный автокодировщик», является стохастической величиной. Следовательно, интенсивность видеопотока является дискретным стохастическим процессом. При этом данный процесс может выйти из управляемого состояния по причине изменения компоненты Δt_i^{ext} .

Метод статистического управления данным стохастическим процессом основан на применении контрольных карт Шухарта, описанных ранее. В ГОСТ Р 50779.42-99 указано, что карты Шухарта рассчитываются по предварительно собранным значениям характеристик производственного процесса. Тем не менее, в задаче контроля интенсивности видеопотока в реальном времени нет возможности заблаговременно собрать необходимые характеристики: КИО, а также время выполнения кодирования и декодирования различаются. Таким образом, границы карт Шухарта UCL и LCL пересчитываются после поступления каждого нового индивидуального значения или их группы.

Пусть существует множество индивидуальных значений интенсивности видеопотока FPS . Данные значения разделяются на подгруппы размера n , для которых по формулам (6-8) находятся: среднее значение $\overline{FPS}_k^{(n)}$, стандартное отклонение $\sigma_k^{(n)}$ и размах $R_k^{(n)}$ соответственно, где k – порядковый номер подгруппы.

Контролируемый процесс начинается с порядкового номера группы s . При инициализации метода $s = 0$. По формулам (9-11) для групп с номерами, начинающимися с s включительно, рассчитываются: среднегрупповое среднее $\overline{FPS}^{(n)}$, среднегрупповое выборочное стандартное отклонение $\overline{\sigma}^{(n)}$, среднегрупповой размах $\overline{R}^{(n)}$. После этого UCL и LCL могут рассчитываться двумя способами.

1. На основе среднегруппового размаха $\overline{R}^{(n)}$ по формулам (12, 13).
2. На основе среднегруппового выборочного стандартного отклонения $\overline{\sigma}^{(n)}$ по формулам (14, 15).

Если выполняется одно из условий: (4) или (5), то процесс интенсивности видеопотока считается вышедшим из управляемого состояния. Пусть процесс вышел из управляемого состояния на группе r . Если $s = 0$, то определяются: эталонное значение интенсивности видеопотока FPS_s , которое равно среднегрупповому среднему $\overline{FPS}^{(n)}$ групп от s до $r-1$, и эталонные значения верхней и нижней границ интенсивности видеопотока UCL_s и LCL_s , рассчитанному для групп от s до $r-1$.

Считается, что при выходе процесса из управляемого состояния начался новый процесс. При этом после расчёта значений FPS_s и LCL_s s принимается равным r .

Если новое среднее значение $\overline{FPS}_r^{(n)} \geq LCL_s$, то применение механизмов повышения интенсивности видеопотока не требуется. Если новое среднее значение $\overline{FPS}_r^{(n)} < LCL_s$, то в новом процессе при получении каждого нового значения $\overline{FPS}_k^{(n)}$ рассчитывается $\overline{FPS}^{(n)}$ и выполняется интерполяция

$$N_{инт} = \frac{FPS_s}{\overline{FPS}^{(n)}} - 1$$

кадров видеопотока. Если выполняется условие

$$N_{инт} \notin \mathbb{N},$$

то при поступлении новых кадров интерполируется различное число кадров. Пусть $N_{инт} \in \mathbb{R}$ и $N_{инт}$ в некотором приближении можно представить в виде обыкновенной дроби

$$N_{инт} \approx \frac{N_{и}}{N_{к}}.$$

Тогда при поступлении $N_{к}$ кадров видеопотока интерполируется $N_{и}$ кадров видеопотока. Значение $N_{инт}$ обновляется при получении каждого нового значения $\overline{FPS}_k^{(n)}$. Тогда для обеспечения устойчивости метода вводится дополнительное условие:

$$N_{к} \leq n.$$

Метод проиллюстрирован на рисунке 6. Зелёная область показывает область эталонного FPS_s и эталонных границ UCL_s и LCL_s .

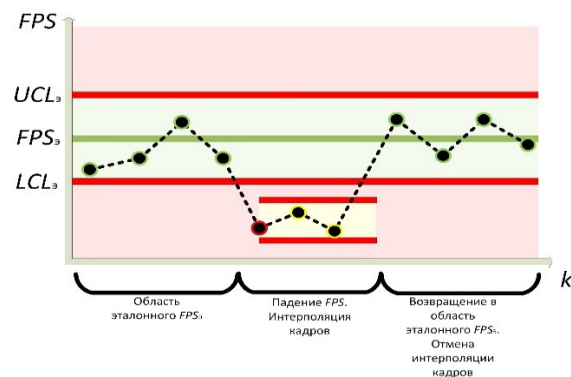


Рис. 6. Метод статистического управления процессом интенсивности видеопотока

Жёлтая область – новый процесс, который выходит за границы эталонной области. Красная область – область неприемлемых значений. Точка с зелёной обводкой – точка эталонной области. Точка с красной обводкой – точка, которая вышла за границы зелёной или жёлтой области. Жёлтая точка – точка жёлтой области.

Следует отметить, что изменения среднегрупповых моментарных $FPS^{(n)}$ стремятся к измерению средних FPS при усреднении по времени. Пусть рассматривается период измерения FPS в одну секунду. Тогда при измерении FPS при усреднении по времени рассчитывается количество кадров NF , которое было декодировано за период в 1 секунду, после чего FPS вычисляется как:

$$FPS = \frac{1}{NF} \left(\frac{K}{c} \right).$$

Пусть FPS камеры, с которой поступает видеопоток, равен 25 кадрам в секунду. Тогда задержка между кадрами видеопотока T , согласно (3), равна 40 мс. При этом возможны некоторые флуктуации FPS . Тогда при $n = 25$ среднегрупповой моментарный FPS будет соответствовать FPS , который измерен за одну секунду.

В данном методе использование моментарного FPS целесообразно, так как позволяет рассматривать FPS за периоды времени, меньшие 1 с. При передаче FPV-видеопотока в режиме реального времени данная задержка является критичной.

3 Методика эксперимента

Эксперимент по применению метода статистического управления стохастическим процессом интенсивности видеопотока проводится на установке (рис. 7). Используемый видеопоток зациклен. Кадры видео (рис. 8), записанного на ПК-А в виде видеофайла, кодируются нейросетевым видеокодеком NVC третьей конфигурации, основанной на кодеке DCVC-RT [40], и передаются по КИО на ПК-Б. Между ПК-А и ПК-Б расположен NetDisturb, имитирующий увеличение потерь кадров видеопотока в КИО. На ПК-Б видеопоток декодируется, после чего записывается статистика интенсивности видеопотока.

На ПК-А кодирование кадров видеопотока проводится с применением видеокарты Nvidia RTX 4080 [41] с CUDA [42]. На ПК-Б декодирование кадров видеопотока проводится с применением видеокарты Nvidia RTX 4080 Super [41].



Рис. 7. Экспериментальная установка



Рис. 8. Примеры кадров видеопотока

Программа испытаний.

1. 10 минут. 0% потерь кадров видеопотока в NetDisturb.
2. 5 минут. 50% потерь кадров видеопотока в NetDisturb.
3. 10 минут. 20% потерь кадров видеопотока в NetDisturb.
4. 10 минут. 0% потерь кадров видеопотока в NetDisturb.

Для исключения фактора высокой флуктуации интенсивности видеопотока при инициализации NVC отбираются измерения, сделанные с 1 минуты после начала эксперимента. В результате получается набор значений интенсивности видеопотока на каждом поступившем кадре. На основе данного набора применяется метод компенсации интенсивности видеопотока с вариацией параметров:

- размера подгруппы $n \in \{1, 2, \dots, 25\}$;
- метода определения границ управляемости процесса UCL и LCL (на основе среднегруппового размаха либо на основе среднегруппового стандартного отклонения).

Метрики оценки работоспособности метода:

- доля ложных определений выхода процесса из управляемого состояния $P_{лп}$;
- доля пропущенных определений выхода процесса из управляемого состояния $P_{ло}$.

4 Результаты эксперимента

В результате проведённого эксперимента получена зависимость интенсивности видеопотока от времени (рис. 9: в зависимости от размера группы агрегации n). При увеличении доли потерь пакетов увеличивается флуктуация индивидуальных и среднегрупповых значений FPS . Кроме того, при увеличении n уменьшается флуктуация значений индивидуальных и среднегрупповых значений FPS .

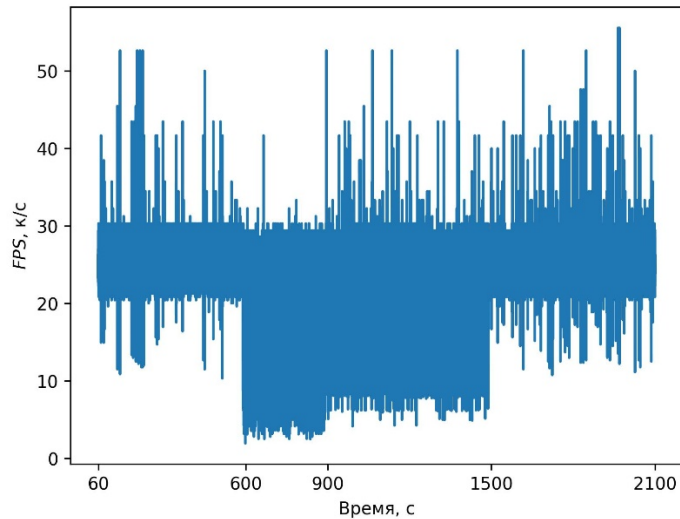
Так для $n = 1$ (индивидуальных значений):

- во время 60-600 с (0% потерь) $FPS \in [10,23; 52,69]$ (к/с);
- во время 600-900 с (50% потерь) $FPS \in [1,99; 41,62]$ (к/с);
- во время 900-1500 с (25% потерь) $FPS \in [4,13; 52,62]$ (к/с);
- во время 1500-2100 с (0% потерь) $FPS \in [10,78; 55,71]$ (к/с).

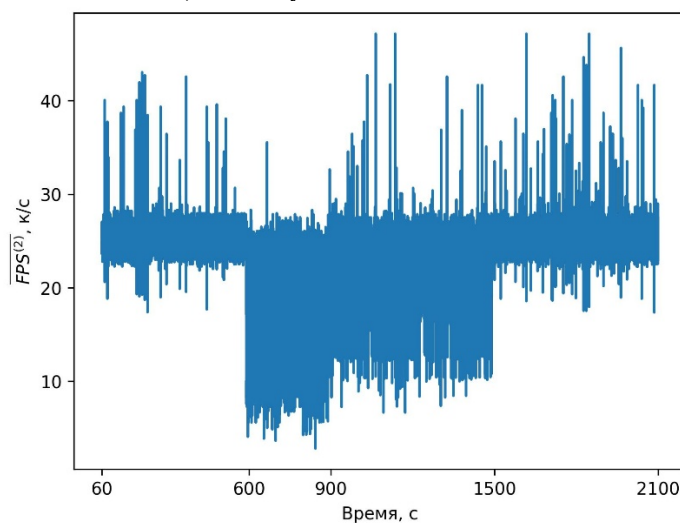
В свою очередь для $n = 25$:

- во время 60-600 с (0% потерь) $\overline{FPS^{(25)}} \in [24,83; 26,96]$ (к/с);
- во время 600-900 с (50% потерь) $\overline{FPS^{(25)}} \in [12,75; 20,66]$ (к/с);

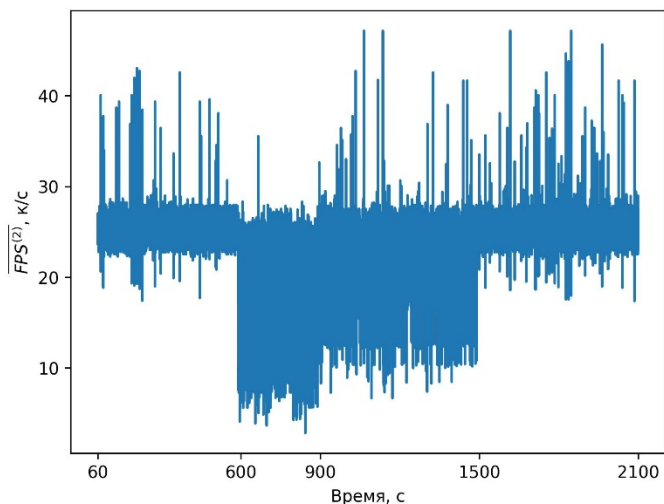
- во время 900-1500 с (25% потерь) $\overline{FPS}^{(25)} \in [18,78; 25,57]$ (к/с);
- во время 1500-2100 с (0% потерь) $\overline{FPS}^{(25)} \in [24,77; 27,07]$ (к/с).



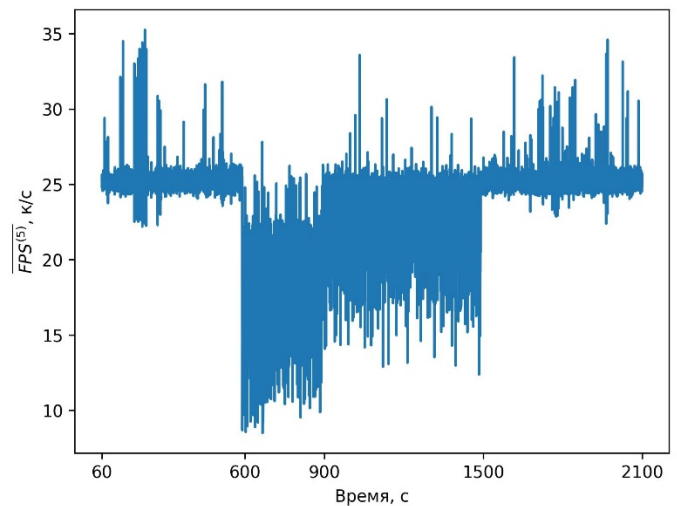
а) Индивидуальные значения FPS



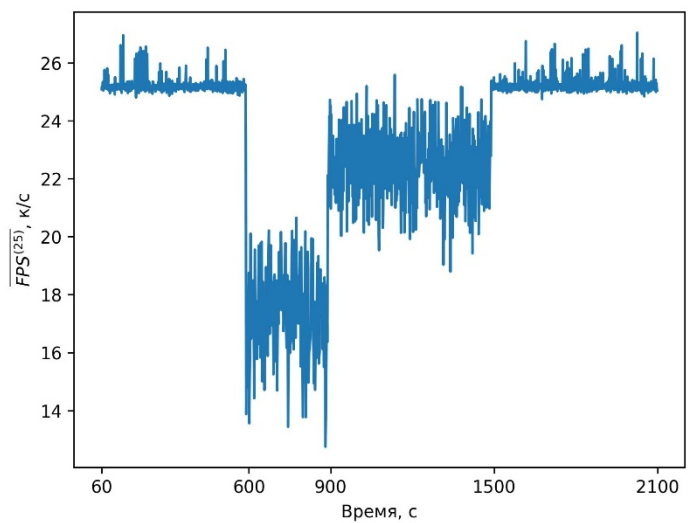
б) Среднегрупповые значения $\overline{FPS}^{(2)}$ при размере групп $n = 2$



в) Среднегрупповые значения $\overline{FPS}^{(5)}$ при размере групп $n = 5$



г) Среднегрупповые значения $\overline{FPS}^{(10)}$ при размере групп $n = 10$



д) Среднегрупповые значения $\overline{FPS}^{(25)}$ при размере групп $n = 25$

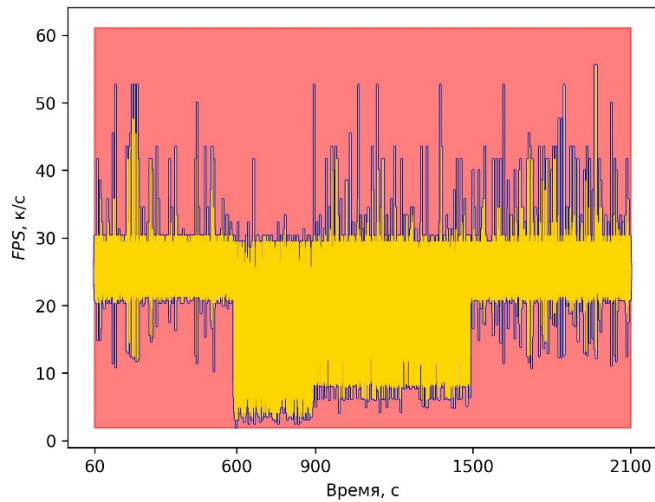
Рис. 9. Зависимость индивидуальных и среднегрупповых значений от времени

Эксперименты показали (табл. 3), что применение метода для индивидуальных значений ($n = 1$) приводит к тому, что процесс меняется быстрее, чем успевают накопиться значения размаха R либо стандартного отклонения σ для вычисления среднего значения размаха \bar{R} или среднего стандартного отклонения $\bar{\sigma}$ (рис. 10а). Соответственно, без дополнительного времени на инициализацию данный метод при $n = 1$ неприменим. При больших значениях n (рис. 10, 11) количество ложных выходов процесса из управляемого состояния уменьшается.

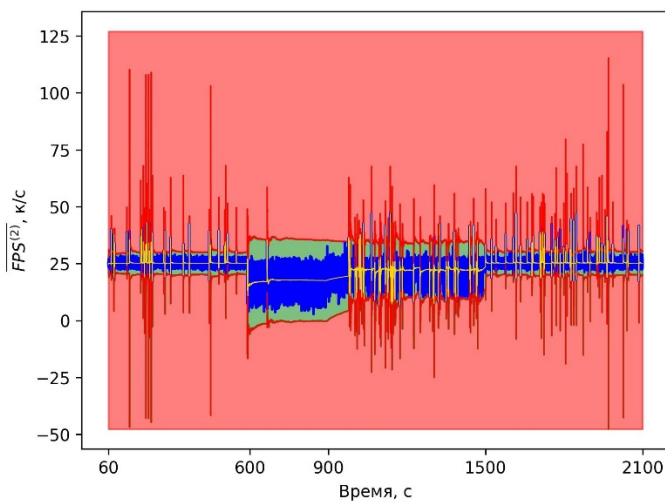
Выход процесса интенсивности видеопотока из управляемого состояния характеризуется резким изменением значений его верхней и нижней контрольных границ UCL и LCL .

На рисунках 10 и 11: зелёная область – область значений, при которых управляемое состояние интенсивности видеопотока сохраняется; красная область – область значений, при попадании значений интенсивности видеопотока в которую процесс выходит из управляемого

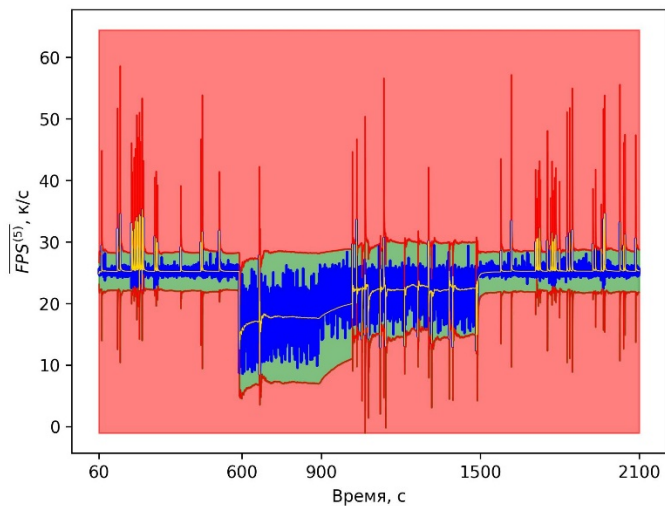
состояния; синяя линия – индивидуальные или среднегрупповые значения; красные линии – контрольные границы UCL и LCL ; жёлтая линия – среднее значение процесса интенсивности видеопотока.



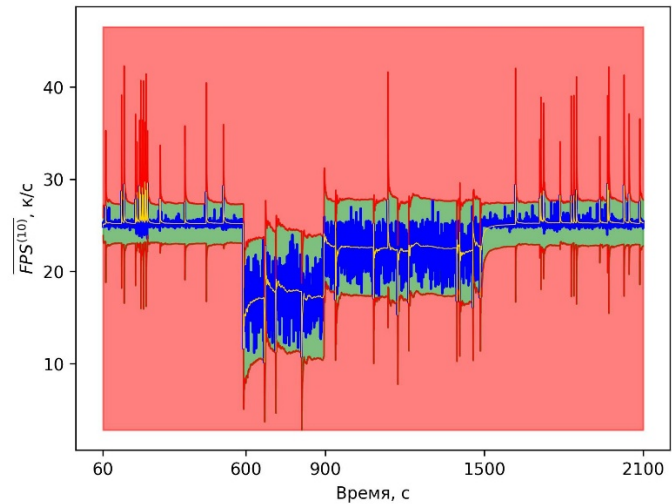
а) Индивидуальные значения FPS



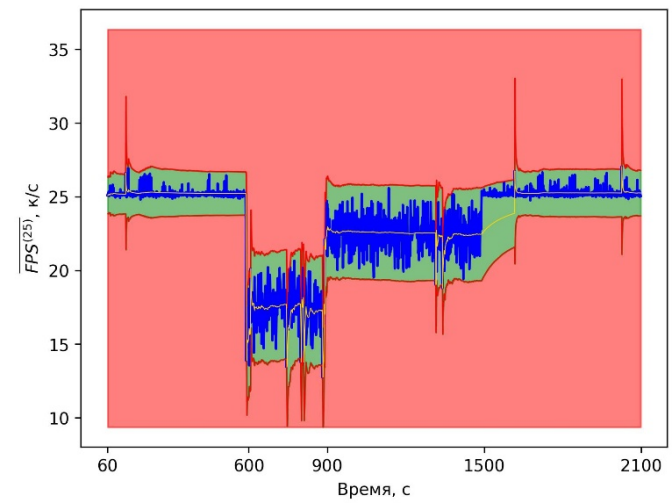
б) Среднегрупповые значения $FPS^{(2)}$ при размере групп $n = 2$



в) Среднегрупповые значения $FPS^{(5)}$ при размере групп $n = 5$

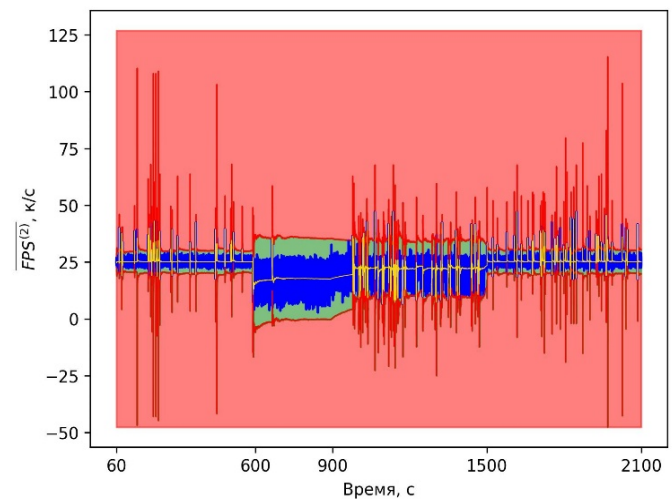


г) Среднегрупповые значения $FPS^{(10)}$ при размере групп $n = 10$



д) Среднегрупповые значения $FPS^{(25)}$ при размере групп $n = 25$

Рис. 10. Границы управляемости процесса интенсивности видеопотока: метод расчёта с использованием размаха



а) Среднегрупповые значения $FPS^{(2)}$ при размере групп $n = 2$

Таблица 3

Результаты экспериментов

n	Вычисление границ из значений размаха		Вычисление границ из значений стандартного отклонения	
	$P_{лп}$	$P_{ло}$	$P_{лп}$	$P_{ло}$
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

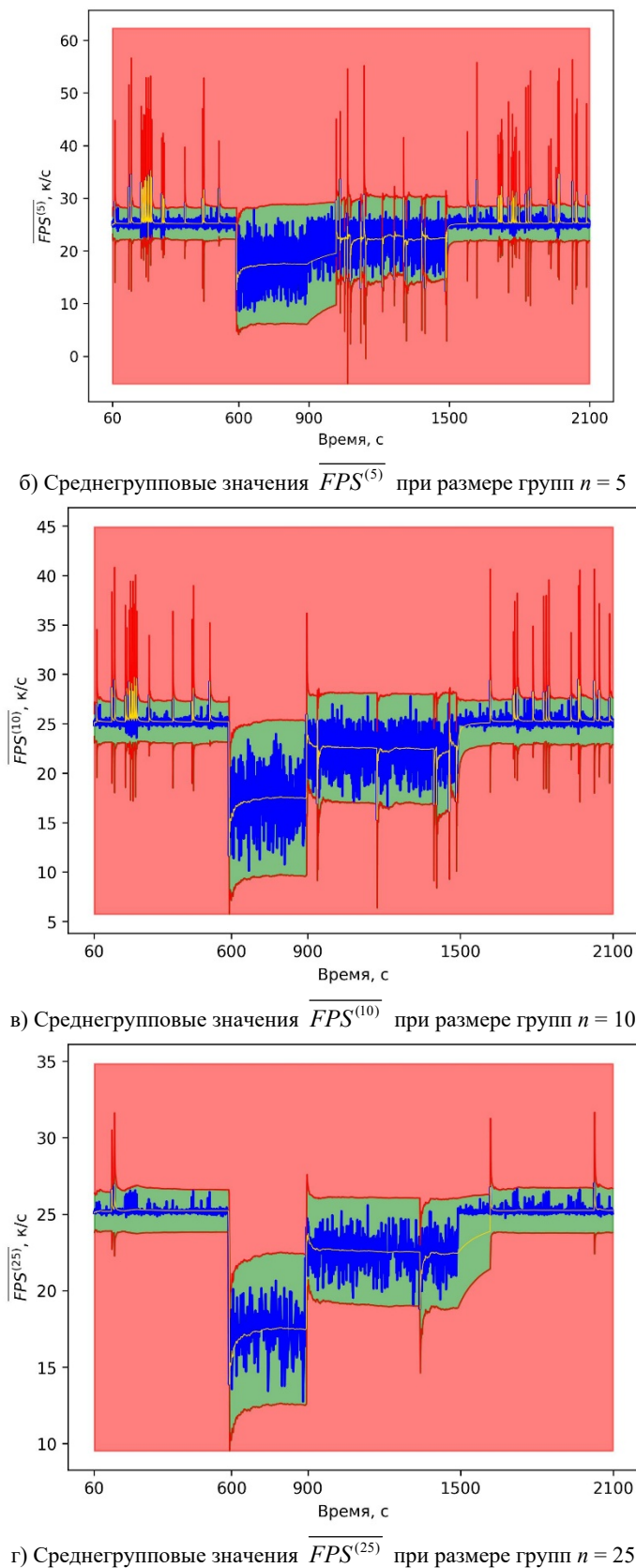


Рис. 11. Границы управляемости процесса интенсивности видеопотока: метод расчёта с использованием стандартного отклонения

Метод расчёта значений контрольных границ, основывающийся на использовании стандартного отклонения, показывает себя более стабильным и допускает меньше ошибок, чем метод, который основывается на использовании размаха. Тем не менее, в этом случае допускаются пропуски изменений процессов (рис. 12).

При достаточно малых n в большинстве случаев не удаётся корректно определять изменение процесса с 25% до 50% потерь. При достаточно больших n в абсолютном большинстве случаев не удаётся корректно определять изменение процесса с 25% потерь до 0% потерь. Единственные методы, которые обеспечивают полное определение всех процессов: вычисление границ из размаха с $n \in \{1; 9; 19\}$; вычисление границ из стандартного отклонения с $n = 9$. Из этих методов наименьшую долю ложных определений выхода процесса из управляемых состояний имеет вычисление границ из размаха с $n = 19$ (на рис. 13 показаны решения об интерполяции кадров видеопотока).

Как видно на рисунке 11, моментарные значения FPS иногда становятся больше 25 FPS. При этом FPS камеры, с которой поступают кадры видеопотока, составляет 25 FPS, и теоретически FPS не может подниматься выше 25. Полученные значения индивидуального FPS следует отнести к погрешности измерений. При этом увеличение размера подгрупп n позволяет в значительной степени устранить превышение теоретического предела FPS и как следствие устранить данную погрешность. Так при размерах подгрупп порядка 19-25 превышения теоретического предела FPS крайне редки.

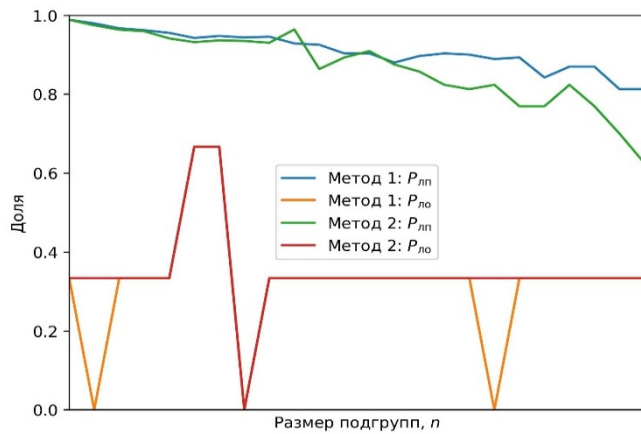
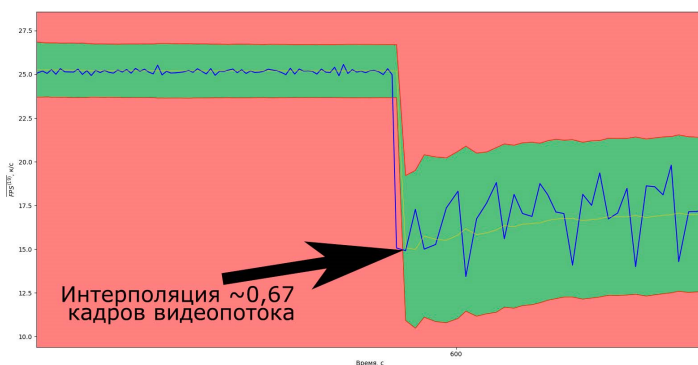
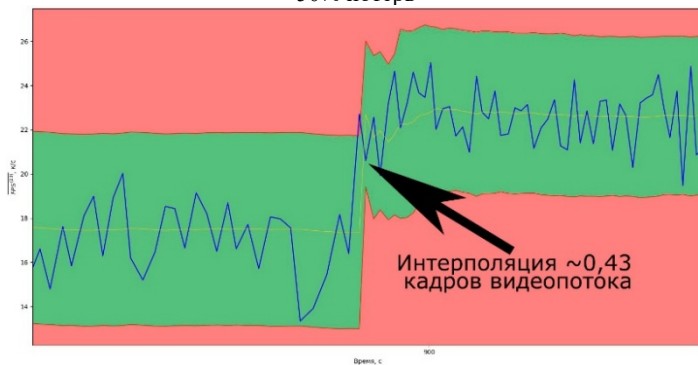


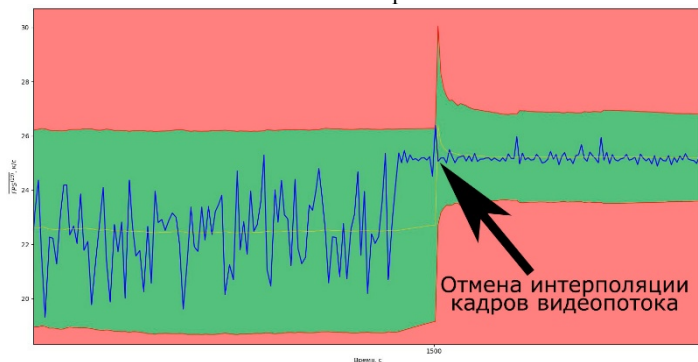
Рис. 12. Результаты экспериментов в графической форме



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

Рис. 13. Моменты решений об интерполяции кадров

Как следует из формулы (3), при 25 FPS задержка между соседними кадрами видеопотока составляет приблизительно 40 мс, а при 50 FPS – приблизительно 20 мс. Соответственно, погрешность в измерениях приблизительно составляет ± 20 мс.

Погрешность измерений обусловлена тем, что при завершении декодирования каждого кадра видеопотока выполняются: запись метки времени в файл на жёстком диске и вывод данной метки в консоль. Это занимает от нескольких единиц до пары десятков миллисекунд, что согласуется с погрешностью.

Карты Шухарта основываются на применении правила трёх сигм. Соответственно, между границами статистической управляемости процесса UCL и LCL входит приблизительно 99,7% значений интенсивности видеопотока [43]. Тем не менее, при управлении беспилотными воздушными судами от первого лица получаются тысячи и десятки тысяч значений интенсивности видеопотока. Кроме того, возможны дополнительные выбросы, связанные с кратковременными воздействиями на канал информационного обмена.

Соответственно, как показано на рисунках 10 и 11, высокая интенсивность процесса интенсивности видеопотока приводит к большому количеству выбросов. Увеличение размера подгрупп n обеспечивает уменьшение количества выбросов, но при этом увеличение ложных отсутствий обнаружений выхода процесса из управляемого состояния. Как указано выше, лучшее соотношение между ложными обнаружениям и ложными отсутствиями обнаружений процессов из управляемого состояния достигается при размере подгрупп $n = 19$.

Средняя время зрительно-моторной реакции составляет приблизительно 200 мс [44]. Пусть среднегрупповая интенсивность видеопотока составляет 25 FPS. Тогда при $n = 19$ время реагирования системы на уменьшение интенсивности видеопотока составит 760 мс. Дополнительная задержка относительно зрительно-моторной реакцией человека составит 560 мс. В то время как метод статистического контроля интенсивности видеопотока при $n \in [1; 5]$ время реакции системы принимается незначительным, так как не превышает время зрительно-моторной реакции оператора. Тем не менее, в этом случае существует большое количество ложных срабатываний и как следствие большое количество ложных интерполированных кадров, которые имеют худшее качество, чем восстановленные оригинальные кадры видеопотока.

5 Заключение

В настоящей работе рассмотрено применение контрольных карт Шухарта для управления процессом интенсивности видеопотока. Предложен метод, отличающийся от существующих тем, что для управления процессом интенсивности видеопотока используются контрольные карты Шухарта.

Результаты экспериментов показали, что наилучшими параметрами метода является размер подгрупп и вычисление контрольных границ на основе среднегруппового размаха. В этом случае доля пропущенных определений выхода процесса из управляемого состояния составляет приблизительно 0. Но достаточно высокая доля ложных определений выхода процесса из управляемого состояния – 0,8889. Тем не менее,

ложное определение выхода процесса из управляемого состояния вследствие флуктуации значений интенсивности видеопотока не оказывает существенного влияния на интенсивность видеопотока. После каждого выхода процесса из управляемого состояния определяется новый процесс, на основе значений которого вычисляется требуемое количество интерполируемых кадров для поддержания стабильной интенсивности видеопотока. Если на самом деле процесс не вышел из управляемого состояния и среднegrupповое значение интенсивности видеопотока осталось неизменным, то интерполяция дополнительных кадров не происходит.

Тем не менее, при ложном определении выхода процесса из управляемого состояния выполняется пересчёт контрольных границ. Перед тем, как размер выборки (среднegrupповых размахов или стандартных отклонений) станет достаточно большим, контрольные границы могут быть смещёнными относительно эталонных контрольных границ процесса. Следовательно, если через несколько кадров видеопотока после ложного определения выхода процесса из управляемого состояния произойдёт настоящий выход процесса из управляемого состояния, вероятность обнаружения этого уменьшится. Поэтому высокая доля ложных срабатываний, 0,8889, не оказывает критического эффекта.

Развитие исследования может включать модификацию метода, в которой уменьшена доля ложных срабатываний. Для этого следует рассмотреть комплексное применение нескольких контрольных карт Шухарта: для средних значений, размахов, стандартных отклонений, медиан.

Рассмотренный метод статистического управления процессом интенсивности видеопотока с применением контрольных карт Шухарта может также использоваться для статистического управления процессом задержки видеопотока FPV-управления.

6 Благодарности

Авторы выражают благодарность аспиранту и инженеру Центра перспективных проектов и разработок Санкт-Петербургского университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича Ченскому Александру Александровичу за помощь в обработке данных и программную реализацию метода статистического управления процессом интенсивности видеопотока.

Авторы также выражают благодарность Козлове Алёне Игоревне и Кулунчакову Захару Владимировичу, технику и инженеру Центра перспективных проектов и разработок Санкт-Петербургского университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, за помощь в сборе данных для проведения исследования.

7 Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, соглашение № 071-03-2025-005, "Прикладные научные исследования в области создания и развития систем телеметрии, управления и связи для беспилотных авиационных систем на период до 2030 года с учетом импортозамещения" (регистрационный номер ПТНИ: 1024032900105-1).

Литература

1. *Betti Sorbelli F.* UAV-based delivery systems: A systematic review, current trends, and research challenges // *Journal on Autonomous Transportation Systems*. 2024. Т. 1. № 3. С. 1-40.
2. *Muchiri G. N., Kimathi S.* A review of applications and potential applications of UAV // *Proceedings of the Sustainable Research and Innovation Conference*. 2022. С. 280-283.
3. *Banafaa M. K. et al.* A comprehensive survey on 5G-and-beyond networks with UAVs: Applications, emerging technologies, regulatory aspects, research trends and challenges // *IEEE access*. 2024. Т. 12. С. 7786-7826.
4. *Raj M., Harshini N. B., Gupta S., Atiquzzaman M., Rawley O., Goel L.* Leveraging precision agriculture techniques using UAVs and emerging disruptive technologies // *Energy Nexus*. 2024. Т. 14. С. 100300.
5. *Кузнецов П. В.* Использование БПЛА в сельском хозяйстве как фактор повышения конкурентоспособности // *Мировые цивилизации*. 2024. Т. 9. № 4. С. 69-75.
6. *Камчатов И. Д.* Анализ и перспективы применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в сельском хозяйстве // *Беспилотные аппараты "БПЛА - 2024"* : сборник статей Международного молодежного форума, Минск, 22-26 апреля 2024 года. Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2024. С. 97-99.
7. *Амирова Э. Ф., Вагапов Р. И., Золкин А. Л., Малова Н. Н.* Перспективы использования беспилотных технологий в сельском хозяйстве // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2023. № 8. С. 41-48.
8. *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.
9. *Березкин 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.
10. *Li D. et al.* Application of unmanned aerial vehicle optical remote sensing in crop nitrogen diagnosis: A systematic literature review // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Т. 227. С. 109565.
11. *Кучерявый А. Е., Владыко А. Г., Киричек Р. В.* Летающие сенсорные сети – новое приложение интернета вещей // *Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании*. 2015. С. 17-22.
12. *Raju M. R., Mothku S. K., Somesula M. K., Chebrolu S.* Age and energy aware data collection scheme for urban flood monitoring in UAV-assisted Wireless Sensor Networks // *Ad Hoc Networks*. 2025. Т. 168. С. 103704.
13. *Fu X., Ren M.* Sustainable and low-AoI cooperative data acquisition in UAV-aided sensor networks // *IEEE Sensors Journal*. 2024. Т. 24. № 6. С. 9016-9031.
14. *Abed F. M., Noori A. M., Al-Saedi A. S. J.* Optimizing Application of UAV-Based SfM Photogrammetric 3D Mapping in Urban Areas // *Iraqi Journal of Science*. 2024. С. 2958-2975.
15. *Kulik V., Kirichek R.* The heterogeneous gateways in the industrial internet of things // *2018 10th International congress on ultra modern telecommunications and control systems and workshops (ICUMT)*. IEEE, 2018. С. 1-5.
16. *Liu P., Chen A. Y., Huang Y. N., Han J. Y., Lai J. S., Kang S. C., Wu T. H., Wen M. C., Tsai M. H.* A review of rotorcraft unmanned aerial vehicle (UAV) developments and applications in civil engineering // *Smart Struct. Syst*. 2014. Т. 13. № 6. С. 1065-1094.
17. *Ghauri S. A., Sarfraz M., Qamar R. A., Sohail M. F., Khan S. A.* A review of multi-UAV task allocation algorithms for a search and rescue scenario // *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 2024. Т. 13. № 5. С. 47.

18. Березкин А. А. Система информационного обмена для управления беспилотными системами от первого лица: Часть I // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. 2025. Т.17. № 4. С. 4-14. doi: 10.36724/2409-5419-2025-17-4-4-14.
19. Березкин А. А. Система информационного обмена для управления беспилотными системами от первого лица: Часть II // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. 2025. Т.17. № 5. С.4-14. doi: 10.36724/2409-5419-2025-17-5-4-14.
20. Балобанов А. В., Балобанов В. Г. Метод сжатия цифрового видеосигнала в прикладном телевидении для управления и контроля БПЛА // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. № 1. С. 16-21.
21. Сорокин И. А., Романов М. Ю., Шубаева М. Ю. Применение метода перестановочного декодирования в системе управления БПЛА малого класса (дроны, мультикоптеры) // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. № 4. С. 41-47.
22. Hashim H. A. Advances in UAV avionics systems architecture, classification and integration: a comprehensive review and future perspectives // Results in Engineering. 2025. Т. 25. С. 103786.
23. Cai Z., Wang Y., Jiang Q., Gui G., Sha J. Toward intelligent lightweight and efficient UAV identification with RF fingerprinting // IEEE Internet of Things Journal. 2024. Т. 11. №. 15. С. 26329-26339.
24. Адоньев Е. А., Зинкевич А. В. Анализ методов идентификации беспилотных летательных аппаратов в реальном времени и способы их реализации // Информационные технологии XXI века. 2020. С. 197-202.
25. Li J., Li B., Lu Y. Neural video compression with diverse contexts. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2023. Vancouver, Canada, June 18-22, 2023. С. 22616-22626.
26. Li J., Li B., Lu Y. Neural video compression with feature modulation // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2024. С. 26099-26108.
27. Guo-Hua W., Li J., Li B., Lu Y. EVC: Towards Real-Time Neural Image Compression with Mask Decay // The Eleventh International Conference on Learning Representations (ICLR-2023). 2023. С. 1-23.
28. 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.
29. Березкин А. А., Паршин А. А., Лазарев А. А. Адаптивный контроль интенсивности видеопотока при передаче FPV-трафика беспилотных систем // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. 2024. № 1(79). С. 158-161.
30. Igbekele O. J., Zhimwang J. T., Ogherohwo E. P., Kwaha B. J. Impact of Altitude and Weather Conditions on Cellular Networks: A Comprehensive Analysis of Quality of Service // Int. J. Advanced Networking and Applications. 2024. Т. 15. № 06. С. 6169-6173.
31. Mishra L., Kaabouch N. Impact of weather factors on unmanned aerial vehicles' wireless communications // Future Internet. 2025. Т. 17. №. 1. С. 27.
32. Selvam A. P., Al-Humairi S. N. S. Environmental impact evaluation using smart real-time weather monitoring systems: a systematic review // Innovative Infrastructure Solutions. 2025. Т. 10. № 1. С. 1-24.
33. Ullah M. A., Heikkinen A., Uitto M., Anttonen A., Mikhaylov K. Impact of Weather on Satellite Communication: Evaluating Starlink Resilience // arXiv preprint arXiv:2505.04772. 2025.
34. Laniewski D., Lanfer E., Meijerink B., van Rijswijk-Deij R., Aschenbruck N. WetLinks: a large-scale longitudinal Starlink dataset with contiguous weather data // arXiv preprint arXiv:2402.16448. 2024.
35. Srivastava D., Kaur G., Singh G., Singh P. Evaluation of atmospheric detrimental effects on free space optical communication system for Delhi weather // Journal of Optical Communications. 2024. Т. 45. № 1. С. 95-103.
36. Shewhart W. A. Economic control of quality of manufactured product. D. Van Nostrand Company, Inc. 1931. 467 с.
37. Бардаков С. А. Эконометрика: учебное пособие. 2-е издание, переработанное и дополненное. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2010. 264 с.
38. Selvamuthu D., Das D. Introduction to statistical methods, design of experiments and statistical quality control. Singapore : Springer Singapore, 2018. 445 с.
39. Kwak S. G., Kim J. H. Central limit theorem: the cornerstone of modern statistics // Korean journal of anesthesiology. 2017. Т. 70. № 2. С. 144-156.
40. Jia Z. et al. Towards practical real-time neural video compression // Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition Conference. 2025. С. 12543-12552.
41. Pakki K. R., Repala E. S. C., Eluri, D. B. Performance review of deep learning models on different GPU systems // 2025 International Conference on Multi-Agent Systems for Collaborative Intelligence (ICMSCI). IEEE, 2025. С. 1151-1158.
42. Niteesh L., Ampareeshan M. B. Optimizing Machine Learning Models with CUDA: A Comprehensive Performance Analysis // 2025 3rd International Conference on Communication, Security, and Artificial Intelligence (ICCSAI). IEEE, 2025. Т. 3. С. 831-836.
43. Agrawal R., Kumar D., Khan N. The impact of six sigma approach on improvement productivity in manufacturing company // International Conference on Mechanical and Energy Technologies. Singapore : Springer Nature Singapore, 2023. С. 367-381.
44. Кузнецов А. П., Васильева Ю. А., Симонова Т. О., Кайгородцев А. В. Показатели сенсорных реакций у девушек 18-20 лет с различным тоном вегетативной нервной системы // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Образование, здравоохранение, физическая культура. 2015. Т. 15. № 4. С. 24-29.

FPV VIDEO STREAM INTENSITY STOCHASTIC PROCESS CONTROL WITH SHEWHART CONTROL CHARTS

Alexander A. Berezkin, *Bonch-Bruевич Saint-Petersburg University of Telecommunications, Saint-Petersburg, Russia,*
berezkin.aa@sut.ru

Ruslan V. Kirichek, *Bonch-Bruевич Saint-Petersburg University of Telecommunications, Saint-Petersburg, Russia,* kirichek@sut.ru

Abstract

The paper investigates the possibility of using Shuhart's statistical control chart mechanism to determine the fact of the process, describing the change in the intensity of the FPV video stream on the external pilot side, leaving the state of statistical controllability to activate compensation mechanisms. The possibility of applying a method for calculating control limits based on the use of standard deviation, as well as on the basis of the range from GOST R 50779.42-99 "Statistical methods. Shukhart control charts." The necessity of using instantaneous FPS is justified. It is shown that the method of calculating control limit values based on the use of standard deviation proves to be more stable and allows for fewer errors than the method based on the use of range. It has been established that the best ratio between false detections and false non-detections of process deviations from the controlled state is achieved with a subgroup size of 19.

Keywords: control chart, Shewhart chart, process-behavior chart, statistical process, video stream, video stream intensity, FPV-control, UAVs, unmanned aviary system

References

- [1] F. Betti Sorbelli, "UAV-based delivery systems: A systematic review, current trends, and research challenges," *Journal on Autonomous Transportation Systems*, 2024, vol. 1, no. 3, pp. 1-40.
- [2] G. N. Muchiri, and S. Kimathi, "A review of applications and potential applications of UAV," in *Proceedings of the Sustainable Research and Innovation Conference*, 2022, pp. 280-283.
- [3] Banafaa M. K. et al, "A comprehensive survey on 5G-and-beyond networks with UAVs: Applications, emerging technologies, regulatory aspects, research trends and challenges," *IEEE access*, 2024, vol. 12, pp. 7786-7826.
- [4] M. Raj, N. B. Harshini, S. Gupta, M. Atiquzzaman, O. Rawlley, and L. Goel, "Leveraging precision agriculture techniques using UAVs and emerging disruptive technologies," *Energy Nexus*, 2024, vol. 14, pp. 100300.
- [5] R. V. Kuznetsov, "The use of UAVs in agriculture as a factor of increasing competitiveness," *Mirovye civilizacii*, 2024, vol. 9, no. 4, pp. 69-75.
- [6] I. D. Kamchatov, "Analysis and perspectives of unmanned aerial vehicles (UAV) application in agriculture," in *BPLA-2024*, Minsk: Belarusian state technological university, 2024, pp. 97-99. (in Russian)
- [7] E. F. Amirova, R. I. Vagapov, A. L. Zolkin, and N. N. Malova, "Prospects for the use of unmanned technologies in agriculture," *Nauchno-technicheskij vestnik Povolzh'ja*, 2023, vol 8, pp. 41-48. (in Russian)
- [8] A. A. Berezkin, A. A. Chenskiy, R. V. Kirichek, and A. A. Zaharov, "Research of latent video stream compression methods for FPV control of UAVs," *Electrosvyaz*, 2024., no. 6, pp. 46-56. (in Russian)
- [9] A. A. Berezkin, R. M. Vivchar, A. A. Chenskiy, and R. V. Kirichek, "Research of video stream frame delay in UAV FPV-control information exchange channel in hybrid communication network terrestrial segment," *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2025, vol. 11, no. 1, pp. 7-17. (in Russian)
- [10] D. Li et al, "Application of unmanned aerial vehicle optical remote sensing in crop nitrogen diagnosis: A systematic literature review," *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, vol. 227, pp. 109565.
- [11] A. E. Koucheryavy, A. G. Vlydyko, and R. V. Kirichek, "Flying ubiquitous sensor networks - a new application of internet of things," *Aktual'nye problemy infotelekkommunikacij v nauke i obrazovanii*, 2015, pp. 17-22. (in Russian)
- [12] M. R. Raju, S. K. Mothku, M. K. Somesula, and S. Chebrolu, "Age and energy aware data collection scheme for urban flood monitoring in UAV-assisted Wireless Sensor Networks," *Ad Hoc Networks*, 2025. vol. 168, pp. 103704.
- [13] X. Fu, and M. Ren, "Sustainable and low-Aol cooperative data acquisition in UAV-aided sensor networks," *IEEE Sensors Journal*, 2024, vol. 24, no. 6, pp. 9016-9031.
- [14] F. M. Abed, A. M. Noori, and A. S. J. Al-Saedi, "Optimizing Application of UAV-Based SfM Photogrammetric 3D Mapping in Urban Areas," *Iraqi Journal of Science*, 2024, pp. 2958-2975.
- [15] V. Kulik, and R. Kirichek, "The heterogeneous gateways in the industrial internet of things," in *2018 10th International congress on ultra modern telecommunications and control systems and workshops (ICUMT)*, 2018, pp. 1-5.
- [16] P. Liu, A. Y. Chen, Y. N. Huang, J. Y. Han, J. S. Lai, S. C. Kang, T. H. Wu, M. C. Wen, and M. H. Tsai, "A review of rotorcraft unmanned aerial vehicle (UAV) developments and applications in civil engineering," *Smart Struct. Syst*, 2014, vol. 13, no. 6, pp. 1065-1094.
- [17] S. A. Ghauri, M. Sarfraz, R. A. Qamar, M. F. Sohail, S. A. Khan, "A review of multi-UAV task allocation algorithms for a search and rescue scenario," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 2024, vol. 13, no. 5, pp. 47.
- [18] A. Berezkin, "Information exchange system for unmanned systems first person view control. Part I," *H&ES Reserch*. 2025. Vol. 17. No. 4, pp. 4-14. Doi: 10.36724/2409-5419-2025-17-4-4-14. (in Russian)

- [19] A. Berezkin, "Information exchange system for unmanned systems first person view control. Part II," *H&ES Reserch*. 2025. Vol. 17. No. 5, pp. 4-14. Doi: 10.36724/2409-5419-2025-17-5-4-14. (in Russian)
- [20] A. V. Balobanov, and V. G. Balobanov, "Compression method of digital video signal in application television for management and control of unmanned aerial vehicles," *T-Comm*, 2019, vol. 13, no. 1, pp. 16-21. (in Russian)
- [21] I. A. Sorokin, M. Y. Romanov, M. Y. Shibaeva, "Application of permutation decoding method in a small class UAV control system (drones, multicopter)," *T-Comm*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 41-47. (in Russian)
- [22] H. A. Hashim, "Advances in UAV avionics systems architecture, classification and integration: a comprehensive review and future perspectives," *Results in Engineering*, 2025, vol. 25, pp. 103786.
- [23] Z. Cai, Y. Wang, Q. Jiang, G. Gui, and J. Sha, "Toward intelligent lightweight and efficient UAV identification with RF fingerprinting," *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, vol. 11, no. 15, pp. 26329-26339.
- [24] E. A. Adon'ev, A. V. Zinkevich, "Analysis of unmanned aerial vehicles real-time identification methods and ways for their implementation," *Informacionnie tehnologii XXI veka*, 2020, pp. 197-202. (in Russian)
- [25] J. Li, B. Li, and Y. Lu, "Neural video compression with diverse contexts," in *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2023*, Vancouver, Canada, June 18-22, 2023, pp. 22616-22626.
- [26] J. Li, B. Li, and Y. Lu, "Neural video compression with feature modulation," in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2024, pp. 26099-26108.
- [27] W. Guo-Hua, J. Li, B. Li, and Y. Lu, "EVC: Towards Real-Time Neural Image Compression with Mask Decay," *The Eleventh International Conference on Learning Representations (ICLR-2023)*, 2023, pp. 1-23.
- [28] A.A. Berezkin, A.A. Chenskiy, and R.V. Kirichek, "Research of video stream intensity limits in UAV FPV control in frame prediction mode. Part I: Models and methods," *The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science*, 2024, vol. 18, no. 3, pp. 115-139. (in Russian)
- [29] A. A. Berezkin, A. A. Parshin, and A. A. Lazarev, "Adaptive video stream intensity control for fpv traffic of unmanned systems," in *Nauchno-tehnicheskaja konferencija Sankt-Peterburgskogo NTO RES im. A.S. Popova, posvjashhennaja Dnju radio*, 2024, vol. 79, no. 1, pp. 158-161.
- [30] O. J. Igbekele, J. T. Zhimwang, E. P. Ogberohwo, and B. J. Kwaha, "Impact of Altitude and Weather Conditions on Cellular Networks: A Comprehensive Analysis of Quality of Service," *Int. J. Advanced Networking and Applications*, 2024, vol. 15, no. 06, pp. 6169-6173.
- [31] L. Mishra, and N. Kaabouch, "Impact of weather factors on unmanned aerial vehicles' wireless communications," *Future Internet*, 2025, vol. 17, no. 1, pp. 27.
- [32] A. P. Selvam, and S. N. S. Al-Humairi, "Environmental impact evaluation using smart real-time weather monitoring systems: a systematic review," *Innovative Infrastructure Solutions*, 2025, vol. 10, no. 1, pp. 1-24.
- [33] M. A. Ullah, A. Heikkinen, M. Uitto, A. Anttonen, and K. Mikhaylov, "Impact of Weather on Satellite Communication: Evaluating Starlink Resilience," arXiv preprint, arXiv:2505.04772, 2025.
- [34] D. Laniewski, E. Lanfer, B. Meijerink, R. van Rijswijk-Deij, and N. Aschenbruck, "WetLinks: a large-scale longitudinal Starlink dataset with contiguous weather data," arXiv preprint, arXiv:2402.16448, 2024.
- [35] D. Srivastava, G. Kaur, G. Singh, and P. Singh, "Evaluation of atmospheric detrimental effects on free space optical communication system for Delhi weather," *Journal of Optical Communications*, 2024, vol. 45, no. 1, pp. 95-103.
- [36] W. A. Shewhart, Economic control of quality of manufactured product, D. Van Nostrand Company, Inc., 1931, 467 p.
- [37] S. A. Bardasov, Econometrics: training manual. Second edition, augmented and revised, (in Russian), Tjumen': Izdatel'stvo Tjumenskogo gosudarstvennogo universiteta, 2010, 264 p.
- [38] D. Selvamuthu, and D. Das, Introduction to statistical methods, design of experiments and statistical quality control, Singapore : Springer Singapore, 2018, 445 p.
- [39] S. G. Kwak, and J. H. Kim, "Central limit theorem: the cornerstone of modern statistics," *Korean journal of anesthesiology*, 2017, vol. 70, no. 2, pp. 144-156.
- [40] Z. Jia et al, "Towards practical real-time neural video compression," in *Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition Conference*, 2025, pp. 12543-12552.
- [41] K. R. Pakki, E. S. C. Repala, and D. B. Eluri, "Performance review of deep learning models on different GPU systems," in *2025 International Conference on Multi-Agent Systems for Collaborative Intelligence (ICMSCI)*, 2025, pp. 1151-1158.
- [42] L. Niteesh, and M. B. Ampareeshan, "Optimizing Machine Learning Models with CUDA: A Comprehensive Performance Analysis," in *2025 3rd International Conference on Communication, Security, and Artificial Intelligence (ICCSAI)*, 2025, vol. 3, pp. 831-836.
- [43] R. Agrawal, D. Kumar, and N. Khan, "The impact of six sigma approach on improvement productivity in manufacturing company," *International Conference on Mechanical and Energy Technologies, Singapore : Springer Nature Singapore*, 2023, pp. 367-381.
- [44] A. P. Kuznecov, Yu. A. Vasilieva, T. O. Simonova, and A. V. Kajgorodcev, "Variables of sensory reaction in 18-20-year-old girls with different levels of the autonomic nervous system tonus," *Vestnik Yuzhno-uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Obrazovanie, zdravooхранenie, fizicheskaja kultura*, 2015. vol. 15, no. 4, pp. 24-29. (in Russian)

Information about authors:

Alexander A. Berezkin, Bonch-Bruевич Saint-Petersburg University of Telecommunications, Saint-Petersburg, Russia, ORCID: 0000-0002-1748-8642
Ruslan V. Kirichek, Bonch-Bruевич Saint-Petersburg University of Telecommunications, Saint-Petersburg, Russia, ORCID: 0000-0002-8781-6840