УДК 004.5:004.451

Исследование временных задержек и джиттера в беспроводном канале бимануальной системы управления реального времени

Воронин А.А., Кравец А.Г.
Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)
г. Волгоград, Российская Федерация

В современных человеко-машинных системах (ЧМС), комплексах телеоперации роботов, иммерсивных тренажерных средах [1] и пространственных интерфейсах критическим параметром эффективности оператора является сквозная задержка передачи воздействий, нормативный порог которой составляет менее 15–20 мс. [2]. Превышение данного лимита вызывает сенсомоторную рассинхронизацию оператора и рост ошибок наведения. Традиционные беспроводные протоколы (Bluetooth LE, Wi-Fi TCP/UDP) вносят недетерминированный джиттер до 15–50 мс из-за накладных расходов сетевых стеков.

Целью работы является инструментальная оценка сквозного времени доставки, дисперсии межкадровых интервалов и задержки диспетчеризации драйвера при бимануальном сборе дискретно-пространственной телеметрии.

Разработанный конвейер включает носимые контроллеры ESP32-C6 (кистевые модули), шлюз ESP32-WROOM и C++ диспетчер хоста. Передача ведется короткими Action-кадрами фиксированной длины 32 байта по протоколу ESP-NOW (2.4 ГГц) без установления логической ассоциации. Приемный шлюз транслирует поток в порт со скоростью 921 600 бод. Драйвер хоста выполняет атомарную конкатенацию статусов рук в единый 64-битный ключ управления $K = (Opcode_L << 32) \mid Opcode_R$, исключая гонки потоков.

Экспериментальное профилирование выполнено на непрерывной рабочей сессии объемом N = 10 000 пакетов с регистрацией аппаратными таймерами QPC. Статистические показатели приведены в таблице 1.

Таблица 1. Статистические параметры временного тракта

Параметр	Интервал T_{arr}, мс	Время обработки T_{proc}, мс
Математическое ожидание	6.81	0.21
Медиана	6.83	0.23
Среднеквадратичное отклонение	1.39	0.26
95-й перцентиль	9.06	0.44
99-й перцентиль	10.43	0.74

Медианный период поступления кадров 6.83 мс соответствует устойчивой частоте опроса 146.4 Гц, согласуясь с аппаратным циклом таймера (5 мс), опросом датчика по шине I2C (0.8 мс) и временем нахождения в эфире (1 мс). Интегральные характеристики тракта и алгоритмическая сложность драйвера представлены на рис. 1.

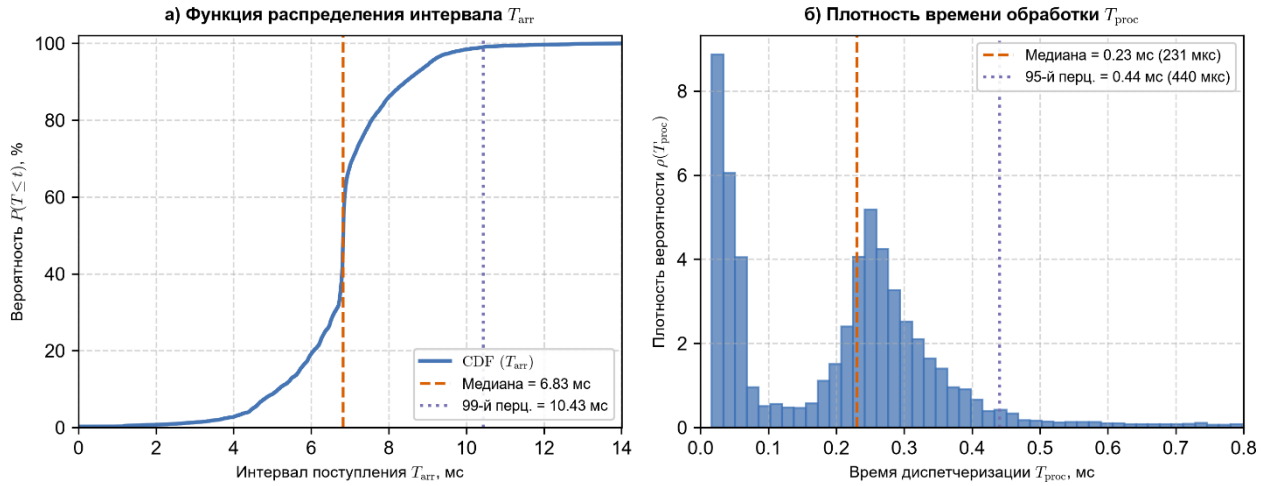


Рисунок 1. Статистические характеристики задержек тракта

Кривая CDF (рис. 1а) показывает, что 99% пакетов доставляются хосту быстрее 10.43 мс, устраняя накопление фазового запаздывания. Гистограмма (рис. 1б) подтверждает субмиллисекундную сложность конвейера: медиана составляет 0.23 мс (231 мкс), а P_{95} не превышает 0.44 мс (440 мкс). Динамика межкадровых интервалов телеметрии приведена на рис. 2.

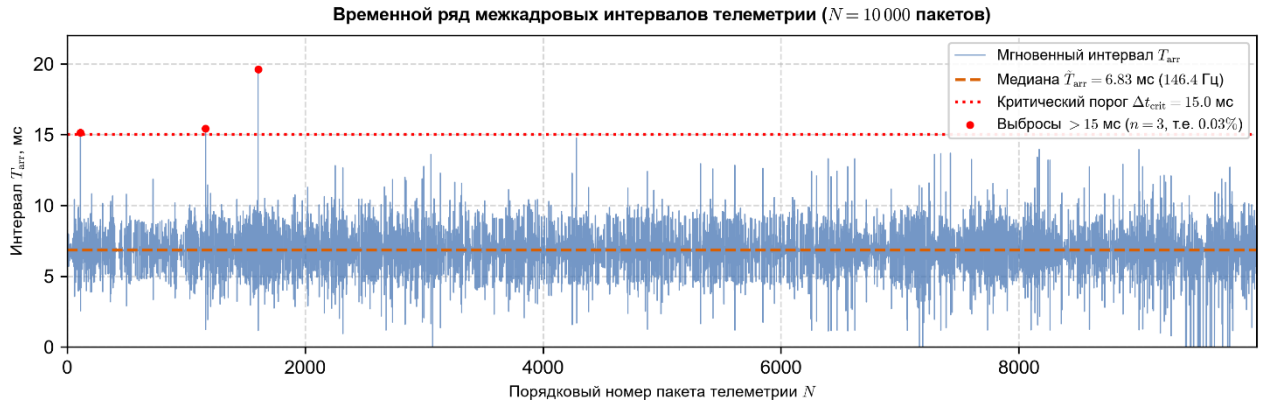


Рисунок 2. Хронограмма межкадровых интервалов потока телеметрии

Анализ временного ряда (рис. 2) доказывает стационарность радиоканала за 68 секунд непрерывной передачи. Зафиксировано лишь 3 превышения порога 15 мс (максимум 19.6 мс, т.е. 0.03% выборки), обусловленных аппаратными ретрансмитами Wi-Fi при интерференции на 2.4 ГГц. Более 98.3% пакетов поступают с интервалом менее 10 мс. Полная расчетная сквозная задержка тракта ввода составляет:

$$T_{E2E} = T_{I2C} + T_{ESP\text{-}NOW} + T_{UART} + T_{proc} = 0.8 + 1.0 + 0.35 + 0.23 = 2.38 \text{ мс},$$

где T_{I2C} — аппаратный опрос датчика по шине I2C;

$T_{ESP\text{-}NOW}$ — время передачи пакета в радиоэфире;

T_{UART} — трансляция через последовательный порт;

T_{proc} — время диспетчеризации в драйвере.

Архитектура гетерогенного канала обеспечивает частоту обновления 146.4 Гц при джиттере 1.39 мс и задержке драйвера 0.23 мс. Метод высвобождает свыше 85% нормативного бюджета Motion-to-Photon (менее 15 мс), подтверждая применимость решения в прецизионных контурах телеоперации роботов и ЧМС.

Список использованной литературы

1. Кравец А.Г., Коробкин П.Д. Иммерсивная тренажерная система стрелковой подготовки: архитектура, программно-аппаратная реализация и метрики эффективности // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2026. – Т. 14, № 5(56). – EDN XWOLDQ.

2. Moniruzzaman M. et al. Network latency in teleoperation of connected and autonomous vehicles: A review // Sensors. – 2024. – Vol. 24, No. 3957. – P. 11.