Вероятностный метод оценки качества управления беспилотными системами

В. В. Кечко

Санкт-Петербургский государственный
университет телекоммуникаций
имени М. А. Бонч-Бруевича
kechko30@gmail.com

Р. М. Вивчарь

Санкт-Петербургский государственный
университет телекоммуникаций
имени М. А. Бонч-Бруевича
ramzec9322@rambler.ru

Аннотация. Предложенный в работе метод оценки качества для управления беспилотными системами основан на вероятностном анализе, исключая необходимость субъективного подбора весовых коэффициентов. В его основе – имитационное моделирование, ядерная оценка плотности и метод Монте-Карло, что позволяет объективно оценивать вероятность соответствия параметров заданным требованиям. Такой подход учитывает случайные флуктуации и адаптируется к изменяющимся условиям эксплуатации, обеспечивая точную и достоверную оценку.

Ключевые слова: беспилотные системы, оценка качества связи, вероятностный анализ, имитационное моделирование, ядерная оценка плотности, метод Монте-Карло, задержка передачи, структурное сходство видео, устойчивость связи, анализ параметров связи

I. ВВЕДЕНИЕ

FPV-управление (First-Person View) стало неотъемлемым инструментом в работе беспилотных систем. От стабильности передачи видеопотока и команд зависит точность выполнения задач: от инспекций промышленных объектов до доставки грузов в труднодоступные районы. Здесь же встает вопрос: как точно оценить работу каналов связи, если на сцене сразу появляется масса параметров от помех и погодных условий до особенностей самой аппаратуры?

Цель исследования – разработка методики, основанной на вероятностном подходе, для многокритериальной оценки эффективности каналов связи FPV. Такой подход позволяет объединить различные критерии без необходимости субъективного задания весовых коэффициентов, что открывает новые перспективы для повышения точности управления беспилотными комплексами.

II. ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДИКА

Подход к решению проблемы: для оценки качества каналов связи предлагаем вероятностный метод, который рассчитывает вероятность того, что все ключевые параметры остаются в пределах заданных диапазонов [1]. Такой подход позволяет свести многокритериальную задачу к единой численной оценке – вероятности соответствия каналов связи заданным требованиям.

Основные этапы методики: Определяем границы допустимых значений. Для каждого критерия задаются пороговые значения: какая задержка считается приемлемой, насколько высокими должны быть SSIM и

PSNR, а также какой уровень сбоев допустим. Это даёт чёткое понимание, в каких условиях система остаётся работоспособной.

1. Проводим имитационные эксперименты. Модель «прокручивает» разные сценарии работы канала, создавая выборку значений параметров в условиях реальной эксплуатации. Такой анализ помогает учесть влияние случайных факторов и нестабильности связи.

2. Определение плотности вероятности методом ядерной оценки. Для полученной выборки значений применяется метод Розенблатта–Парзена (ядерная оценка плотности). Этот метод позволяет восстановить многомерное распределение случайных величин без предположения об априорной форме функции распределения, что особенно важно при работе с комплексными системами.

3. Определение итоговой вероятности методом Монте-Карло. Поскольку аналитический расчёт вероятности попадания параметров в допустимые диапазоны затруднён, применяется численный метод Монте-Карло. Он позволяет оценить значение интеграла плотности вероятности, используя случайный выбор точек в многомерном пространстве.

III. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОЦЕНКИ

- Задержка передачи видео (T_3^B): если изображение отстаёт даже на доли секунды, оператор может принять неверное решение. В критических ситуациях это равносильно потере управления.
- Задержка управляющих сигналов (T_3^Y): обеспечивает моментальную реакцию на команды оператора. При высоких задержках риск ошибок управления резко возрастает.
- Структурное сходство видео (SSIM): характеризует качество видеопотока с точки зрения сохранения деталей и структурных элементов.
- Отношение сигнала к шуму (PSNR): чем выше этот показатель, тем меньше искажений в передаче данных. Высокий уровень отношения сигнала к шуму (PSNR) обеспечивает минимальные искажения видеопотока, что критично для точности управления.
- Среднеквадратичная ошибка (MSE): оценивает разницу между переданным и исходным

изображением, полезна при анализе качества передачи.

- Новый индекс качества (NQI): учитывает корреляцию, яркость и контрастность изображения.
- Средняя субъективная оценка (MOS): отражает восприятие качества видео реальными пользователями.
- Вероятность сбоя ($P_{\text{сбоя}}$): чем ниже этот показатель, тем стабильнее канал связи, а значит – тем меньше шансов, что беспилотный комплекс окажется без управления в самый неподходящий момент.
- Объединение этих характеристик в единую оценку – нетривиальная задача. Большинство традиционных методов, например, анализ иерархий или метод главного критерия, требуют задания весов, но это вносит субъективность. В реальных условиях эксплуатации FPV-систем такой подход не всегда надёжен.

IV. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЯДЕРНОЙ ОЦЕНКИ ПЛОТНОСТИ

Предложенный метод основан на модифицированной версии ядерной оценки плотности вероятности Розенблатта–Парзена. Главное отличие от стандартного подхода — усовершенствованный алгоритм выбора коэффициента размытости ядра. За счёт этого удастся сократить вычислительные затраты и добиться более точной оценки плотности [2].

Ключевую роль в методе играет выбор параметра размытости ядра (bandwidth), обозначаемого как c . Этот параметр определяет степень сглаживания данных:

- слишком малые значения приводят к излишнему шуму,
- слишком большие – к потере важных деталей.

Для достижения баланса используется адаптивный выбор ширины размытости. В данной методике применяется модифицированный алгоритм быстрого выбора параметра c , основанный на следующем выражении:

$$c^* = \beta \sigma n^{-1/5}$$

где: σ – стандартное отклонение выборки параметров (например, задержек или уровня искажений); n – количество измерений; β – коэффициент, зависящий от вида распределения случайных величин.

Этот метод снижает вычислительные затраты и даёт более точную оценку по сравнению с традиционными подходами. Вычислительные эксперименты показали, что адаптивный выбор c^* позволяет уменьшить ошибку аппроксимации плотности вероятности и точнее учитывать особенности анализируемых данных.

V. ЯДЕРНАЯ ОЦЕНКА ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЕ

Ядерная оценка плотности – это непараметрический метод, который позволяет построить оценку плотности

вероятности исходя из выборки измеренных значений, без жесткого предположения о форме распределения. Вот как она работает и как мы её будем применять:

A. Оценка плотности:

Для набора измеренных значений $x_1, x_2, \dots, x_n$ оценка плотности в точке x вычисляется по формуле:

$$p(x) = \frac{1}{nc} \sum_{i=1}^n \varphi\left(\frac{x - x_i}{c}\right)$$

где: $\Phi(u)$ – ядровая функция (чаще всего используется гауссовское ядро или другое симметричное ядро); c – ширина размытости.

Выбор параметра c : применяется модифицированный алгоритм для выбора оптимального значения c , описанный выше.

VI. МОГУТ ЛИ ОДНОРАНГОВЫЕ СЕТИ УЛУЧШИТЬ ПЕРЕДАЧУ ВИДЕОПОТОКА

Одноранговые сети (P2P) применяются для передачи потокового видео, так как они снижают нагрузку на центральные серверы, перераспределяя трафик между узлами. FPV-системы критичны к задержкам и потере кадров, но можно ли улучшить их работу с помощью одноранговых сетей?

Что может пойти не так?

- Потери пакетов. Узел выходит из сети, канал перегружается — в итоге связь обрывается. Для FPV это критично.
- Задержки распространения. Передача через несколько узлов неизбежно замедляет отклик системы.
- Искажения видеопотока. P2P-маршрутизации нет жёсткого порядка: пакеты приходят с разными задержками, кадры могут выпадать, а итоговое видео теряет чёткость — всё это ухудшает SSIM и PSNR.
- Проблемы с NAT и брандмауэрами. Из-за NAT – дрон и пульт могут не увидеть друг друга напрямую, а подключение через STUN/TURN даёт дополнительную задержку.
- Метод сдвига кадров, предложенный в статье [3], помогает точнее оценивать качество видеопотока за счёт компенсации потерь. Однако в FPV критична не просто оценка качества, а его поддержание в реальном времени. Даже кратковременные пропуски кадров могут привести к потере ориентации пилотом.
- Для FPV-систем необходимо учитывать вероятность возникновения этих факторов при оценке качества связи. Вместо классических детерминированных моделей вероятностный подход позволяет точнее спрогнозировать влияние сетевых условий на качество видео, что делает его полезным в реальных сценариях эксплуатации.

VII. ПРЕИМУЩЕСТВА ПРЕДЛОЖЕННОЙ МЕТОДИКИ

Без субъективных весов. Все параметры объединяются объективно через вероятность попадания в допустимые диапазоны.

Учет случайного характера рабочих параметров. Имитационное моделирование позволяет отразить реальную изменчивость условий работы каналов.

Гибкость и адаптивность. Метод подстраивается под различные типы FPV-систем и может быть модифицирован с учетом специфики конкретного применения.

Повышение точности оценки. Использование ядерной оценки плотности совместно с методом Монте-Карло позволяет добиться высокой точности даже в сложных многомерных системах.

VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования показывают, что вероятностный подход позволяет преодолеть ключевые ограничения традиционных методов многокритериальной оценки. Отказ от субъективного

подбора весовых коэффициентов делает оценку более объективной, а применение ядерной оценки плотности в сочетании с методом Монте-Карло обеспечивает точный расчёт характеристик каналов FPV-связи. Предложенная методика может быть использована для анализа эффективности каналов связи и дальнейшего совершенствования FPV-систем. Кроме того, предложенная методика остаётся открытой для дальнейших усовершенствований – её можно адаптировать под новые задачи и дополнять новыми критериями, что расширяет её применение в смежных областях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] 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. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-18-25.
- [2] Лапко А.Ю., Дудкин М.И., Гунько В.Н. Оценка помехоустойчивости радиоканалов на основе вероятностного подхода // Автометрия. 2020. №6. С. 3–15.
- [3] Слаев Д.Д., Чуновкин В.К. Модели нелинейной динамики в анализе устойчивости систем связи // Вестник МФТИ. 2001. №3. С. 45–52.