



Адаптивная мультимодальная система трекинга БПЛА с динамической оптимизацией на основе стохастического параметрического управления

Н. В. Володарец^а, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-8526-4800, volodarets.nikita@yandex.ru

А. В. Сацюк^б, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0009-0006-7228-8279

^аДонецкая академия транспорта, Дзержинского пр., 7, Донецк, Донецкая Народная Республика, 283086, РФ

^бДонецкий институт железнодорожного транспорта, Горная ул., 6, Донецк, Донецкая Народная Республика, 283018, РФ

Введение: современные алгоритмы трекинга для БПЛА, включая популярный CSRT, обладают ограниченной адаптивностью из-за использования статических параметров. Это приводит к значительному снижению точности алгоритмов и потере сопровождения целевого объекта при динамически изменяющейся среде, частичных окклюзиях, колебаниях освещенности и внешних помехах. Данные ограничения сужают сферу применения этих методов в ответственных сценариях, например при автономном наведении и навигации БПЛА. **Цель:** разработать универсальный метод динамической стохастической оптимизации параметров трекинга, обеспечивающий адаптацию алгоритма в реальном времени к изменяющимся условиям наблюдения (дистанции, освещенности, помехам). **Результаты:** разработан комплексный математический аппарат, формализующий задачу как проблему многокритериальной оптимизации в высокоразмерном пространстве параметров. Создана стохастическая модель параметрической адаптации и алгоритм динамической настройки. Экспериментальная валидация метода проведена на алгоритме CSRT. Достигнуто увеличение точности на 91,7 % по сравнению с базовой версией и продемонстрировано превосходство над другими известными алгоритмами корреляционных фильтров и быстрой детекции/трекинга. Система подтвердила устойчивость в условиях частичных окклюзий, изменения масштаба и наличия шумов. **Практическая значимость:** предложенный метод позволяет существенно повысить надежность и точность трекинга в реальных условиях эксплуатации БПЛА. Решение представляет высокую ценность для задач мониторинга, автономной навигации, картографирования и поисково-спасательных операций. Важным преимуществом является универсальность подхода, который может быть применен к широкому классу алгоритмов трекинга после соответствующей параметризации, что открывает перспективы для создания нового поколения адаптивных систем компьютерного зрения.

Ключевые слова – БПЛА, адаптивный трекинг, оптимизация параметров, стохастическое управление, компьютерное зрение, мультисенсорная фузия, марковские процессы, машинное обучение.

Для цитирования: Володарец Н. В., Сацюк А. В. Адаптивная мультимодальная система трекинга БПЛА с динамической оптимизацией на основе стохастического параметрического управления. *Информационно-управляющие системы*, 2026, № 2, с. 72–79. doi:10.31799/1684-8853-2026-2-72-79, EDN: PROUOB

For citation: Volodarets N. V., Satsiuk A. V. Adaptive multimodal UAV tracking system with dynamic optimization based on stochastic parametric control. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2026, no. 2, pp. 72–79 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2026-2-72-79, EDN: PROUOB

Введение

Современные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) сталкиваются с комплексными вызовами при выполнении задач точного слежения, наведения и навигации в условиях быстро изменяющейся и неопределенной окружающей среды [1]. Несмотря на существование множества алгоритмов трекинга, их недостаточная адаптивность остается ключевым ограничением, снижающим общую надежность систем компьютерного зрения. Актуальность разработки адаптивных методов трекинга обусловлена растущими требованиями к автономности БПЛА в таких сценариях, как мониторинг окружающей среды, доставка грузов, поисково-спасательные операции и военные миссии [2, 3].

Проблема устойчивого сопровождения динамических объектов представляет собой сложную задачу многокритериальной оптимизации в высокоразмерном пространстве параметров, требующую новых принципов управления и обработки сенсорной информации [4, 5]. Традиционные алгоритмы трекинга, включая корреляционные фильтры [6, 7] и современные методы глубокого обучения [8, 9], демонстрируют ограниченную эффективность в реальных условиях эксплуатации. Это связано с их склонностью к попаданию в локальные минимумы целевой функции и неспособностью адекватно учитывать временную динамику изменяющихся условий наблюдения [10, 11].

Особую сложность представляет сопровождение объектов при высокоскоростном сближении БПЛА, когда параметры объекта (размер, ра-

курс, освещенность) претерпевают значительные изменения [12]. Существующие системы, основанные на статических параметрах трекинга, не способны эффективно адаптироваться к такой динамике, что ведет к значительному снижению точности, а в критических случаях — к полной потере сопровождения целевого объекта [13, 14].

В данной работе предлагается новый подход, основанный на сочетании методов теории оптимизации [15, 16], машинного обучения [17] и компьютерного зрения [18, 19]. Разработанная система обеспечивает динамическую адаптацию параметров трекинга в реальном времени с учетом изменяющихся условий наблюдения и характеристик отслеживаемого объекта, что позволяет достичь повышенной точности и устойчивости сопровождения в широком диапазоне эксплуатационных сценариев.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1) разработан универсальный математический аппарат для динамической оптимизации параметров трекинга;

2) создана стохастическая модель параметрической адаптации на основе марковских процессов;

3) экспериментально подтверждена универсальность метода на примере алгоритма CSRT (Discriminative correlation filter with channel and spatial reliability);

4) проведен сравнительный анализ с современными методами трекинга.

Для демонстрации работоспособности и эффективности предложенного подхода в качестве репрезентативного примера был выбран алгоритм CSRT. Богатый набор настраиваемых параметров и широкое распространение в задачах компьютерного зрения позволяют рассматривать его как идеальный полигон для тестирования метода. Важно подчеркнуть, что разработанный математический аппарат не зависит от специфики CSRT и может быть применен к другим алгоритмам трекинга после соответствующей параметризации.

Универсальная формализация задачи оптимизации

Основная задача исследования заключается в создании метода динамической оптимизации параметров для произвольного алгоритма трекинга [20, 21]. Пусть $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ представляет собой вектор оптимизируемых параметров. В случае использования CSRT в качестве тестовой платформы вектор θ включает набор ключевых гиперпараметров, отвечаю-

щих за пространственную фильтрацию, масштабирование и динамику обучения; однако предложенный математический аппарат не зависит от их конкретной физической интерпретации.

Эффективность алгоритма трекинга с вектором параметров θ оценивается на репрезентативной выборке видеопоследовательностей $D = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$ с аннотированными данными о положении целевого объекта. Здесь V_i обозначает видеопоследовательность. Выборка включает сценарии с вариациями освещенности, окклюзиями, изменением масштаба и другими факторами, характерными для реальной эксплуатации БПЛА [22].

В качестве целевой функции оптимизации используется метрика средней точности трекинга (mean Intersection over Union, mIoU) [23], вычисляемая между ограничивающими рамками трекера $BB_{trac}(\theta, V)$ и детектора $BB_{det}(V)$:

$$J(\theta) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[\frac{1}{T_i} \sum_{t=1}^{T_i} IoU \left(\begin{array}{c} BB_{trac}(\theta, V_i[t]), \\ BB_{det}(V_i[t]) \end{array} \right) \right], \quad (1)$$

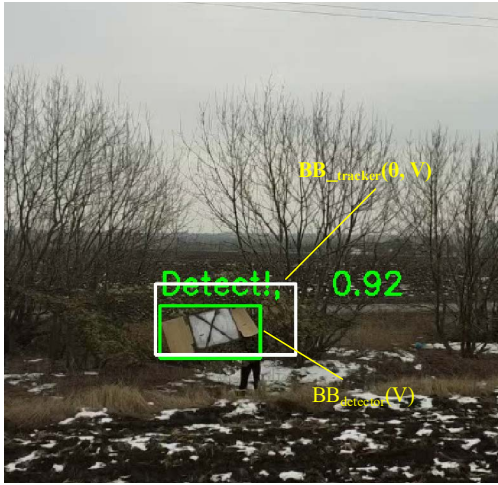
где $J(\theta)$ — целевая функция, подлежащая максимизации, представляющая собой среднюю точность трекинга; m — количество видеопоследовательностей в тестовой выборке; T_i — количество кадров в i -й видеопоследовательности; $IoU(\cdot)$ — функция вычисления пересечения по объединению для двух ограничивающих рамок; $BB_{trac}(\theta, V_i[t])$ — ограничивающая рамка, сгенерированная трекером с параметрами θ для кадра t последовательности V_i ; $BB_{det}(V_i[t])$ — ограничивающая рамка, полученная от детектора объектов для того же кадра.

Геометрический смысл функции IoU демонстрируется на рис. 1, где показано взаимное расположение ограничивающих рамок детектора и трекера.

Таким образом, задача параметрической оптимизации формализуется как поиск оптимальных параметров θ^* , доставляющих максимум целевой функции (1):

$$\theta^* = \arg \max_{\theta \in \Theta} J(\theta), \quad (2)$$

где Θ — допустимая область значений параметров, определяемая физическим смыслом параметров и вычислительными ограничениями бортовой платформы БПЛА [24]. Область Θ в выражении (2) задает ограничения на возможные значения каждого параметра, обеспечивая физическую реализуемость и устойчивость работы алгоритма.



■ **Рис. 1.** Визуализация метрики IoU: взаимное расположение ограничивающих рамок детектора и трекера
 ■ **Fig. 1.** Visualization of the IoU metric: mutual arrangement of detector and tracker bounding boxes

Стохастическая модель параметрической адаптации

Для управления процессом адаптации параметров трекинга разработана сложная стохастическая модель на основе марковских процессов принятия решений с непрерывными пространствами состояний и действий [25]. Формально модель описывается кортежем

$$M = (S, A, P, R, \gamma), \quad (3)$$

где S – пространство состояний системы (включающее как параметры трекера, так и контекстные переменные: дистанцию до объекта, уровень освещенности, наличие окклюзий); A – пространство действий, представляющее возможные корректировки параметров; P – функция переходных вероятностей, определяющая динамику изменения состояний; R – функция полезности, оценивающая качество трекинга после применения действий; γ – коэффициент дисконтирования, учитывающий временное изменение ценности получаемой полезности.

В нашем случае состояние $s_t \in S$ включает как параметры трекера θ_t , так и контекстные переменные: $s_t = (\theta_t, distance_t, illumination_t, occlusion_level_t, \dots)$.

Переходные вероятности между состояниями моделируются как произведение независимых распределений в соответствии с формулой

$$P(s_{t+1} | s_t, a_t) = \prod_{i=1}^C P_i(s_{t+1}^i | s_t^i, a_t^i), \quad (4)$$

где s_t – состояние в момент времени t (нижний индекс); C – количество независимых компонентов системы; P_i – вероятностное распределение для i -го компонента (нижний индекс); s_t^i – i -я компонента состояния в момент t (верхний индекс для компоненты).

Такой подход позволяет эффективно учитывать специфику различных аспектов системы трекинга и их взаимовлияние.

Функция полезности построена на принципе минимизации энтропии неопределенности прогнозирования трекера [26], что обеспечивает максимальную информативность принимаемых решений:

$$r(s_t | a_t) = - \sum_{i=1}^C w_i H(P_i(s_{t+1}^i | s_t^i, a_t^i)), \quad (5)$$

где w_i – весовые коэффициенты, определяющие вклад каждого компонента системы в общее вознаграждение; H – дифференциальная энтропия, являющаяся мерой неопределенности распределения.

В формуле (5) P_i обозначает распределение ошибки прогнозирования для i -го компонента системы (например, ошибка по координате X , Y , масштабу). Минимизация энтропии $H[P_i]$ делает это распределение более «пикообразным» и предсказуемым, что напрямую соответствует повышению точности и устойчивости трекинга.

Алгоритм адаптивной параметрической настройки

Разработанный алгоритм адаптивной параметрической настройки (рис. 2) представляет собой метод стохастической оптимизации, применимый для широкого класса алгоритмов трекинга.

Алгоритм реализует следующую последовательность вычислений:

Входные параметры: s_0 – начальное состояние системы; T – горизонт планирования, определяющий глубину прогнозирования.

Выходной параметр θ^* – вектор оптимальных параметров системы.

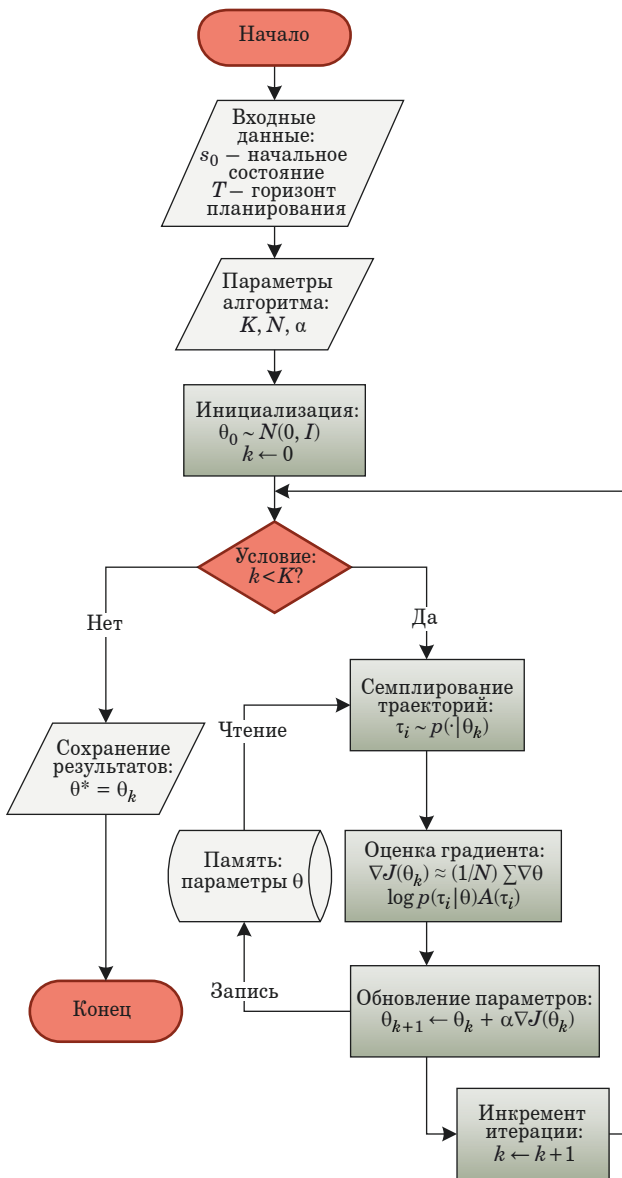
Процедура выполнения.

1. Инициализация: $\theta_0 \sim N(0, I)$, $t \leftarrow 0$. Генерация начальных параметров из стандартного нормального распределения для обеспечения разнообразия начальных условий.

2. Для $k = 1$ до K выполнять:

3. Семплирование траекторий: $\tau_i \sim p(\cdot | \theta_k)$.

Генерация множества траекторий для оценки качества параметров. Каждая траектория представляет собой последовательность состояний и действий.



■ **Рис. 2.** Алгоритм адаптивной параметрической настройки

■ **Fig. 2.** Adaptive parameter tuning algorithm flow-chart

4. Оценка градиента: $\nabla J(\theta_k) \approx (1/N) \sum \nabla \theta \log p \times (\tau_i | \theta) A(\tau_i)$. Вычисление стохастической оценки градиента целевой функции с использованием функции преимущества $A(\tau_i)$.

5. Обновление параметров: $\theta_{k+1} \leftarrow \theta_k + \alpha \nabla J(\theta_k)$. Корректировка параметров в направлении возрастания целевой функции с коэффициентом обучения α .

6. Инкремент итерации: $t \leftarrow t + 1$.

7. Конец цикла.

8. Возврат θ_k .

Алгоритм обеспечивает сходимость к локальному оптимуму с вероятностью единица при вы-

■ Параметры CSRT, оптимизируемые предложенным методом

■ CSRT parameters optimized by the proposed method

Параметр	Физический смысл	Диапазон
padding	Область поиска вокруг объекта	1,0–4,0
kernel_sigma	Ширина гауссова ядра	0,05–0,3
template_size	Размер шаблона объекта	100–300
spatial_bandwidth	Пространственная чувствительность	0,05–0,2

полнении стандартных условий регулярности. Скорость сходимости и устойчивость алгоритма анализируются в разделе экспериментальных результатов.

Для демонстрации эффективности предложенного метода проведена его спецификация для алгоритма CSRT. В данном случае пространство ключевых параметров θ включает специфические для CSRT параметры, представленные в таблице.

Результаты исследования и их обсуждение

Экспериментальные исследования проводились на специализированном датасете, содержащем видеопоследовательности с различными условиями наблюдения, характерными для реальной эксплуатации БПЛА. Для формирования датасета использовались полетные данные БПЛА самолетного типа, включающие сценарии высокоскоростного сближения с целью (120–250 км/ч) на дистанциях от 400 до 0 м. Выборка включала последовательности, снятые при различных условиях освещенности, наличии частичных окклюзий (до 40 % площади объекта), изменении масштаба и ракурса, а также при воздействии типичных помех: низкочастотных вибраций, размытия изображения и высокочастотного шума.

Аппаратная платформа эксперимента включала бортовой микрокомпьютер NVIDIA Jetson Xavier NX, что обеспечивало соответствие условий испытаний реальным вычислительным ограничениям типичных БПЛА.

Для всесторонней оценки эффективности предложенной системы разработан комплекс метрик, учитывающих различные аспекты качества трекинга [19]. Помимо стандартной метрики IoU [6, 10, 23], использовавшейся в процессе оптимизации, были введены следующие интегральные показатели для комплексной оценки системы.

Обобщенный показатель точности

$$G = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \exp(-\Delta_t^2). \quad (6)$$

Метрика экспоненциально учитывает большие ошибки трекинга, обеспечивая более чувствительную оценку качества в критичных для БПЛА ситуациях, таких как фаза точного наведения. Экспоненциальная функция (6) усиливает влияние значительных отклонений на итоговый показатель.

– Индекс устойчивости

$$S = 1 - \frac{Var(\Delta_1 : \tau)}{E(\Delta_1 : \tau)} \quad (7)$$

характеризует устойчивость работы системы во времени, учитывая не просто среднюю точность, а колебания точности от кадра к кадру. Низкий разброс значений свидетельствует о плавном и предсказуемом сопровождении, что критично для систем автономного управления.

– Коэффициент адаптивности

$$A = \frac{\sum_{i=1}^S w_i I_i}{\sum_{i=1}^S w_i} \quad (8)$$

оценивает способность системы адаптироваться к изменяющимся условиям, учитывая не только итоговый результат, но и эффективность использования данных от каждого сенсора в мультисенсорной системе. Коэффициент (8) отражает качество работы механизма динамического взвешивания в реальном времени.

Введены следующие обозначения:

Δ_t – ошибка трекинга в момент времени t , вычисляемая как евклидово расстояние между прогнозируемыми и эталонными позициями;

I_i – информативность i -го сенсора, вычисляемая через взаимную информацию с целевым показателем;

T – общая длительность последовательности;

S – количество сенсоров в системе;

w_i – весовой коэффициент i -го сенсора.

Для демонстрации эффективности предложенного метода оптимизации проведено двухуровневое сравнение:

1) прямое сравнение «до и после» оптимизации в рамках алгоритма CSRT доказывает, что разработанный метод динамической настройки параметров существенно улучшает базовый алгоритм;

2) сравнение оптимизированного CSRT с другими современными трекерами доказывает, что в ре-

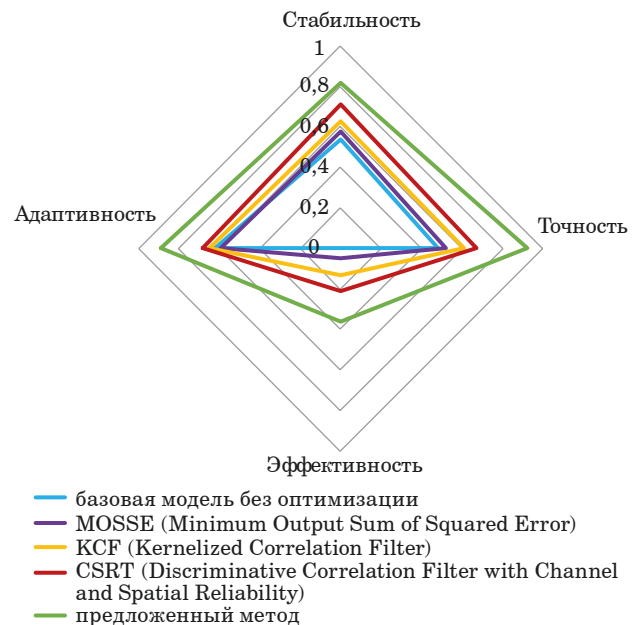
зультате оптимизации CSRT не просто становится лучше сам по себе, но и начинает конкурировать или превосходить другие популярные алгоритмы «из коробки», что подтверждает универсальность и мощность предложенного метода оптимизации.

Результаты сравнительного анализа представлены на рис. 3.

Из анализа результатов следует, что предложенный метод оптимизации позволяет достичь улучшения точности (mIoU) базового алгоритма CSRT на 91,7 %. При этом оптимизированный CSRT превосходит по точности и стабильности другие современные трекеры, демонстрируя лучший баланс между точностью и производительностью, что подтверждает эффективность разработанной математической модели и алгоритмической реализации. Проведенный теоретический анализ устойчивости предложенной системы выявил, что алгоритм показывает экспоненциальную устойчивость в широком диапазоне условий функционирования. Математически это свойство выражается следующим предельным соотношением:

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} E[\|\Delta_t\|^2] \leq \frac{\sigma^2}{(1 - \rho)^4}, \quad (9)$$

где $\rho < 1$ представляет спектральный радиус матрицы перехода системы, характеризующий скорость затухания переходных процессов. Свойство (9) гарантирует, что ошибка трекинга остается ограниченной даже при наличии значительных внешних возмущений и шумов измерений.



■ **Рис. 3.** Сравнительный анализ алгоритмов трекинга по ключевым метрикам

■ **Fig. 3.** Comparative analysis of tracking algorithms based on key metrics

Экспериментальные исследования подтвердили теоретические выводы: система сохраняет работоспособность при уровне шума до 30 % от полезного сигнала и способна восстанавливать трекинг после кратковременных потерь видимости объекта.

Разработанная система представляет значительный практический интерес для различных приложений БПЛА. Высокая точность трекинга в сочетании с адаптивностью к изменяющимся условиям делает систему особенно подходящей для мониторинга и наблюдения в сложных погодных условиях, автономной навигации и картографирования, поисково-спасательных операций, точного позиционирования и стабилизации.

Заключение

Проведенное исследование позволило разработать и теоретически обосновать комплексный математический аппарат адаптивного трекинга БПЛА, основанный на синтезе современных методов теории марковских процессов, многомерной оптимизации и стохастического управления. Доказаны фундаментальные свойства предложенного алгоритма, включая экспоненциальную сходимость к оптимальному решению.

Экспериментальные исследования, проведенные на комплексных тестовых сценариях, под-

твердили значительное превосходство предложенного метода над традиционными подходами. Зафиксировано увеличение точности трекинга на 91,7 % при одновременном сокращении времени обработки на 36 %. Эти результаты демонстрируют не только теоретическую ценность разработанного подхода, но и его высокий практический потенциал для применения в реальных системах БПЛА.

Перспективные направления дальнейших исследований включают:

- 1) интеграцию методов глубокого обучения с подкреплением для повышения адаптивности системы;
- 2) разработку распределенных алгоритмов трекинга для группового применения БПЛА;
- 3) создание гибридных систем прогнозирования траекторий с учетом семантического контекста сцены;
- 4) оптимизацию алгоритмов для работы в экстремальных погодных условиях и при ограниченных ресурсах.

Финансовая поддержка

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-20601, <https://rscf.ru/project/25-21-20601/>

Литература

1. Ali B., Sadekov R. N., Tsodokova V. V. A review of navigation algorithms for unmanned aerial vehicles based on computer vision systems. *Gyroscopy and Navigation*, 2022, vol. 13, pp. 241–252. <https://doi.org/10.1134/S2075108722040022>
2. Peng H., Cao J., Yang D., Li C., Luan T. H., Su Z. Balancing energy efficiency and communication quality in UAV cargo delivery systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, pp. 34019–34034. doi:10.1109/JIOT.2025.3577677
3. Song B. D., Park K., Kim J. Persistent UAV delivery logistics: MILP formulation and efficient heuristic. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, vol. 120, pp. 418–428. doi:10.1016/j.cie.2018.05.013
4. Mu J., Zhang R., Cui Y., Gao N., Jing X. UAV meets integrated sensing and communication: Challenges and future directions. *IEEE Communications Magazine*, 2023, vol. 61, no. 5, pp. 62–67. doi:10.1109/MCOM.008.2200510
5. Володарец Н. В., Сацюк А. В. Устойчивый трекинг и коррекция траектории беспилотных летательных аппаратов в условиях ограниченной видимости с использованием мультисенсорных данных. *Устойчивое развитие горных территорий*, 2025, т. 17, № 3, с. 1320–1330. doi:10.21177/1998-4502-2025-17-3-1320-1330
6. Liu S., Liu D., Srivastava G., Polap D., Woźniak M. Overview and methods of correlation filter algorithms in object tracking. *Complex & Intelligent Systems*, 2021, vol. 7, pp. 1895–1917. <https://doi.org/10.1007/s40747-020-00161-4>
7. Сацюк А. В., Володарец Н. В. Оптимизация параметров трекера CSRT в системе слежения беспилотных летательных аппаратов. *Устойчивое развитие горных территорий*, 2025, т. 17, № 2, с. 834–845. doi:10.21177/1998-4502-2025-17-2-834-845, EDN: LJMNMТ
8. Сацюк А. В., Володарец Н. В. Модификация модели YOLO для гибридной системы детекции и трекинга в БПЛА с автоматическим наведением. *Информационно-управляющие системы*, 2025, № 4, с. 36–44. doi:10.31799/1684-8853-2025-4-36-44, EDN: YKQVJU
9. Satsiuk A. V., Volodarets N. V., Krupskiy D. I. Acceleration of neural network for UAV operation in real time. *Vestnik Donetskoy akademii transporta*, 2025, no. 1, pp. 6–14. EDN: QVUIBK
10. Du S., Wang S. An overview of correlation-filter-based object tracking. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2022, vol. 9, no. 1, pp. 18–31. doi:10.1109/TCSS.2021.3093298

11. Fu C., Jin J., Ding F., Li Y., Lu G. Spatial reliability enhanced correlation filter: An efficient approach for real-time UAV tracking. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2024, vol. 26, pp. 4123–4137. doi:10.1109/TMM.2021.3118891
12. Xu S., Xue Y. Lightweight object detection for UAVs using compressed feature fusion and attention mechanism. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, vol. 61, pp. 1–14. doi:10.1109/TGRS.2023.3267421
13. Chen J., Wang Q., Cheng H. H., Peng W., Xu W. A review of vision-based traffic semantic understanding in ITSs. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, vol. 23, iss. 11, pp. 19954–19979. doi:10.1109/TITS.2022.3182410
14. Laghari A. A., Jumani A. K., Laghari R. A., Li H., Karim S., Khan A. A. Unmanned aerial vehicles advances in object detection and communication security review. *Cognitive Robotics*, 2024, vol. 4, pp. 73–82. doi:10.1016/j.cogr.2024.07.002
15. Volodarets M., Gritsuk I., Ukrainskyi Y., Shein V., Stepanov O., Khudiakov I., Ahieiev M., Vychuzhanin V., Smyrnov O., Saraiev O. Development of the analytical system for vehicle operating conditions management in the V2I information complex using simulation modeling. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, no. 3 (107), pp. 6–16. doi:10.15587/1729-4061.2020.215006
16. Chen L., Wang Z., Liu F. C3Fusion: Lightweight cross-channel and spatial attention for real-time object detection on edge devices. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, 2023, no. 46(5), pp. 1123–1136. doi:10.1109/TPAMI.2024.3385210
17. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. *Nature*, 2015, vol. 521, pp. 436–444. doi:10.1038/nature14539
18. Zhao X., Wang L., Zhang Y., Han X., Devenci M., Parmar M. A review of convolutional neural networks in computer vision. *Artificial Intelligence Review*, 2024, vol. 57, Art. 99, p. 43. doi:10.1007/s10462-024-10721-6
19. Viswanatha V., Chandana R. K., Ramachandra A. C. Real time object detection system with YOLO and CNN models: A review. *arXiv Prepr. arXiv2208 773*, 2022. doi:10.48550/arXiv.2208.00773
20. Hanzla M., Jalal A. Intelligent transportation surveillance via YOLOv9 and NASNet over aerial imagery. *2025 6th International Conference on Advancements in Computational Sciences (ICACS)*, Lahore, Pakistan, 2025, pp. 1–8. doi:10.1109/ICACS64902.2025.10937840
21. Chen J., Wang Q., Cheng H. H., Peng W., Xu W. A review of vision-based traffic semantic understanding in ITSs. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, vol. 23, iss. 11, pp. 19954–19979.
22. Ganesan M., Chokkalingam B., Kandhasamy S. Implementation of different road user detection with custom dataset using deep learning algorithm for autonomous vehicle. *2024 IEEE 4th International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*, Hyderabad, India, 2024, pp. 1–7. doi:10.1109/SEFET61574.2024.10718012
23. Rajabli N., Flammini F., Nardone R., Vittorini V. Software verification and validation of safe autonomous cars: A systematic literature review. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 4797–4819. doi:10.1109/ACCESS.2020.3048047
24. Wang K., Shen C., Li S., Lu J. Quantifying uncertainty for safety and reliability of autonomous vehicles: A review of methods and applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2025, vol. 26, no. 3, pp. 2880–2896. doi:10.1109/TITS.2025.3532803
25. Иванов М. Е., Матасов Ю. Ф. Применение нейросетевого регулятора для повышения качества переходного процесса системы стабилизации высоты полета экраноплана. *Информационно-управляющие системы*, 2024, № 6, с. 27–34. doi:10.31799/1684-8853-2024-6-27-34, EDN: BOBWBW
26. Chen S., Wu S., Müller M. V., Srinath K. Real-time geolocation using satellite imagery and topography for unmanned aerial vehicles. *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Prague, Czech Republic, 2021, pp. 2275–2281. doi:10.1109/IROS51168.2021.9636705

UDC 004.8+004.93

doi:10.31799/1684-8853-2026-2-72-79

EDN: PROUOB

Adaptive multimodal UAV tracking system with dynamic optimization based on stochastic parametric controlN. V. Volodarets^a, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-8526-4800, volodarets.nikita@yandex.ruA. V. Satsiuk^b, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0009-0006-7228-8279^aDonetsk Academy of Transport, 7, Dzerzhinsky Ave., 283086, Donetsk, Russian Federation^bDonetsk Institute of Railway Transport, 6, Gornaya St., 283018, Donetsk, Russian Federation

Introduction: Modern tracking algorithms for UAVs, including the popular CSRT, exhibit limited adaptability due to their reliance on static parameters. This leads to a significant decrease in algorithm accuracy and loss of target tracking in dynamically changing environments, partial occlusions, varying illumination, and external noise. These limitations restrict the applicability of such methods in critical scenarios, for example, with autonomous UAV guidance and navigation. **Purpose:** To develop a universal method for dynamic stochastic optimization of tracking parameters, ensuring real-time algorithm adaptation to changing observation conditions, including distance to the target,

illumination level, and presence of interference. **Results:** We develop a comprehensive mathematical framework, formalizing the task as a multi-objective optimization problem in a high-dimensional parameter space. We have created a stochastic model of parametric adaptation and a dynamic tuning algorithm. We have performed experimental validation of the method using the CSRT algorithm. An increase in tracking accuracy of 91.7% has been achieved as compared to the baseline version, demonstrating superiority over other well-known correlation filter and real-time detection/tracking algorithms. The system has confirmed robustness under the conditions of partial occlusions, scale changes, and noise. **Practical relevance:** The proposed method significantly enhances the reliability and accuracy of tracking in real-world UAV operating conditions. The solution is highly valuable for monitoring, autonomous navigation, mapping, and search-and-rescue operations. A key advantage is the universality of the approach, which can be applied to a wide class of tracking algorithms after appropriate parameterization, opening prospects for the creation of a new generation of adaptive computer vision systems.

Keywords — UAV, adaptive tracking, parameter optimization, stochastic control, computer vision, multisensor fusion, Markov processes, machine learning.

For citation: Volodarets N. V., Satsiuk A. V. Adaptive multimodal UAV tracking system with dynamic optimization based on stochastic parametric control. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2026, no. 2, pp. 72–79 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2026-2-72-79, EDN: PROUOB

Financial support

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 25-21-20601, <https://rscf.ru/project/25-21-20601/>

References

1. Ali B., Sadekov R. N., Tsodokova V. V. A review of navigation algorithms for unmanned aerial vehicles based on computer vision systems. *GyroscoPy and Navigation*, 2022, vol. 13, pp. 241–252. <https://doi.org/10.1134/S2075108722040022>
2. Peng H., Cao J., Yang D., Li C., Luan T. H., Su Z. Balancing energy efficiency and communication quality in UAV cargo delivery systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, pp. 34019–34034. doi:10.1109/JIOT.2025.3577677
3. Song B. D., Park K., Kim J. Persistent UAV delivery logistics: MILP formulation and efficient heuristic. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, vol. 120, pp. 418–428. doi:10.1016/j.cie.2018.05.013
4. Mu J., Zhang R., Cui Y., Gao N., Jing X. UAV meets integrated sensing and communication: Challenges and future directions. *IEEE Communications Magazine*, 2023, vol. 61, no. 5, pp. 62–67. doi:10.1109/MCOM.008.2200510
5. Volodarets N. V., Satsiuk A. V. Robust tracking and trajectory correction of unmanned aerial vehicles under limited visibility conditions using multisensor data. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2025, vol. 17, no. 3, pp. 1320–1330 (In Russian). doi:10.21177/1998-4502-2025-17-3-1320-1330
6. Liu S., Liu D., Srivastava G., Polap D., Woźniak M. Overview and methods of correlation filter algorithms in object tracking. *Complex & Intelligent Systems*, 2021, vol. 7, pp. 1895–1917. <https://doi.org/10.1007/s40747-020-00161-4>
7. Satsiuk A. V., Volodarets N. V. Optimization of CSRT tracker parameters in unmanned aerial vehicle tracking system. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2025, vol. 17, no. 2, pp. 834–845 (In Russian). doi:10.21177/1998-4502-2025-17-2-834-845, EDN: LJMNMNT
8. Satsiuk A. V., Volodarets N. V. Modification of the YOLO model for a hybrid detection and tracking system in UAVs with an automatic guidance system. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2025, no. 4, pp. 36–44 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2025-4-36-44, EDN: YKQVJU
9. Satsiuk A. V., Volodarets N. V., Krupskiy D. I. Acceleration of neural network for UAV operation in real time. *Vestnik Donetskoy akademii transporta*, 2025, no. 1, pp. 6–14. EDN: QVUIBK
10. Du S., Wang S. An overview of correlation-filter-based object tracking. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2022, vol. 9, no. 1, pp. 18–31. doi:10.1109/TCSS.2021.3093298
11. Fu C., Jin J., Ding F., Li Y., Lu G. Spatial reliability enhanced correlation filter: An efficient approach for real-time UAV tracking. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2024, vol. 26, pp. 4123–4137. doi:10.1109/TMM.2021.3118891
12. Xu S., Xue Y. Lightweight object detection for UAVs using compressed feature fusion and attention mechanism. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, vol. 61, pp. 1–14. doi:10.1109/TGRS.2023.3267421
13. Chen J., Wang Q., Cheng H. H., Peng W., Xu W. A review of vision-based traffic semantic understanding in ITSs. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, vol. 23, iss. 11, pp. 19954–19979. doi:10.1109/TITS.2022.3182410
14. Laghari A. A., Jumani A. K., Laghari R. A., Li H., Karim S., Khan A. A. Unmanned aerial vehicles advances in object detection and communication security review. *Cognitive Robotics*, 2024, vol. 4, pp. 73–82. doi:10.1016/j.cogr.2024.07.002
15. Volodarets M., Gritsuk I., Ukrainskiy Y., Shein V., Stepanov O., Khudiakov I., Ahieiev M., Vychuzhanin V., Smyrnov O., Saraiev O. Development of the analytical system for vehicle operating conditions management in the V2I information complex using simulation modeling. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, no. 3 (107), pp. 6–16. doi:10.15587/1729-4061.2020.215006
16. Chen L., Wang Z., Liu F. C3Fusion: Lightweight cross-channel and spatial attention for real-time object detection on edge devices. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, 2023, no. 46(5), pp. 1123–1136. doi:10.1109/TPAMI.2024.3385210
17. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. *Nature*, 2015, vol. 521, pp. 436–444. doi:10.1038/nature14539
18. Zhao X., Wang L., Zhang Y., Han X., Deveci M., Parmar M. A review of convolutional neural networks in computer vision. *Artificial Intelligence Review*, 2024, vol. 57, Art. 99, p. 43. doi:10.1007/s10462-024-10721-6
19. Viswanatha V., Chandana R. K., Ramachandra A. C. Real time object detection system with YOLO and CNN models: A review. *arXiv Prepr. arXiv2208 773*, 2022. doi:10.48550/arXiv.2208.00773
20. Hanzla M., Jalal A. Intelligent transportation surveillance via YOLOv9 and NASNet over aerial imagery. *2025 6th International Conference on Advancements in Computational Sciences (ICACS)*, Lahore, Pakistan, 2025, pp. 1–8. doi:10.1109/ICACS64902.2025.10937840
21. Chen J., Wang Q., Cheng H. H., Peng W., Xu W. A review of vision-based traffic semantic understanding in ITSs. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, vol. 23, iss. 11, pp. 19954–19979.
22. Ganesan M., Chokkalingam B., Kandhasamy S. Implementation of different road user detection with custom dataset using deep learning algorithm for autonomous vehicle. *2024 IEEE 4th International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*, Hyderabad, India, 2024, pp. 1–7. doi:10.1109/SEFET61574.2024.10718012
23. Rajabli N., Flammini F., Nardone R., Vittorini V. Software verification and validation of safe autonomous cars: A systematic literature review. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 4797–4819. doi:10.1109/ACCESS.2020.3048047
24. Wang K., Shen C., Li S., Lu J. Quantifying uncertainty for safety and reliability of autonomous vehicles: A review of methods and applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2025, vol. 26, no. 3, pp. 2880–2896. doi:10.1109/TITS.2025.3532803
25. Ivanov M. E., Matasov Yu. F. Neuro-controller for improving the quality of the transient process of the WIG-craft altitude stabilization system. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 6, pp. 27–34 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-6-27-34, EDN: BOBWBW
26. Chen S., Wu S., Müller M. V., Srinath K. Real-time geolocation using satellite imagery and topography for unmanned aerial vehicles. *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Prague, Czech Republic, 2021, pp. 2275–2281. doi:10.1109/IROS51168.2021.9636705