

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ ПОЛЕТА БПЛА ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИНВЕНТАРЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИМУЛЯЦИИ

Е.И. Бавбель

Научный руководитель – Алексеев В.Ф., к.т.н., доцент

**Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники**

В докладе рассматривается оптимизация траектории полета беспилотного летательного аппарата (БПЛА) для автоматизированного учета инвентаря на складах. Предлагается сравнительный анализ двух типов траекторий – зигзагообразной и вертикальной (вверх-вниз) – с целью минимизации времени полета при сохранении высокой точности сканирования (рисунок 1). Исследование проводилось в симуляционной среде *Gazebo* с использованием модели шестироторного БПЛА. Результаты показали, что зигзагообразная траектория сокращает расчетное время полета на 27,25 % по сравнению с вертикальной при сохранении точности на уровне 98 %.

Традиционные методы ручного учета запасов требуют значительных временных и трудовых затрат, особенно на крупных складах. БПЛА позволяют автоматизировать процесс, обеспечивая безопасность и оперативность [1]. Однако ограниченная автономность полета и сложность внутренней навигации требуют тщательного планирования траектории. В работе анализируются горизонтальные и вертикальные перемещения БПЛА, задержки на идентификацию товаров между стеллажами, а также позиционирование относительно полок. Для моделирования использовалась среда *Gazebo* с открытым исходным кодом, позволяющая эмулировать реальные складские условия. Тестировались две траектории: зигзагообразная с диагональными переходами между рядами и вертикальная с последовательным сканированием снизу вверх. Оценивались время полета, точность позиционирования и энергопотребление.

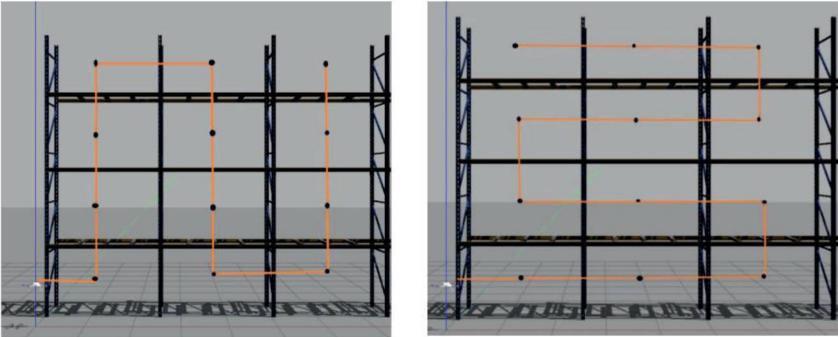


Рисунок 1 – Схема траектории в симуляционной модели склада

Подход позволяет сократить цикл учета инвентаря с нескольких часов до десятков минут. Зигзагообразная траектория минимизирует количество разворотов и вертикальных перемещений, что особенно важно при ограниченной емкости аккумулятора. Модель может быть интегрирована в системы управления складом с использованием ROS и камер для распознавания штрих-кодов [2]. Для повышения надежности реализован контроль отклонений от траектории с коррекцией по данным одометрии и визуальной навигации. Эксперименты подтвердили устойчивость

алгоритма к помехам в позиционировании, включая шумы сенсоров и турбулентность воздуха в закрытых помещениях.

Дополнительно проведен анализ влияния конфигурации склада на эффективность траекторий. В условиях плотной расстановки стеллажей зигзагообразный путь демонстрирует преимущество за счет сокращения холостых перемещений. Полученные данные согласуются с исследованиями по многоцелевой оптимизации маршрутов БПЛА [3]. В перспективе возможна реализация расширения до многодроновых систем с координацией через централизованный контроллер и интеграция с базами данных инвентаря в реальном времени. Это позволит реализовать динамическое перераспределение задач между аппаратами в зависимости от загруженности зон склада.

Для дальнейшего снижения энергозатрат и задержек предлагается применение семантической коммуникации на основе *SVD-MADRL*, где передается только ключевая информация о товарах [4]. Это уменьшит объем данных, повысит спектральную эффективность и адаптивность к изменениям канала связи. Алгоритм глубокого детерминированного градиента политики (*DDPG*) обеспечивает точную оптимизацию траектории и мощности в непрерывном пространстве действий, что критично для сложных складских сред.

Полученные результаты демонстрируют эффективность зигзагообразной траектории как оптимального решения для задач инвентаризации. Подход применим для складов различной конфигурации и масштаба, обеспечивая баланс между скоростью и точностью. Дальнейшее развитие предполагает адаптацию к реальным условиям с использованием *LiDAR* для навигации и машинного обучения для предиктивного планирования.

Библиографический список

1. Maweni T. et al. Optimised path planning of a UAV for inventory management applications // MATEC Web of Conferences. – 2023. – Vol. 388. – P. 04021.
2. Wawrla L. et al. Indoor drone applications in warehouse environments: A survey // Drones. – 2021. – Vol. 5, No. 4. – P. 112.
3. Liu Z. et al. Multi-objective optimization model for UAV route planning in road segment surveillance // Transp. Res. Part C: Emerg. Technol. – 2022. – Vol. 135. – P. 103512.
4. Yang Y. et al. Optimization research on UAV semantic communication system based on SVD-MADRL // Drone Syst. Appl. – 2025. – Vol. 13. – P. 1–13.