

ПОСТРОЕНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ МАРШРУТОВ БПЛА В СИМУЛЯТОРЕ

Крень М.А., Бородич А.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

*Научные руководители: Алексеев В.Ф. – к. т. н., доцент, доцент кафедры ПИКС,
Бавбель Е.И. – аспирант кафедры ПИКС*

Аннотация. В статье рассматриваются методы построения маршрутов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и их тестирование в симуляторах. Описаны основные алгоритмы навигации, такие как эвристический метод поиска кратчайшего пути, *Rapidly-exploring Random Tree* и *Dynamic Programming*, а также программные среды, включая *Gazebo*, *AirSim* и *PX4 SITL*. Рассмотрены этапы тестирования маршрутов и их оптимизация для повышения эффективности и безопасности полетов. Актуальность работы обусловлена необходимостью точного планирования и безопасной эксплуатации БПЛА в условиях сложной городской инфраструктуры.

Ключевые слова: БПЛА, маршруты, симулятор, навигация, тестирование, алгоритмы.

Введение. Современные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) играют важную роль в различных областях, включая транспорт, мониторинг окружающей среды, поисково-спасательные операции и военную сферу. Однако для их эффективного использования необходимо учитывать множество факторов, включая оптимальное построение маршрутов, предотвращение столкновений и обеспечение безопасного управления полетом. Одним из наиболее надежных и безопасных способов проверки маршрутов БПЛА является тестирование в симуляторе [1–18].

Симуляторы позволяют моделировать различные условия полета, включая влияние погодных условий, зону покрытия сигнала *GPS*, присутствие препятствий и другие факторы, оказывающие влияние на работу навигационных систем. Это дает возможность проводить детальное исследование поведения беспилотников в виртуальной среде, что снижает затраты и риски при реальном использовании.

Основная часть. Разработка маршрутов для БПЛА основывается на использовании различных алгоритмов навигации, которые позволяют автоматизировать процесс планирования и адаптации полетных траекторий. Алгоритм эвристического метода поиска кратчайшего пути является одним из наиболее популярных методов поиска кратчайшего пути, широко применяемых в робототехнике. Он обеспечивает построение оптимального маршрута, учитывая препятствия и ограничения воздушного пространства. Метод *RRT (Rapidly-exploring Random Tree)* позволяет создавать маршруты в условиях динамически изменяющейся среды, что делает его особенно полезным при выполнении миссий в городской среде. Алгоритм *Dynamic Programming* используется для корректировки маршрутов в реальном времени, что необходимо в случае появления неожиданных препятствий или изменения погодных условий. Применение этих алгоритмов в комплексе дает возможность разрабатывать адаптивные и эффективные маршруты, минимизируя вероятность ошибок при полетах [7–10, 17, 18].

Современные симуляторы позволяют моделировать полеты БПЛА с высокой степенью детализации. Одним из наиболее распространенных инструментов является *Gazebo* [15], который используется в связке с *ROS (Robot Operating System)* и обеспечивает точное физическое моделирование. Этот симулятор применяется как для разработки программного обеспечения управления БПЛА, так и для тестирования работы сенсоров в виртуальной среде. *AirSim*, разработанный компанией *Microsoft*, позволяет выполнять сложные сценарии моделирования, включая взаимодействие БПЛА с окружающей средой

и применение машинного обучения для оптимизации полетов. Еще одной важной средой является *PX4 SITL*, предназначенная для тестирования автопилотов и алгоритмов навигации, что позволяет проверить работоспособность системы перед ее развертыванием на реальном дроне. Эти инструменты значительно сокращают затраты на разработку и тестирование беспилотных летательных аппаратов [7–10, 17, 18].

Тестирование маршрутов БПЛА в симуляторе проходит несколько ключевых этапов. Первым шагом является проверка алгоритмов навигации, в ходе которой анализируется корректность работы системы и точность следования заданному маршруту. Следующим этапом является оценка устойчивости маршрута, включающая моделирование различных сценариев, таких как сильный ветер, наличие радиопомех и изменения в окружающей среде. Это позволяет выявить слабые места в навигационной системе и внести необходимые корректировки. Заключительным этапом является оптимизация траектории, направленная на минимизацию энергопотребления, сокращение времени полета и повышение общей эффективности миссии. Такой подход позволяет значительно повысить надежность БПЛА и обеспечить их стабильную работу в различных условиях.

Заключение. Использование симуляторов для тестирования маршрутов БПЛА позволяет существенно снизить риски, связанные с испытаниями в реальных условиях. Благодаря современным алгоритмам навигации и специализированному программному обеспечению разработчики могут эффективно анализировать и оптимизировать маршруты беспилотных аппаратов, обеспечивая их безопасную эксплуатацию. Применение симуляторов также способствует экономии ресурсов, так как позволяет заранее выявить потенциальные проблемы и внести необходимые коррективы без необходимости проведения дорогостоящих полевых испытаний. В дальнейшем совершенствование методов симуляционного тестирования и разработка более точных моделей окружающей среды позволит еще больше повысить надежность и эффективность работы беспилотных летательных аппаратов.

Список литературы

1. Алексеев, В. Ф. Автономная посадка БПЛА с использованием визуального сервоуправления = *Autonomous UAV landing using visual servo control* / В. Ф. Алексеев, Е. И. Бавбель // *BIG DATA и анализ высокого уровня = BIG DATA and Advanced Analytics* : сборник научных статей X Международной научно-практической конференции, Минск, 13 марта 2024 г. : в 2 ч. Ч. 2 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2024. – С. 472–479.
2. Алексеев, В. Ф. Оценка облаков точек БПЛА с помощью искусственного интеллекта = *Assessment of UAV point clouds using artificial intelligence* / В. Ф. Алексеев, Е. И. Бавбель // *BIG DATA и анализ высокого уровня = BIG DATA and Advanced Analytics* : сборник научных статей X Международной научно-практической конференции, Минск, 13 марта 2024 г. : в 2 ч. Ч. 2 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2024. – С. 12–18.
3. Бавбель, Е. И. Использование беспилотных летательных аппаратов для эпидемиологического надзора за инфекционными заболеваниями = *Use of unmanned aerial vehicles for epidemiological surveillance of infectious diseases* / Е. И. Бавбель, В. Ф. Алексеев // *Медэлектроника–2024. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии* : сборник научных статей XIV Международной научно-технической конференции, Минск, 5–6 декабря 2024 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники [и др.]. – Минск, 2024. – С. 140–143.
4. Бавбель, Е. И. Возможности компьютерного зрения для беспилотных летательных аппаратов / Е. И. Бавбель, В. Ф. Алексеев // *Цифровая среда: технологии и перспективы* : сборник материалов II Международной научно-практической конференции, Брест, 31 октября – 1 ноября 2024 г. / Брестский государственный технический университет ; редкол.: Н. Н. Шалобыта (гл. ред.) [и др.]. – Брест, 2024. – С. 46–51.
5. Бавбель, Е. И. Обзор аэродинамических характеристик профиля *NACA* = *NACA profile aerodynamic overview* / Е. И. Бавбель // *Электронные системы и технологии* : сборник материалов 60-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 22–26 апреля 2024 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Д. В. Лихаческий [и др.]. – Минск, 2024. – С. 126–129.
6. Бавбель, Е. И. Подходы к проектированию БПЛА с повышенной выносливостью и грузоподъемностью / Е. И. Бавбель, А. А. Бородин, Е. В. Коляда // *Новые информационные технологии в научных исследованиях «НИИТ-2023»* : материалы XXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 22–24 ноября, 2023 г. : в 2 т. Т 2 / Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина. – Рязань, 2023. – С. 60–62.
7. Лаваль С. Планирование алгоритмов / *S. LaValle*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
8. Microsoft AirSim: Open-source simulator for autonomous systems. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://microsoft.github.io/AirSim/>
9. PX4 Autopilot: Open Source Autopilot for Drones. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://px4.io/>
10. Красильчиков М. Н., Себряков Г. Г. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / Под ред. М. Н. Красильщикова, Г. Г. Себрякова. М.: Физматлит, 2003.
11. Бавбель, Е. И. Основные задачи при исследовании методов и средств проектирования беспилотных летательных аппаратов / Е. И. Бавбель, А. А. Бородин, Е. В. Коляда // *Новые информационные технологии в научных исследованиях «НИИТ-2023»* : материалы XXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 22–24 ноября, 2023 г. : в 2 т. Т 2 / Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина. – Рязань, 2023. – С. 57–59.

12. Бавбель, Е. И. Особенности применения беспилотных летательных аппаратов в обеспечении безопасности дорожного движения = *Features of use of unmanned aerial vehicles in ensuring road safety* / Е. И. Бавбель // *Электронные системы и технологии : сборник материалов 59-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 17–21 апреля 2023 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Д. В. Лихаческий [и др.]*. – Минск, 2023. – С. 61–63.
13. Бавбель, Е. И. Автономный полёт БПЛА как способ увеличения продолжительности полёта = *Autonomous UAV flight as a way to increase flight duration* / Е. И. Бавбель // *Электронные системы и технологии : сборник материалов 59-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 17–21 апреля 2023 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Д. В. Лихаческий [и др.]*. – Минск, 2023. – С. 57–60.
14. Бавбель, Е. И. О необходимости применения систем высокоточного позиционирования при построении БПЛА = *On the necessity of application of high-precision positioning systems when building a UAV* / Е. И. Бавбель, А. С. Анискевич // *Электронные системы и технологии : сборник материалов 57-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 19–23 апреля 2021 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Д. В. Лихаческий [и др.]*. – Минск, 2021. – С. 670–672.
15. Gazebo Simulator. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gazebo.org/>
16. Бавбель, Е. И. Анализ методов защиты связи беспилотных летательных аппаратов от атак с использованием радиоэлектронных средств = *Analysis of methods for protecting unmanned aircraft communication against attacks using radio electronic equipment* / Е. И. Бавбель, А. С. Анискевич // *Электронные системы и технологии : сборник материалов 57-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 19–23 апреля 2021 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Д. В. Лихаческий [и др.]*. – Минск, 2021. – С. 667–669.
17. Brown K., Williams R. Advanced UAV Path Planning Strategies in Urban Environments // *Journal of Autonomous Systems*. – 2021. – Vol. 35, Issue 6. – P. 450–467.
18. Zhang Y., Li H. Simulation-Based UAV Route Optimization Using Reinforcement Learning // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. – 2023. – Vol. 59, No. 2. – P. 1120–1134.

UDC 004.021:621.396

PLANNING AND TESTING UAV ROUTES IN A SIMULATOR

Kren M.A., Borodich A.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Alexeev V.F. – Cand. of Sci., assistant professor, associate professor of the department of ICSD,

Bavbel E.I. – postgraduate student of the DICS department

Annotation. The article discusses methods for UAV route planning and testing in simulators. The main navigation algorithms, such as heuristic shortest path search method, RRT, and Dynamic Programming, as well as software environments including Gazebo, AirSim, and PX4 SITL, are described. The testing phases of UAV routes and their optimization for improving flight efficiency and safety are considered. The relevance of this work is determined by the need for precise planning and safe UAV operations in complex urban infrastructure.

Keywords: UAV, routes, simulator, navigation, testing, algorithms.