

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра системного анализа и
автоматического управления

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ РАСЧЁТА
ТРАЕКТОРИИ ПОЛЁТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО
АППАРАТА**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 481 группы
направления 27.03.03 — Системный анализ и управление
факультета КНиИТ
Стороженко Анны Михайловны

Научный руководитель

к. т. н., доцент

И. Н. Фомин

Заведующий кафедрой

к. ф.-м. н., доцент

И. Е. Тананко

Саратов 2023

ВВЕДЕНИЕ

На данный момент особенную популярность приобретают исследования, которые связаны с проектированием беспилотных летательных аппаратов. Это одна из приоритетных областей разработок в области искусственного интеллекта и робототехники. Чаще всего рассматриваются именно БПЛА вертикального взлёта и посадки мультироторного типа, так как комплектующие подобных систем достаточно дешёвые и распространённые, к тому же, такие БПЛА уже снабжены готовыми платформами. Мультикоптеры активно применяются и в коммерческих, и в научных целях. Главной задачей разработчиков в любой из этих областей является повышение уровня автономности объекта управления.

В большинство мультироторных платформ включены программно- и аппаратно-реализованные средства автоматизации манёвров и режимов, также добавлен открытый программный интерфейс доступа к ним. Следовательно, больший приоритет получают более высокоуровневые задачи, такие как формирование и корректировка карты местности в реальном времени, локализация, построение маршрута и так далее. В частности, задаче формирования пути и посвящена данная работа.

Цель бакалаврской работы — разработка формализованных рекомендаций по применению различных алгоритмов расчёта траектории полёта БПЛА на основе системного анализа этих алгоритмов и результатов имитационного моделирования.

Поставленная цель определила **следующие задачи**:

1. произвести обзор публикаций, методов и практических решений по расчёту траектории полёта БПЛА;
2. провести анализ и формализацию алгоритмов расчёта и выбора траекторий движения БПЛА;
3. определить элементы системы управления БПЛА, их свойства и характеристики для создания имитационной модели;
4. реализовать имитационные модели полёта БПЛА в программной среде *AnyLogic* и провести эксперименты с моделями;
5. выработать формализованные рекомендации по применению различных алгоритмов управления БПЛА.

Методологические основы исследования методов и алгоритмов рас-

чёта траектории полёта беспилотного летательного аппарата представлены в работах К.С. Яковлева, Е.С. Баскина, А.А. Андрейчука [1-2], В.А. Корнилова, Д.С. Молодякова, Ю.А. Синявской [3], Ш. Лю, Л. Ли, Ц. Тан, Ш. Ву, Ж-Л. Годье [5], А.Д. Скакуна, Н.Ч. Дас, Л.В. Коломиеца, З.Х. Зим, Р. Уддина [6].

Теоретическая значимость бакалаврской работы. Значимость этого исследования состоит в определении принципов функционирования и режимов применения описанных алгоритмов за счёт разработки блок-схем алгоритмах в нотациях, применяемых в информатике и в системной инженерии.

Практическая значимость бакалаврской работы. Выполненное в работе описание программной реализации алгоритмов в среде *AnyLogic* направлено на последующую подробную и эффективную разработку систем управления БПЛА с применением искусственных нейронных сетей. Сформулированные в конце работы рекомендации могут быть полезны системным инженерам и программистам при выборе оптимальных алгоритмов управления в разрабатываемых реальных аппаратах.

Структура и объём работы. Бакалаврская работа состоит из введения, 3 разделов, заключения, списка использованных источников и 1 приложения. Общий объём работы — 54 страницы, из них 40 страниц — основное содержание, включая 15 рисунков и 3 таблицы, цифровой носитель в качестве приложения, список использованных источников информации — 20 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первый раздел "Анализ литературы и определение начальных условий задачи" посвящён обзору публикаций, методов и практических решений по расчёту траектории полёта БПЛА.

В данном разделе была сформулирована задача исследования, которая состоит в планировании траектории БПЛА вертикального взлёта и посадки мультироторного типа, который осуществляет маловысотный полёт в городских условиях. Препятствия, в рамках решаемой задачи, заданы в форме многоугольника, координаты вершин которого известны. Для решения задачи были определены текущее и итоговое положения БПЛА в пространстве, которые привязаны к существующей карте местности. Установлена скорость,

с которой требуется производить полёт. Задача планирования траектории состоит в описании двумерной кривой, соединяющей начальное и итоговое положение БПЛА, а также удовлетворяющей ряду условий.

Второй раздел "Системный анализ инструментов расчёта и выбора траекторий движения беспилотных объектов" посвящён описанию изученных алгоритмов формирования траектории полёта БПЛА и построению их блок-схем.

В начале подраздела определены общие требования к эвристическим алгоритмам поиска и генерации траекторий, на основании которых сделан их сравнительный анализ:

- однозначность;
- понятность;
- корректность;
- массовость;
- результативность;
- экономичность;
- точность.

Далее в данном разделе подробно рассматриваются применяемые на сегодняшний день алгоритмы расчёта траекторий движения беспилотных объектов (таб. 1).

PFRAOR	Высокая скорость, простая реализация
LIAN	Высокая эффективность в ограниченном наборе условий
MultiLIAN	Успешно определяет основной и альтернативный путь
MultiLIAN-RU	Успешно определяет основной путь при низких затратах ресурсов
MultiLIAN-CC	Высокая эффективность при низких затратах ресурсов
Алгоритм определения геометрических ограничений	Использует расширение границ препятствий на виртуальную клетку, создаёт запас для БЛА при перемещении по соседним проходимым ячейкам

Важнейшим элементом второго раздела стал проведённый теоретико-информационный анализ каждого из рассмотренных алгоритмов и построение их блок-схем для того, чтобы впоследствии построить диаграммы состо-

яний и создать имитационные модели для проведения экспериментов.

Подраздел 2.2. посвящён простейшему алгоритму *PFRAOR*, который помогает достигать поставленной цели передвижения.

В подразделе 2.3. описывается алгоритм *LIAN*. Он производит сфокусированный при помощи эвристики перебор вершин графа и удерживает в памяти два перечня вершин: перечень *OPEN* с нерассмотренными вершинами и перечень *CLOSE* — множество рассмотренных вершин. На каждом шаге алгоритма из перечня *OPEN* отбирается вершина a , потенциально лежащая на кратчайшем пути из стартовой точки в целевую. После формируется и проверяется на проходимость нуль-траектория, если она оказывается непроходимой, то клетку a исключают из рассмотрения, иначе для a формируются потенциальные последователи. Такие вершины вносятся в перечень *OPEN*, а процесс начинается заново. Если на каком-либо шаге обнаруживается, что целевая вершина располагается на расстоянии меньшем или равном Δ от текущей, а для целевой вершины удовлетворяется ограничение на угол и между целевой и текущей вершинами нет препятствий, то алгоритм завершается. Если в течение работы алгоритма перечень *OPEN* исчерпан, то возвращается сообщение о том, что пути не существует.

В подразделе 2.4. представлен алгоритм *MultiLIAN* нахождения множества путей, которые удовлетворяют ограничениям на максимальный угол отклонения. Он считается модификацией алгоритма *LIAN* и дополнительно находит несколько альтернативных путей.

Подраздел 2.5. посвящён модификации алгоритма *MultiLIAN* — *MultiLIAN* — *RU*. В качестве промежуточных вершин выбираются элементы из множества *OPEN* или *CLOSE*, ведь пути до них уже найдены, остаётся только достроить частичный путь. Отбор вершин из такого множества производится при помощи расчёта расстояний до конкретных промежуточных вершин. Вместе с тем, при поиске альтернативного пути к промежуточным вершинам больше не приходится обращаться.

При применении взвешенной эвристики количество вершин в этих перечнях может оказаться малым, таким образом появляется ограничение в выборе. Также путь из данных вершин до целевой может не существовать из-за наличия угловых ограничений.

В подразделе 2.6. описывается ещё одна вариация алгоритма

MultiLIAN-CC, которая использует данные прошлых шагов и основывается на следующем подходе. После первого шага алгоритма в перечне *CLOSE* вместе с вершинами, формирующими искомым путь, имеются вершины, которые не были использованы, при этом на них было потрачено время. Предполагается, что подобные вершины "лишние" и при очередных шагах поиска они исключаются из рассмотрения.

В подразделе 2.7. формулируется алгоритм определения геометрических ограничений. В работе [2] определена конкретная модель ограничений, которая и была использована в данной работе.

В конце второго раздела в подразделе 2.8. приводится сравнительная оценка описанных алгоритмов на основе построенных блок-схем, изученных характеристик и особенностей.

Третий раздел "Исследование особенностей разработки алгоритмов расчёта траектории полёта БПЛА" посвящён имитационному моделированию функционирования изучаемых алгоритмов в программной среде моделирования *AnyLogic* и разработке на основании результатов экспериментов формализованных рекомендаций по применению данных алгоритмов управления БПЛА.

Для имитационного моделирования функционирования алгоритма *PFRAOR* были описаны основные сущности алгоритмов расчёта траектории полёта БПЛА, определены главные элементы модели, составлена диаграмма состояний.

В процессе проведения имитационных экспериментов был обнаружен недостаток данного алгоритма: в нём программно не описываются методы обхода препятствий, а без них достижение целевой точки без столкновения с препятствием невозможно.

Для имитационного моделирования функционирования алгоритмов *LIAN*, *MultiLIAN*, *MultiLIAN-RU*, *MultiLIAN-CC* также были описаны основные сущности, параметры которых участвуют в расчёте траектории полёта БПЛА, определены главные элементы имитационных моделей, составлены диаграмма состояний для каждого алгоритма.

Результаты имитационных экспериментов с моделями позволили определить множество закономерностей и свойств каждого из алгоритмов. Например, было определено, что алгоритм *LIAN*, в отличие от *PFRAOR*, заметно

сложнее и содержит класс, множество функций и переменных. Результат эксперимента показал, что длина кратчайшего пути оказалась на 51,9% меньше, чем протяжённость маршрута по итогам алгоритма *PFRAOR*. Время работы алгоритма составило 3 секунды, что значительно больше, чем у алгоритма *PFRAOR*.

Дальнейшие эксперименты с моделями показали, что алгоритм *MultiLIAN – CC* имеет ещё более эффективные результаты при заданных условиях. Этот алгоритм требует минимальных изменений в коде программы. Благодаря внедрённой переменной "*exclosed*" — массиву с "лишними" вершинами — заметно сокращается время работы алгоритма за счёт удаления тупиковых ветвей маршрута, при этом корректно формируются альтернативные пути.

Теоретико-информационный анализ и эксперименты с имитационной моделью не обнаружили тупиковых ветвей маршрута, поэтому альтернативные пути оказались равными основному. Однако, эффективность данной модификации значительно выше алгоритма *MultiLIAN* — на 98,6% — и алгоритма *MultiLIAN – RU* — на 21,9%. Эта модификация рекомендуется к использованию, если стоит задача построения маршрута БПЛА и альтернативных путей за минимальный временной период.

В заключении третьего раздела были разработаны формализованные рекомендации по применению различных алгоритмов управления БПЛА. Они помогут системным инженерам или разработчикам сделать правильный выбор, отталкиваясь от поставленной задачи и имеющихся ресурсов. Все рекомендации были собраны в сводной таблице "Результаты теоретико-информационного анализа алгоритмов расчёта траектории полёта БПЛА на основе имитационных моделей" . На основании её можно сделать следующие краткие выводы по рассмотренным и реализованным алгоритмам:

- Алгоритм *PFRAOR* один из самых быстрых вариантов, однако он слишком сырой, чтобы применять его на реальных объектах. Так что если необходимо спланировать траекторию движения некоторого объекта, то стоит обратиться к другим алгоритмам: менее быстрым, но гораздо более точным;
- Алгоритм *LIAN* работает медленнее, чем предыдущий, но его результативность существенно выше;

- Поиск дополнительных маршрутов наделяет алгоритм *MultiLIAN* множеством преимуществ при управлении БПЛА, кроме того, он достаточно точный и эффективный. Его модификация *RU* может применяться в системах с ограниченными вычислительными мощностями. Тем не менее, это может привести к тому, что алгоритм скорее всего не найдёт альтернативных маршрутов, а потому ресурсы будут тратиться впустую;
- Модификацию *CC* можно рекомендовать к применению, если стоит задача построения маршрута БПЛА и альтернативных путей за минимальный временной период.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был произведён обзор публикаций, методов и практических решений по расчёту траектории полёта БПЛА, что позволило произвести анализ и формализацию алгоритмов расчёта и выбора траекторий движения БПЛА. Впервые в проведённом исследовании были визуализированы алгоритмы расчёта траектории полёта БПЛА с помощью нотаций, применяемых в информатике и в системной инженерии.

Это позволило определить элементы системы управления БПЛА, их свойства и характеристики, необходимые для моделирования траекторий полёта и реализовать имитационные модели полёта БПЛА в программной среде *AnyLogic*.

Проведённые эксперименты с моделями позволили произвести теоретико-информационный анализ алгоритмов расчёта траектории полёта БПЛА и на основе имитационных моделей выработать формализованные рекомендации по применению различных алгоритмов управления БПЛА.

По результатам этих исследований были выбраны наиболее эффективные алгоритмы, которые могут быть использованы для решения поставленной задачи. Именно их предпочтительнее изучать, модернизировать и использовать в реальных технических системах.

Однако, стоит отметить, что не все задачи могут быть решены таким образом [8]. Поэтому для дальнейшего анализа и возможного улучшения представленных алгоритмов может понадобиться провести более масштабные и статистически значимые эксперименты в среде *AnyLogic*. Таким образом,

предметом дальнейших исследований является реализация и тестирование наиболее эффективных алгоритмов на ГИС-картах системы *AnyLogic*.

Основные источники информации:

1. Яковлев, К, С. Метод автоматического планирования совокупности траекторий при навигации беспилотных транспортных средств / К. С. Яковлев, Е. С. Баскин, А. А. Андрейчук // Управление большими системами: сборник трудов. — 2015. — № 58 — С. 306 — 342.
2. Яковлев, К, С. Метод автоматического планирования траектории беспилотного летательного аппарата в условиях ограничений на динамику полета / К. С. Яковлев, Е. С. Баскин, Д. А. Макаров // Искусственный интеллект и принятие решений — 2014. — № 4 — С. 3 — 17.
3. Корнилов, В. А. Система управления мультикоптером [Электронный ресурс] / В. А. Корнилов, Д. С. Молодяков, Ю. А. Синявская // Электронный журнал "Труды МАИ" №62 [Электронный ресурс]. URL: <https://mai.ru/upload/iblock/2f3/sistema-upravleniya-multikopterom.pdf?referer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F>. Загл. с экрана. Яз. рус.
4. Справка AnyLogic [Электронный ресурс]: документация Anylogic. URL: <https://anylogic.help/ru/anylogic/index.html> (дата обращения: 30.05.2023). — Загл. с экрана. — Яз. рус.
5. Лю, Ш. Разработка беспилотных транспортных средств / Ш. Лю, Л. Ли, Ц. Тан, Ш. Ву, Ж-Л. Годье. — М.: ДМК Пресс, 2022. — 246 с.
6. Скакун, А. Д. Алгоритм планирования траектории мобильного робота / А. Д. Скакун, Н. Ч. Дас, Л. В. Коломиец, З. Х. Зим, Р. Уддин // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. — 2021. — Т. 1. — С. 228 — 231.
7. Амосов, А. А. Вычислительные методы для инженеров: Учеб. пособие. / А. А. Амосов, Ю. А. Дубинский, Н. В. Копченова — М.: Высш. шк., 1994. — 544 с.
8. Иванов, А, М, Шадрин, С, С, Карпухин, К, Е. Интеллектуальное транспортное средство. Адаптация подсистемы определения взаимного положения движущихся транспортных средств / А. М. Иванов, С. С. Шадрин, К. Е. Карпухин // Известия МГТУ "МАМИ" — 2013. — Т. 1 №2(16) — С. 57 — 62.
9. Gray, L. A Mathematician Looks at Wolfram's New Kind of Science /

- L. Gray // Notices of the AMS — 2003. — С. 200 — 211.
10. Истомин, В. В. Прогнозирование поведения групп автономных интеллектуальных агентов на основе теории многоагентных систем /
В. В. Истомин // Инженерный вестник Дона. — 2011. — С. 29 — 32.