

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.131.105>**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА ПОЛЕТА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ НАЛИЧИИ ЗОН УГРОЗ**

Научная статья

Дьячук А.К.¹, Белозерцева А.Н.^{2,*}¹ ORCID : 0000-0001-8732-067X;² ORCID : 0009-0007-4321-1165;^{1,2} Московский Авиационный Институт, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (nasya.belozertseva.01[at]mail.ru)

Аннотация

В статье рассматриваются эффективные алгоритмы поиска оптимального маршрута полета летательного аппарата при наличии зон угроз и неопределенностей. На данный момент в теории насчитывается огромное количество алгоритмов поиска кратчайшего пути, которые активно используются для построения оптимальных маршрутов летательных аппаратов с целью достижения ими заданного пункта назначения. Проведен сравнительный анализ двух исследуемых методов: A* (звезда) и алгоритма Дейкстры. Работа алгоритмов сравнивается по двум критериям: длина найденного кратчайшего пути и количество шагов его нахождения. Результаты сравнения представлены в аналитическом и графическом виде. На основании проведенных расчетов были сделаны выводы о достоинствах рассмотренных методов и области их применения.

Ключевые слова: летательный аппарат, оптимальный маршрут, поиск пути, зона угроз, уровни информированности, метод A* (звезда), метод Дейкстры.

A COMPARATIVE ANALYSIS OF OPTIMAL AIRCRAFT FLIGHT PATH ALGORITHMS FOR THREAT ZONES

Research article

Diyachuk A.K.¹, Belozertseva A.N.^{2,*}¹ ORCID : 0000-0001-8732-067X;² ORCID : 0009-0007-4321-1165;^{1,2} Moscow Aviation Institute, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (nasya.belozertseva.01[at]mail.ru)

Abstract

The article discusses efficient algorithms for finding the optimal aircraft flight route in the presence of threat zones and uncertainties. At present, there are a huge number of shortest path search algorithms in theory, which are actively used to construct optimal aircraft routes in order to reach a given destination. A comparative analysis of two studied methods: A* (star) and Dijkstra's algorithm is conducted. The performance of the algorithms is compared by two criteria: the length of the found shortest path and the number of steps of its finding. The results of the comparison are presented analytically and graphically. Based on the calculations performed, conclusions were made about the merits of the methods under consideration and the scope of their application.

Keywords: aircraft, optimum route, pathfinding, threat zone, awareness levels, A* method (star), Dijkstra's algorithm.

Введение

В настоящее время проектирование маршрутов для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в детерминированной и стохастической системах является актуальной задачей, поскольку данные аппараты применяются в различных областях деятельности, в особенности в оборонной промышленности государств, а также в гражданской сфере, в частности, при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

БПЛА представляет собой безэкипажный летательный аппарат, управление перемещением которого в воздушном пространстве происходит благодаря наличию компьютера и программного обеспечения [1]. Управление БПЛА происходит как автономно, так и с помощью централизованного управления оператором, который имеет возможность корректировать маршрут полета дистанционно в случае необходимости.

Отсутствие летчика на борту дает следующие преимущества:

- нет необходимости в системах, связанных с жизнеобеспечением экипажа, что позволяет сделать аппарат более простым и дешевым;
- исчезают ограничения на максимальные значения перегрузок, угловых скоростей и их градиентов, что расширяет возможности аппарата;
- значительно снижается влияние психофизических факторов на результат
- возможен высокий относительный вес полезной нагрузки;
- более высокая степень готовности и мобильности;
- возможность управления БПЛА с безопасной удалённой территории [2], [3].

Для решения задачи построения траектории движения с успешным обходом препятствий применяются различные алгоритмы.

Для планирования пути БПЛА применяют алгоритмы на графах, оптимизационные методы, стохастические алгоритмы [4].

В современных условиях большую роль приобретают алгоритмы, учитывающие различные уровни информированности:

- алгоритм слепого поиска или алгоритм поиска без графа информации:
 - о поиск в глубину;
 - о поиск в ширину;
 - о алгоритм Дейкстры;
- алгоритм эвристического поиска или алгоритм поиска по информативному графу:
 - о «жадный алгоритм»;
 - о алгоритм A* (A-звезда).

Графом $G(V, E)$, см. (1), называется совокупность двух множеств — непустого множества V (множества вершин) и множества E двухэлементных подмножеств множества V (E — множество рёбер), т.е. [4]:

$$G(V, E) \stackrel{\text{def}}{=} \langle V, E \rangle, V \neq \emptyset, E \subset 2^V \& \forall e \in E (|e| = 2) \quad (1)$$

где: V – непустое множество (множества вершин v);

E – множество двухэлементных подмножеств множества V (E — множество рёбер e);

v, e – элементы графа (вершины и рёбра).

Слепой поиск отличается тем, что для работы алгоритма не требуется дополнительная информация, позволяющая упорядочивать выбор в узлах так, чтобы наилучшие варианты рассматривались в первую очередь.

Методы неинформированного (слепого) поиска в большинстве случаев неэффективны, поэтому возникает необходимость применения алгоритмов эвристического поиска.

Информация о конкретной задаче формулируется в виде эвристической функции. Эвристическая функция на каждом шаге перебора оценивает альтернативы, ссылаясь на дополнительную информацию с целью принятия решения о том, в каком направлении следует продолжать перебор [5].

Эвристическая оценочная функция может иметь зависимость как от внутренних свойств оцениваемого состояния (т.е. свойств, входящих в описание состояния элементов), так и от характеристик всего пространства состояний.

В ряде ситуаций эвристика сокращает перебор начальных и целевых состояний для одних задач, в то время как для других не уменьшает перебор (тогда поиск решения может происходить даже дольше, чем с использованием неинформированного поиска), либо не обеспечивает нахождение оптимального маршрута [6].

Постановка задачи

Имеется полетная карта, заданная в горизонтальной плоскости в виде взвешенного ориентированного графа $G(V, E)$, без дуг отрицательного веса двух уровней информативности:

- информативный граф (детерминированная среда);
- граф без информации (стохастическая среда со статическими препятствиями).

Потребные значения высоты полета БПЛА задаются в узлах маршрута, карта высот формируется отдельно.

В случае динамически меняющейся обстановки в пространстве применяется вероятностный метод, который состоит в случайном выборе точек, распределенных с заданной вероятностью в пространстве. Распределение производится во всем пространстве, включая препятствия; при таком подходе точки, попавшие на препятствия, исключаются. При этом могут возникнуть ситуации, когда случайный выбор маршрутных точек влечет за собой неоптимальный маршрут пути БПЛА [7].

Требование задачи состоит в поиске наиболее оптимального пути по двум критериям: длина пути и шаг его определения.

Алгоритмы, применяемые для поиска кратчайшего пути

3.1 Алгоритм Дейкстры

Алгоритм Дейкстры — алгоритм на графах, созданный в 1959 году нидерландским учёным Эдсгером Дейкстрой. Данный метод позволяет найти кратчайшие пути от одной из вершин графа до всех остальных или до заданной.

Особенность рассматриваемого алгоритма — он применяется только для графов с рёбрами неотрицательного веса [8].

Алгоритм Дейкстры обходит каждую вершину в графе по возрастанию расстояния, начиная от стартовой, то есть вершины будут просматриваться постепенно с возрастанием радиуса вокруг начальной точки [9].

Эффективность алгоритма доказана в исследовании индонезийских ученых [10], однако это также подтверждает недостаток алгоритма – медленный поиск заданной точки.

3.2 Алгоритм A* (A-звезда)

Алгоритм A* (A-звезда) является улучшенной модификацией алгоритма Дейкстры. Это алгоритм поиска по первому наилучшему совпадению на графе, который находит маршрут с наименьшей стоимостью от начальной вершины к целевой. Данный алгоритм можно оптимизировать для практического применения в реальных условиях при ряде ограничений объектов (максимальная скорость, минимальный радиус поворота и т. д.) [11].

Метод A-звезда относится к экспоненциальной категории алгоритмов, в которых поиск происходит по всему множеству исследованных альтернатив, а именно все найденные вершины графа содержатся в списках, и выбор происходит на основе критерия ранжирования, который будет учитывать эффективность продолжения поиска через эти вершины на основе числовой характеристики [12].

Стоимость перемещения для алгоритма A* рассчитывается с помощью выражения:

$$F(x) = h(x) + g(x) \tag{2}$$

где: $h(x)$ – эвристическая функция, позволяющая оценить путь до цели на каждом шаге;
 $g(x)$ – расстояние от начальной точки до целевой.

В качестве эвристической функции при двумерной таблице с 8-ю направлениями принято использовать расстояние Чебышева (максимальное значение абсолютного значения разности между горизонтальной и вертикальной координатами между двумя точками), т.е.:

$$h(x) = \max(|x_n - x_{goal}|, |y_n - y_{goal}|) \tag{3}$$

где: n – рассматриваемая клетка; x_n, y_n – координаты рассматриваемой клетки; x_{goal}, y_{goal} – координаты целевой клетки.

Если в формуле (2) $h(x) = 0$, то метод А* превращается в алгоритм Дейкстры. Тем не менее алгоритм А* может привести к неоптимальному решению задачи, поскольку он ищет путь целенаправленно к одной точке, осматривая только соседние от неё.

Сравнительный анализ представленных алгоритмов

Для анализа были смоделированы граф с ребрами (см. Рисунок.1) и сетка со статическими препятствиями, на которой начальная точка обозначена зеленым цветом, целевая точка – желтым. Препятствия представляют собой черные блоки (см. Рисунок.2).

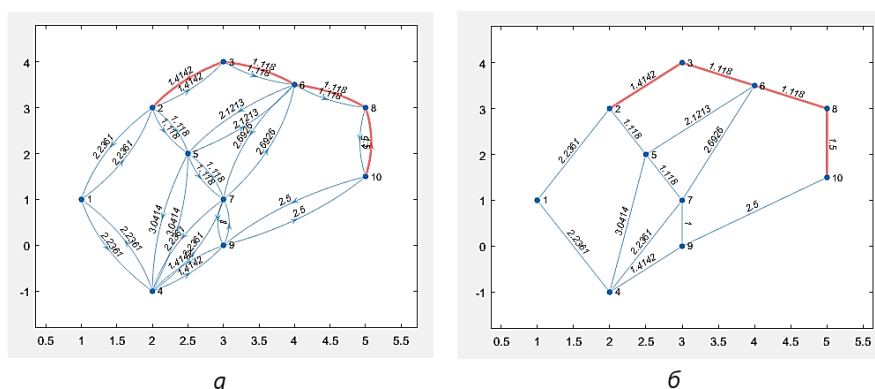


Рисунок 1 - Поиск маршрута:
 а – метод Дейкстры; б – метод А*
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.131.105.1>

В результате расчетов длина маршрута получилась одинаковой у обоих алгоритмов с точностью до 4 знака – 5.1502 (см. Рисунок 1). Полученные при использовании описанных алгоритмов результаты представлены в Таблице 1.

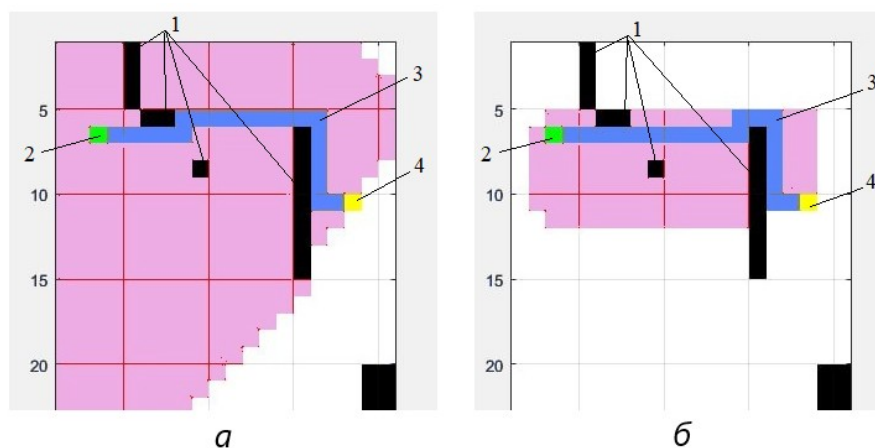


Рисунок 2 - Карта маршрутов:
 а – метод Дейкстры; б – метод А*; 1 – препятствия; 2 – начальная точка; 3 – путь; 4 – целевая точка
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.131.105.2>

Таблица 1 - Результаты

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.131.105.3>

Алгоритм	Алгоритм Дейкстры	Алгоритм А*
Количество шагов алгоритма	348	104

Заключение

На основании проведенных расчетов были сделаны выводы о достоинствах рассмотренных методов и области их применения.

Полученные результаты сравнительного анализа методов А* (звезда) и Дейкстры (см. Таблицу 1) показали, что алгоритм А* (звезда) является более точным и быстрым методом поиска оптимального пути, чем алгоритм Дейкстры.

Однако применение алгоритма А* (звезда) считается наиболее эффективным в условиях, когда известно точное местоположение цели. Но в этом и его недостаток – алгоритм не всегда оптимален, поскольку двигается только в заданную точку, рассматривая соседние, тогда как алгоритм Дейкстры обходит каждую вершину графа, увеличивая радиус поиска.

На основании проведенного анализа [6], [7], [13] можно сделать вывод о том, что эвристические методы поиска не всегда гарантируют нахождение наилучшего решения, поскольку возможен так называемый «пропуск цели». В указанных ситуациях предпочтительно использование «классических» алгоритмов на графах.

Помимо рассмотренных алгоритмов, применяемых для поиска маршрутов в стохастических системах, также имеет место использование алгоритма D* (звезда), который является модификацией вышеописанных поисковых методик [13].

Исследование и разработка алгоритмов поиска оптимального маршрута пути БПЛА имеет большую практическую ценность, как для гражданской, так и для военной авиации, поэтому является перспективным направлением развития науки и техники.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

- Иванова О.М. Физические принципы беспилотных летательных аппаратов. / О.М. Иванова, В.А. Логинов, Д.Ю. Цуркан // Молодой учёный. — 2022. — 35. — с. 9-12.
- Лисейцев Н.К. Беспилотные самолеты вертикального взлета и посадки: Выбор схемы и определение проектных параметров / Н.К. Лисейцев, В.З. Максимович, Н.А. Еремин и др.. — М.: МАИ–ПРИНТ, 2009. — 140 с.
- Шеваль В.В. Беспилотные летательные аппараты как носители оборудования комплексных систем наблюдения / В.В. Шеваль, М.Н. Красильщиков — М.: МАИ–ПРИНТ, 2010. — 104 с.
- Новиков Ф.А. Дискретная математика для программистов: Учебник для вузов / Ф.А. Новиков — СПб: Питер, 2009. — 384 с.
- Информированный метод поиска [Электронный ресурс] // Википедия. — 2018. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Информированный_метод_поиска. (дата обращения: 10.02.23)
- Большакова Е.И. Искусственный интеллект. Алгоритмы эвристического поиска (учебное пособие) / Е.И. Большакова, М.Г. Мальковский, В.Н. Пильщиков — М.: ВМК МГУ, 2002. — 83 с.
- Лю В. Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор). / В. Лю // Математика и математическое моделирование. — 2018. — 1. — с. 15-58. — DOI: 10.24108/mathm.0118.0000098
- Рафгарден Т. Совершенный алгоритм. Графовые алгоритмы и структуры данных / Т. Рафгарден — СПб: Питер, 2019. — 256 с.
- Алгоритмы построения пути для беспилотного автомобиля [Электронный ресурс] // Хабр. — 2017. — URL: <https://habr.com/ru/company/yandex/blog/340674/>. (дата обращения: 22.02.23)
- Rhifky Wayahdi M. Greedy, A-Star, and Dijkstra's Algorithms in Finding Shortest Path. / M. Rhifky Wayahdi, S. Hafiz Nanda Ginting, D. Syahputra // International Journal of Advances in Data and Information Systems. — 2021. — 1. — p. 45-52.
- Piskorskii D.S. Optimization of A-Star Search Algorithm. / D.S. Piskorskii, F.K. Abdullin, A.R. Nikolaeva // Вестник ЮУрГУ. — 2020. — 1. — с. 154-160. — DOI: 10.14529/ctcr200115
- Беркульцев М.В. Обобщенные алгоритмы поиска решений на графе / М.В. Беркульцев — М.: МАИ, 2001. — 55 с.
- Stentz A. Optimal and Efficient Path Planning for Partially-Known Environments. / A. Stentz // Robotics and Automation. — 2000. — 4. — DOI: 10.1007/978-1-4615-6325-9_11

Список литературы на английском языке / References in English

1. Ivanova O.M. Fizicheskie principy' bespilotny'x letatel'ny'x apparatov [Physical Principles of Unmanned Aerial Vehicles]. / O.M. Ivanova, V.A. Loginov, D.Yu. Czurkan // Molodoj uchyonyj [Young Scientist]. — 2022. — 35. — p. 9-12. [in Russian]
2. Liseitsev N.K. Bespilotnie samoleti vertikalnogo vzleta i posadki: Vibor skhemi i opredelenie proektnikh parametrov [Unmanned Vertical Take-off and Landing Aircraft: Choosing a Scheme and Determining Design Parameters] / N.K. Liseitsev, V.Z. Maksimovich, N.A. Yeregin et al.. — M.: MAI-PRINT, 2009. — 140 p. [in Russian]
3. Sheval' V.V. Bespilotny'e letatel'ny'e apparaty' kak nositeli oborudovaniya kompleksny'x sistem nablyudeniya [Unmanned Aerial Vehicles as Carriers of Equipment of Complex Surveillance Systems] / V.V. Sheval', M.N. Krasil'shnikov — M.: MAI-PRINT, 2010. — 104 p. [in Russian]
4. Novikov F.A. Diskretnaya matematika dlya programmistov: Uchebnik dlya vuzov [Discrete Mathematics for Programmers: Textbook for universities] / F.A. Novikov — SPb: Piter, 2009. — 384 p. [in Russian]
5. Informirovannyj metod poiska [Informed Search Method] [Electronic source] // Wikipedia. — 2018. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Информированный_метод_поиска. (accessed: 10.02.23) [in Russian]
6. Bol'shakova E.I. Iskusstvennyj intellekt. Algoritmy' e'vrsticheskogo poiska (uchebnoe posobie) [Artificial Intelligence. Algorithms of Heuristic Search (textbook)] / E.I. Bol'shakova, M.G. Mal'kovskij, V.N. Pil'shnikov — M.: VMK MGU, 2002. — 83 p. [in Russian]
7. Lyu V. Metody' planirovaniya puti v srede s prepyatstviiami (obzor) [Path Planning Methods in an Environment with Obstacles (A Review)]. / V. Lyu // Matematika i matematicheskoe modelirovanie [Mathematics and Mathematical Modeling]. — 2018. — 1. — p. 15-58. — DOI: 10.24108/mathm.0118.0000098 [in Russian]
8. Rafgarden T. Sovershennyj algoritm. Grafovy'e algoritmy' i struktury' danny'x [Perfect Algorithm. Graph Algorithms and Data Structures] / T. Rafgarden — SPb: Piter, 2019. — 256 p. [in Russian]
9. Algoritmy' postroeniya puti dlya bespilotnogo avtomobilya [Algorithms for Constructing a Path for an Unmanned Vehicle] [Electronic source] // Habr. — 2017. — URL: <https://habr.com/ru/company/yandex/blog/340674/>. (accessed: 22.02.23) [in Russian]
10. Rhifky Wayahdi M. Greedy, A-Star, and Dijkstra's Algorithms in Finding Shortest Path. / M. Rhifky Wayahdi, S. Hafiz Nanda Ginting, D. Syahputra // International Journal of Advances in Data and Information Systems. — 2021. — 1. — p. 45-52.
11. Piskorskii D.S. Optimization of A-Star Search Algorithm [Optimization of A-Star Search Algorithm]. / D.S. Piskorskii, F.K. Abdullin, A.R. Nikolaeva // Vestnik YuUrGU [Bulletin of SUSU]. — 2020. — 1. — p. 154-160. — DOI: 10.14529/ctcr200115 [in Russian]
12. Berkul'cev M.V. Obobshchenny'e algoritmy' poiska reshenij na grafe [Generalized Algorithms for Finding Solutions on a Graph] / M.V. Berkul'cev — M.: MAI, 2001. — 55 p. [in Russian]
13. Stentz A. Optimal and Efficient Path Planning for Partially-Known Environments. / A. Stentz // Robotics and Automation. — 2000. — 4. — DOI: 10.1007/978-1-4615-6325-9_11