



ЛОГИСТИКА

УДК 656.02, 519.1

DOI: 10.31799/2077-5687-2023-4-90-96

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ МАРШРУТИЗАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ДОСТАВКИ ГРУЗА

В. А. Манакова

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Благодаря высокой мобильности и низкой стоимости беспилотников, системы доставки грузов на базе дронов продемонстрировали значительный потенциал для обеспечения гибкой и надежной доставки. Доставка грузов с применением беспилотных авиационных систем имеет ряд преимуществ, среди которых увеличение безопасности, автономности и стоимости перевозки. Увеличение автономности движения беспилотной авиационной системы достигается за счет применения интеллектуальных алгоритмов для перемещения в сложной городской среде. Каждый из алгоритмов имеет ряд преимуществ и ограничений, поэтому необходим всесторонний анализ принятия решений по выбору алгоритма для конкретной задачи. Научная статья посвящена анализу и сравнению методов и алгоритмов маршрутизации беспилотных авиационных систем для доставки груза. В рамках анализа алгоритмов была рассмотрена оптимизационная задача маршрута движения транспортной системы и варианты ее решения. В рамках исследования были подробно рассмотрены алгоритмы маршрутизации дронов для оптимизации доставки грузов с точки зрения двух аспектов – планирования траектории и алгоритмов зарядки беспилотных авиационных систем. Для исследования алгоритмов маршрутизации были выбраны алгоритмы, основанные на машинном обучении. Не смотря на то, что в алгоритмических подходах при постановке задачи используются эвристические методы, подходы основанные на машинном обучении, показывают высокую производительность, что позволяет реализовать их на практике. Основная цель стратегий оптимизации зарядки беспилотной авиационной системы заключается в максимизации зоны покрытия доставки, времени полета дрона и минимизации количества необходимых зарядных станций в соответствии с распределением пунктов доставки путем корректировки положения зарядных станций для снижения стоимости реализации. Проведено качественное сравнение рассмотренных алгоритмов с точки зрения их преимуществ и ограничений и данных о производительности алгоритма. Таким образом, разработана методика принятия решений по выбору алгоритма маршрутизации беспилотной авиационной системы для решения задачи доставки грузов в условиях городской среды.

Ключевые слова: алгоритмы планирования траектории, доставка грузов, маршрутизация беспилотников, беспилотная авиационная система.

Для цитирования:

Манакова, В. А. Сравнительный анализ методов маршрутизации беспилотных авиационных систем для доставки груза / В. А. Манакова // Системный анализ и логистика. – 2023. – № 4(38). – с. 90 – 96. DOI: 10.31799/2077-5687-2023-4-90-96.

A COMPARATIVE ANALYSIS OF ROUTING METHODS FOR UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS FOR CARGO DELIVERY

V. A. Manakova

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Due to the high mobility and low cost of drones, drone-based cargo delivery systems have demonstrated significant potential to provide flexible and reliable delivery. Cargo delivery using unmanned aircraft systems has a number of advantages, including increased safety, autonomy and cost of transportation. Increasing the autonomous movement of an unmanned aircraft system is achieved through the use of intelligent algorithms for moving in a complex urban environment. Each of the algorithms has a number of advantages and limitations, so a comprehensive analysis of decision-making on the choice of an algorithm for a specific task is necessary. The scientific article is devoted to the analysis and comparison of methods and algorithms for routing unmanned aircraft systems for cargo delivery. As part of the analysis of the algorithms, the optimization problem of the route of the transport system and its solutions were considered. As part of the study, drone routing algorithms for optimizing cargo delivery were considered in detail from the point of view of two aspects – trajectory planning and charging algorithms for unmanned aircraft systems. Algorithms based on machine learning were chosen to study routing algorithms. Despite the fact that algorithmic approaches use heuristic methods when setting the problem, machine learning-based approaches show high performance, which allows them to be implemented in practice. The main objective of the strategies for optimizing the charging of an unmanned aircraft system is to maximize the delivery coverage area, the flight time of the drone and minimize the number of required



charging stations in accordance with the distribution of delivery points by adjusting the position of charging stations to reduce the cost of implementation. A qualitative comparison of the considered algorithms is carried out in terms of their advantages and limitations and data on the performance of the algorithm. Thus, a decision-making methodology has been developed for choosing an algorithm for routing an unmanned aircraft system to solve the problem of cargo delivery in an urban environment.

Keywords: trajectory planning algorithms, cargo delivery, drone routing, unmanned aerial vehicle.

For citation:

Manakova, V. A. Comparative analysis of routing methods for unmanned aerial systems for cargo delivery / V. A. Manakova // *System analysis and logistics*. – 2023. – № 4(38). – p. 90 – 96. DOI: 10.31799/2077-5687-2023-4-90-96.

Введение

В последнее время благодаря высокой мобильности и низкой стоимости беспилотников системы доставки на базе дронов продемонстрировали значительный потенциал для обеспечения гибкой и надежной доставки посылок. При проектировании таких систем необходимо учитывать несколько важнейших вопросов, включая планирование маршрута, учет веса полезной нагрузки, измерение расстояния и определение местоположения покупателя. В этой статье рассмотрим обзор новых алгоритмов маршрутизации дронов для систем доставки на основе беспилотников, уделяя особое внимание двум основным аспектам маршрутизации дронов: планированию траектории и зарядке. Сравним алгоритмы с точки зрения их основной идеи, преимуществ, ограничений и аспектов производительности.

Общий сценарий доставки

После подтверждения заказа, система доставки назначает беспилотник, который забирает товар из источника и доставляет его в пункт назначения. Беспилотник подбирается в зависимости от доступного заряда батареи и места назначения. По окончании поездки дрону необходимо принять несколько решений, например, подзарядить аккумулятор, доставить следующую посылку или дождаться получения следующей посылки.

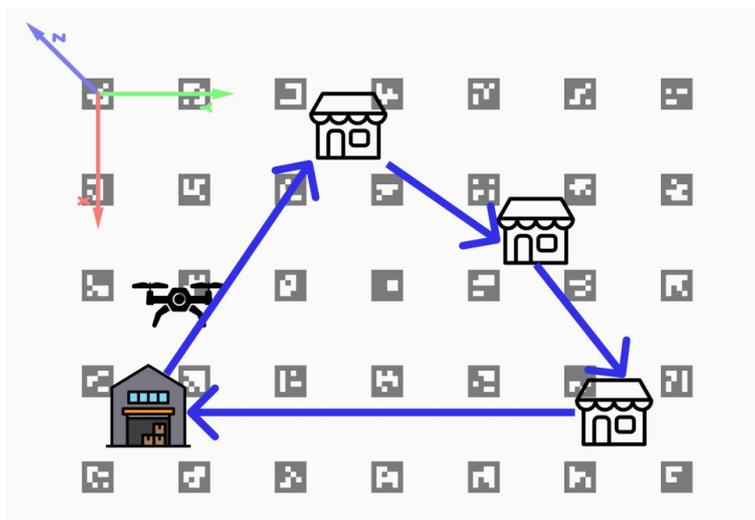


Рис. 1. Общий сценарий доставки

Использование дронов для доставки грузов дает преимущества по сравнению с традиционной логистикой в различных аспектах [8]. Общий сценарий доставки с помощью дронов представлен на рисунке 1. Поскольку применение беспилотников становится все более популярным благодаря технологическому прогрессу, логистическая отрасль также пытается воспользоваться успехом, который приносят беспилотники. По сравнению с традиционной схемой доставки, преимущества беспилотной доставки следующие: 1. Ускоренная доставка может быть обеспечена за счет сокращения времени доставки и расстояния в пути. 2.



Снижение затрат, поскольку беспилотники дешевле грузовиков. 3. Доставка может быть обеспечена даже в чрезвычайных ситуациях, таких как наводнения и землетрясения. 5. Снижаются выбросы углекислого газа, так как беспилотники не используют ископаемое топливо. Для доставки груза дроном из склада в другую точку необходимо выполнить следующие этапы:

1. Подготовка груза: Груз должен быть правильно упакован и зафиксирован, чтобы избежать повреждений во время полета. Вес и размер груза также должны быть в пределах допустимых значений для дрона, чтобы он смог его перенести.

Планирование маршрута: Необходимо определить наиболее эффективный маршрут для доставки груза. Это включает в себя учет расстояния, преград на пути, летное время и другие факторы. Существуют различные алгоритмы, которые могут помочь в выборе оптимального маршрута.

3. Выбор дрона: Необходимо выбрать дрон, который соответствует требованиям для доставки груза. Это включает в себя учет грузоподъемности дрона, его дальности полета, скорости и других характеристик. Некоторые доставки также могут требовать специализированного оборудования, например, защиту от негативных погодных условий или определенные сенсоры.

4. Управление полетом: Во время полета дрон должен быть правильно управляем. Это включает в себя навигацию, предотвращение столкновений, контроль высоты и другие аспекты безопасности. Беспилотники могут быть управляемыми вручную или автоматизированными с помощью программного обеспечения.

5. Доставка и отслеживание: После прибытия на место назначения, дрон должен корректно доставить груз. После доставки можно использовать системы отслеживания, чтобы убедиться, что груз был получен и доставлен в нужное место.

Рассмотрим пункт 2 и сравним некоторые из возможных алгоритмов. Подчеркнем два основных аспекта маршрутизации дронов в беспилотных системах доставки: планирование траектории и зарядка.

Сравнение алгоритмов планирования траектории

В таблице 1 перечислены технологии доставки с помощью беспилотников, в которых основное внимание уделяется разработке траектории, а также их соответствующие преимущества и ограничения. Исходя из каждой схемы траектории, рассмотренной ранее для беспилотных систем доставки, большинство исследований сосредоточено либо на максимизации времени полета для обеспечения максимального покрытия за один заряд, либо на минимизации расстояния полета для доставки. Во многих алгоритмических подходах при постановке задачи используются эвристические подходы. Однако подходы, основанные на машинном обучении, несмотря на дороговизну вычислений, обещают высокую производительность, что позволяет реализовать их на практике. Несмотря на доказательство оптимальной траектории полета, ни одна из этих схем не учитывает влияние погоды и различных ветровых условий на формулировку траектории.

Таблица 1 – Сравнение алгоритмов планирования траектории при маршрутизации беспилотников с точки зрения основной идеи, преимуществ и ограничений

Алгоритм	Идея	Преимущество	Ограничения
[1]	Автоматизированное проектирование траектории на базе беспилотника для оптимального пути доставки	Адаптивность к новым данным о траектории независимо от явной матрицы расстояний. При расчете оптимального маршрута учитывается нелинейное потребление энергии, спрос клиентов и сроки обслуживания.	Требуется большой объем данных для точного предсказания траектории движения беспилотника



Продолжение Таблицы 1

Алгоритм	Идея	Преимущество	Ограничения
[2]	Для доставки грузов на дальние расстояния с помощью беспилотника разрабатывается одновременное определение маршрута и местоположения зарядных станций, чтобы максимально увеличить безопасную зону полета.	Обеспечивает максимальный охват доставки (расстояние), используя хорошо расположенные зарядные станции по всей территории за одну миссию	Предложенная схема игнорирует влияние погоды, а также любые препятствия, с которыми может столкнуться дрон на своей траектории
[3]	Траектория полета дрона формулируется как MDP (Марковский процесс принятия решения), а приоритетом является минимизация времени полета.	Модель учитывает стохастические условия движения и работает с искусственно сгенерированными данными, чтобы продемонстрировать эффективность работы алгоритма.	Предлагаемый подход демонстрирует большее время вычислений и полетных данных, чем другие эталоны.

В таблице 2 приведено сравнение различных изученных схем траекторной техники для беспилотных систем доставки с точки зрения метрик оценки, целей и инновационных особенностей. Каждый из этих методов оценивается по соответствующим целевым параметрам. Однако каждый метод имеет свою уникальность либо с точки зрения алгоритмических подходов к решению, либо с точки зрения формулировки желаемой цели.

Таблица 2 – Сравнение алгоритмов планирования траектории при маршрутизации беспилотников с точки зрения оцениваемых метрик, цели и инновационных возможностей

Алгоритм	Оцениваемые показатели	Цель деятельности	Инновационные возможности
	Время узлов – клиентов, разрыв оптимальности траектории, эффект механизма внимания, разрыв энергии.	Минимизация расстояния до маршрута путем поиска оптимального пути.	Механизм внимания на стороне декодера для корректировки информации о траекториях.
[2]	Среднее время доставки, время вычисления алгоритма, коэффициент покрытия зоны доставки, дальность полета дрона, количество обслуженных клиентов и потребление энергии.	Максимизация расстояния полета дрона относительно зарядных станций.	Рассмотрение максимальной и безопасной дальности полета для беспилотной системы доставки
[3]	Вариации времени в пути, среднее время доставки	Минимизация стохастического времени в пути дрона для доставки.	DQN (deep Q-networks - глубокие нейронные сети и A2C (алгоритмом использующими концепцию actor-critic) объединены и используются для решения проблемы размерности.

Сравнение алгоритмов зарядки дронов

Сравним между собой различные стратегии зарядки в беспилотных системах доставки. В таблице 3 перечислены цели, преимущества, ограничения, инновационные особенности и ограничения, учитываемые в процессе оптимизации, а также показатели эффективности различных стратегий зарядки. Как уже было сказано, основная цель стратегий зарядки заключается в максимизации зоны покрытия доставки, времени полета дрона и минимизации количества необходимых зарядных станций в соответствии с распределением пунктов доставки путем корректировки положения зарядных станций для снижения стоимости



развертывания.

Таблица 3 – Сравнение алгоритмов зарядки в маршрутизации дронов с точки зрения основной идеи, преимуществ и ограничений

Алгоритм	Идея	Преимущество	Ограничения
4]	Минимизировать среднее время доставки товара клиентам.	В процессе оптимизации учитывается ограничение на размещение зарядных станций на ограниченной территории, а также точный расчет времени полета дрона.	В процессе оптимизации не учитываются ограниченные ресурсы аккумуляторов зарядных станций
[5]	Максимизация площади доставки за счет оптимальной кластеризации мест доставки и минимизации количества необходимых зарядных станций	Благодаря оптимальной кластеризации мест доставки с помощью k-средних, она совместно оптимизирует местоположение зарядных станций, чтобы увеличить время полета дронов и зону покрытия.	Расположение ограниченных областей для размещения зарядных станций не учитывается.
[6]	Получить оптимальное количество зарядных станций и их расположение	Рекурсивное удаление зарядных станций в соответствии с наложенным ограничением на коэффициент покрытия позволяет достичь оптимального расположения и быстро минимизировать количество для покрытия большой площади.	Метод учитывает только корректировку местоположения зарядных станций в соответствии с фиксированным пороговым временем полета дронов. Однако время полета дронов может меняться в зависимости от их траектории и влияния окружающей среды.
[7]	Минимизация перегрузок на зарядных станциях для обеспечения бесперебойного обслуживания дронов и минимизации времени ожидания на зарядных станциях с помощью алгоритма Дейкстры	Количество зарядных станций, среднее время полета беспилотника и среднее использование зарядных станций.	Центральный облачный сервер должен иметь связь со всеми дронами и зарядными станциями, чтобы получать глобальные знания.

Согласно таблице 4, в большинстве методов для расчета реалистичного времени полета дрона не учитываются факторы окружающей среды, что важно для определения оптимального расположения зарядных станций. Кроме того, для оценки оптимального времени полета необходима точная модель энергопотребления, учитывающая тип дрона, аэродинамику, размер полезной нагрузки и траекторию. Далее, большинство алгоритмов, за исключением СВРТС, игнорируют ограничение на размещение зарядных станций вблизи запретных зон. В процессе оптимизации все рассмотренные алгоритмы, кроме CDNC, считают, что зарядные станции обладают достаточными ресурсами, такими как наличие зарядных площадок и запасных полностью заряженных аккумуляторов. Кроме того, они игнорируют возможность отказа станций. Это предположение может быть неточным в реальных условиях. Любой дополнительный запрос, превышающий его возможности, может привести к отказу дрона и серьезной перегрузке при предоставлении услуг, что может привести к увеличению времени ожидания. Это еще больше увеличивает время полета беспилотников и снижает среднее время доставки товаров.



Таблица 4 – Сравнение алгоритмов зарядки для маршрутизации дронов с точки зрения инновационных возможностей, показателей производительности и ограничений оптимизации

Алгоритм	Инновационные возможности	Показатели производительности	Ограничения оптимизации
[4]	Совместно рассматривается сотрудничество между общественным транспортом, беспилотниками и зарядными станциями, чтобы максимально сократить время полета беспилотников для обслуживания клиентов.	Среднее время доставки, количество необходимых CS и среднее время полета беспилотника	Ограниченное количество зарядных станций, пороговое расстояние между ними в зависимости от времени полета беспилотника, а также связь между станциями и всеми клиентами.
[5]	Используется алгоритм k-средних для кластеризации часто доставляемых мест и размещения зарядных станций.	Коэффициент покрытия и количество зарядных станций	Ограниченное количество зарядных станций.
[6]	Использует минимальное остовное дерево для поиска оптимальной траектории полета и размещения зарядных станций для увеличения времени полета дрона.	Коэффициент покрытия доставки и количество необходимых зарядных станций.	Ограниченный вес посылки, расстояние между двумя зарядными станциями в зависимости от времени полета дрона, пороговый коэффициент покрытия зарядных станций.
[7]	Облачная система навигации и зарядки нескольких дронов, использующая глобальную информацию о траектории движения дрона, времени полета и состоянии зарядных станций.	Количество зарядных станций, среднее время полета беспилотника и среднее использование зарядных станций.	Центральный облачный сервер должен иметь связь со всеми дронами и зарядными станциями, чтобы получать глобальные знания.

Рассмотрим конкретную цель – доставка груза из одного пункта в другой в рамках лаборатории. На рисунке 1 видно, что доставка осуществляется из склада в три необходимых пункта, где склад также является зарядной станцией. Рассмотрев таблицу 1 и таблицу 2, выберем необходимый нам алгоритм планирования траектории. Больше всего нам подходит алгоритм A-Ptr-Net, ведь мы имеем большой объем данных для точного предсказания траектории движения беспилотника, что поможет выбрать оптимальный маршрут и минимизировать время в пути. Лучший алгоритм для доставки груза дроном всегда будет зависеть от конкретных условий, требований и ограничений. Например, для доставки на большие расстояния более предпочтительным является алгоритм генетического программирования или нейронные сети, в то время как для доставки на близкие расстояния и небольшие грузы достаточно алгоритма оптимального пути или динамического программирования. Каждый из рассмотренных алгоритмов может быть применен для конкретной задачи. Несмотря на многочисленные усилия по разработке методов маршрутизации в логистических системах на основе беспилотных летательных аппаратов, все еще существуют некоторые важные проблемы, связанные с растущим спросом со стороны клиентов и неопределенными условиями окружающей среды, которые еще предстоит рассмотреть. Таким образом, очень важно разработать эффективные и надежные алгоритмы маршрутизации дронов для беспилотных систем доставки с учетом практических условий и неопределенности окружающей среды. Чтобы сделать следующий шаг в развитии доставки посылок, логистические системы на базе дронов станут важнейшим элементом для повышения качества обслуживания в будущем.

Заключение

Существует множество алгоритмов, помогающих оптимизировать построение маршрутов для доставки с помощью беспилотников. Целью этой работы было сравнить и рассмотреть некоторые из них, разделив их для разных запросов. Мы подробно рассмотрели



существующие алгоритмы маршрутизации дронов в системах доставки с помощью новой таксономии с точки зрения двух основных аспектов, а именно планирования траектории и зарядки. Затем было проведено качественное сравнение рассмотренных алгоритмов с точки зрения их основной идеи, преимуществ, ограничений и подробной информации о производительности. Таким образом, очень важно разработать эффективные и надежные алгоритмы маршрутизации дронов для беспилотных систем доставки с учетом практических условий и неопределенности окружающей среды. Чтобы сделать следующий шаг в развитии доставки посылок, логистические системы на базе дронов станут важнейшим элементом для повышения качества обслуживания в будущем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kong, F. Trajectory Optimization for Drone Logistics Delivery via Attention-Based Pointer Network / F. Kong, J. Li, B. Jiang, H. Wang, H. Song // *Trans. Intell. Transp. Syst.* – 2022. – p. 1–13.
2. Arafat, M. Y. JRCS: Joint Routing and Charging Strategy for Logistics Drones. / M. Y. Arafat, S. Moh // *IEEE Internet Things J.* – 2022. – № 9(21) – P. 1-14.
3. Liu, Z. The flying sidekick traveling salesman problem with stochastic travel time: A reinforcement learning approach. / Z. Liu, X. Li, A. Khojandi // *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* – 2022 – Vol. 164. – 102816.
4. Huang, H. Deployment of Charging Stations for Drone Delivery Assisted by Public Transportation Vehicles / H. Huang, A. V. Savkin // *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* – 2021. – P. 1–12.
5. Ahmadon, M.A.B.; Yamaguchi, S. Cluster-Based Positioning Method of Drone Charging Station for Enlargement of Delivery Area // *In Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*. – Las Vegas, NV, USA, 2021.
6. Huang, H. A Method of Optimized Deployment of Charging Stations for Drone Delivery / H. Huang, A. V. Savkin // *IEEE Trans. Transp. Electrification*. – 2020. – № 6. – P. 510–518
7. Kim, J. CBDN: Cloud-Based Drone Navigation for Efficient Battery Charging in Drone Networks / J. Kim, S. Kim, J. Jeong, H. Kim, J.S. Park, T. Kim // *Trans. Intell. Transp. Syst.* – 2019. – № 20. – p. 4174–4191.
8. Костин, А. С. Исследование моделей и методов маршрутизации практического выполнения автономного движения беспилотными транспортными системами для доставки грузов / А. С. Костин, Н. Н. Майоров // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. – 2023. – Т. 15, № 3. – С. 524-536.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Манакова Варвара Александровна –

студент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

E-mail: varya_manakova06@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Manakova Varvara Alexandrovna –

Student

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: varya_manakova06@mail.ru