

УДК 629

## Технологии и методы планирования перемещения БПЛА по маршрутным точкам

**Липанов Илья Дмитриевич** — аспирант кафедры «Информационные и вычислительные системы». E-mail: illipanov@mail.ru

**Хомоненко Анатолий Дмитриевич**<sup>1,2</sup> — докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры «Информационные и вычислительные системы», профессор кафедры «Математическое и программное обеспечение». E-mail: khomonenko@pgups.ru

<sup>1</sup> Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

<sup>2</sup> Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Россия, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

**Для цитирования:** Липанов И. Д., Хомоненко А. Д. Технологии и методы планирования перемещения БПЛА по маршрутным точкам // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2024. № 3 (39). С. 30–43. DOI: 10.20295/2413-2527-2024-339-30-43

**Аннотация.** В нашем мире особое место занимают беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Их способность перемещаться по заданным маршрутам открывает перспективы в разных сферах. **Цель исследования:** обзор и анализ навигационных систем и алгоритмов маршрутизации БПЛА, методов, позволяющих БПЛА с высокой точностью следовать по маршруту. Исследуются системы GPS и инерциальной навигации (INS), обеспечивающие точное определение местоположения. Анализируются возможности сенсорных систем — камер, лидаров и ультразвуковых датчиков — для обнаружения препятствий и корректировки траектории; воксельные карты для трехмерного моделирования окружающей среды и методы одновременной локализации и картографирования (SLAM); алгоритм A\* (A-star); генетический алгоритм маршрутизации, алгоритмы избегания препятствий на основе потенциалов и RRT. **Практическая значимость:** применение указанных алгоритмов и технологий может существенно повысить безопасность и точность маршрутизации БПЛА, возможность автономно перемещаться в сложных и динамически изменяющихся ландшафтах. В заключение **обсуждаются** преимущества и ограничения навигационных подходов и технологий, значимость интеграции сенсорных систем и методов SLAM для повышения автономности и эффективности БПЛА, направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** маршрутизация БПЛА, GPS, INS, SLAM, ADS-B, воксельные карты, сенсорные системы, генетический алгоритм, алгоритм RRT

### Введение

Современные беспилотные летательные аппараты (БПЛА, или дроны) становятся все более популярными в самых разных сферах, включая логистику, экологический мониторинг, сельское

хозяйство и спасательные операции. Одной из основных задач, обеспечивающих успешное выполнение миссий беспилотных летательных аппаратов, является их способность точно

и надежно перемещаться по заранее заданным точкам маршрута. Для этого требуется применять современные методы и технологии, которые позволяют планировать и контролировать движение аппарата в реальном времени, принимая во внимание различные факторы, такие как погодные условия, наличие препятствий и ограниченные ресурсы на борту.

Для достижения высокой точности навигации беспилотных летательных аппаратов активно используются глобальные системы позиционирования (Global Positioning System, GPS), инерциальные навигационные системы (Inertial Navigation System, INS) и разнообразные сенсорные технологии, которые помогают определить местоположение устройства в пространстве и корректировать его траекторию. Кроме того, для успешного передвижения по сложным и динамичным маршрутам необходимо применять интеллектуальные алгоритмы, способные адаптироваться к меняющимся условиям и обеспечивать автономное принятие решений на борту БПЛА.

Кроме того, остаются актуальными задачи по интеграции различных навигационных систем и разработке методов для обхода препятствий так, чтобы БПЛА могли безопасно и эффективно выполнять свои функции даже в условиях ограниченной видимости и плотной городской застройки.

Таким образом, исследование алгоритмов и технологий планирования перемещения БПЛА по заданным маршрутным точкам является важным направлением, имеющим большое значение для развития беспилотных технологий и расширения их применения в различных областях. В настоящей статье проведен обзор и рассмотрены ключевые подходы к планированию маршрутов, интеграции навигационных систем, а также перспективы внедрения новых технологий для повышения эффективности и безопасности полетов БПЛА.

## Системы позиционирования БПЛА

Принципы навигации и маршрутизации БПЛА имеют важное значение для их эффективного и безопасного перемещения по установленным маршрутам.

Навигация БПЛА основывается на применении различных технологий, которые позволяют точно определять местоположение и путь движения устройства. Одной из основных технологий является система глобального позиционирования GPS. Принцип работы GPS заключается в измерении времени, необходимого для того, чтобы сигнал прошел от спутника до приемника. Зная это время и скорость света, можно рассчитать расстояние до спутника. При получении сигналов от нескольких спутников (обычно не менее четырех) приемник способен определить свои координаты с помощью метода триангуляции.

Формула вычисления расстояния до спутника [1]:

$$d = c \cdot t,$$

где  $d$  — расстояние до спутника,  $c$  — скорость света,  $t$  — время прохождения сигнала.

GPS обеспечивает точное определение местоположения БПЛА в режиме реального времени, что дает возможность отслеживать его перемещение и при необходимости вносить изменения в маршрут.

Обозначим вектор координат в GPS:

$$P = (x, y, z),$$

где  $x, y, z$  — координаты БПЛА в глобальной системе координат.

Для повышения точности позиционирования применяется дифференциальный GPS (Differential GPS, DGPS), который учитывает погрешности, возникающие из-за атмосферных явлений и других факторов. В системе DGPS используются наземные станции, обладающие точными координатами, которые способны вычислять ошибки в спутниковых сигналах. Эти станции передают корректирующую информацию, что позволяет GPS-приемникам снижать погрешности в определении местоположения.

Инерциальные навигационные системы INS также имеют важное значение в навигации беспилотных летательных аппаратов. INS фиксируют ускорения и угловые скорости устройства, что дает возможность определить его текущее местоположение и ориентацию. Схема интеграции GPS и INS приведена на рис. 1. Сочетание данных GPS

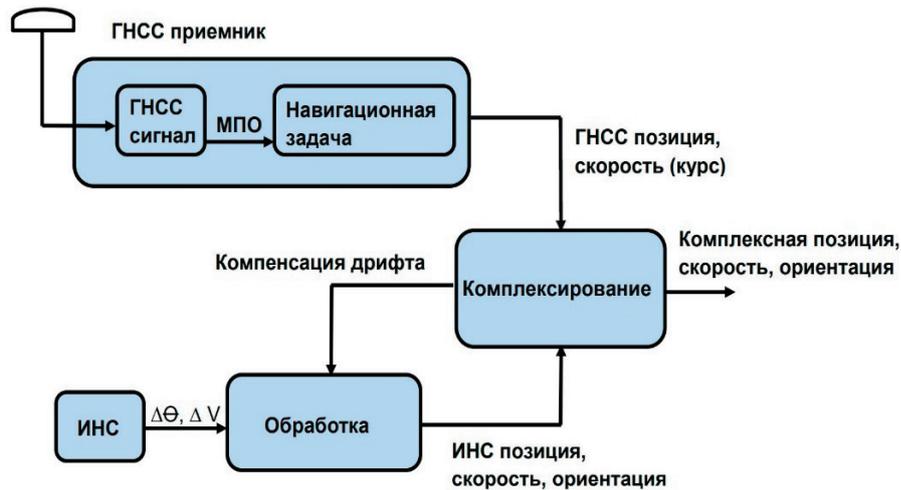


Рис. 1. Схема интеграции GPS и INS

и INS обеспечивает высокую точность и надежность навигации, что особенно критично в ситуациях, когда сигнал GPS заметно ослаблен [2].

Основные шаги включают интеграцию ускорений для получения скорости, а затем интеграцию скорости для обновления координат. Простейшая форма расчета координат может быть представлена следующими формулами:

1. Обновление скорости:

$$v(t) = v(t-1) + a(t) \cdot \Delta t,$$

где  $v(t)$  — вектор скорости на текущий момент времени  $t$ ,  $v(t-1)$  — вектор скорости на предыдущий момент времени  $t-1$ ,  $a(t)$  — вектор ускорения, измеренный акселерометром в момент времени  $t$ , а  $\Delta t$  — временной интервал между измерениями.

2. Обновление координат:

$$r(t) = r(t-1) + v(t) \cdot \Delta t,$$

где  $r(t)$  — вектор положения (координаты) на текущий момент времени  $t$ ,  $r(t-1)$  — вектор положения на предыдущий момент времени  $t-1$ ,  $v(t)$  — вектор скорости на текущий момент времени  $t$ .

Эти уравнения описывают процесс двойной интеграции ускорений, измеряемых INS, для определения текущего положения БПЛА.

Радионавигационные системы дополняют функционал GPS и инерциальных навигационных систем INS, предоставляя дополнительные сведения о местоположении и корректировке маршрутов. Для определения координат беспилотных летательных аппаратов применяются радиомаяки

и наземные станции, а системы автоматического зависимого наблюдения (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, ADS-B) позволяют получать информацию о местоположении и движении других воздушных судов, что помогает избежать столкновений.

Визуальная навигация и лидарные технологии становятся все более востребованными благодаря прогрессу в области обработки изображений и лазерного сканирования. Камеры и лидары позволяют собирать данные об окружающей среде и создавать карты местности. Обработка изображений способствует распознаванию маркеров и объектов на пути БПЛА, что повышает точность и безопасность навигационных процессов.

### Взаимосвязь алгоритмов и методов навигации БПЛА

Алгоритмы и методы навигации БПЛА тесно связаны и служат одной общей цели — обеспечению точного и безопасного перемещения беспилотных летательных аппаратов в различных средах.

#### Основные аспекты взаимосвязи алгоритмов и методов навигации:

*Основа для принятия решений.* Алгоритмы являются основой для всех методов навигации БПЛА, определяя логику и шаги для выполнения задач навигации, таких как взлет, полет по заданному маршруту, обход препятствий, посадка и т.д. Они обрабатывают данные с датчиков и внешних

источников для принятия решений в реальном времени.

*Встроенные системы.* Методы навигации БПЛА часто используют встроенные системы, такие как GPS, инерциальные навигационные системы (ИНС), системы видения и лидары для определения положения и ориентации аппарата. Эти системы нуждаются в алгоритмах для интерпретации получаемых данных и принятия соответствующих навигационных решений.

*Адаптация к среде.* Алгоритмы позволяют БПЛА адаптироваться к изменениям в среде и условиям полета, используя методы, такие как SLAM для картографирования и локализации в неизвестной среде, или алгоритмы потенциалов и RRT для обхода препятствий.

*Эффективность и безопасность.* Современные алгоритмы стремятся повысить не только эффективность полетов БПЛА, минимизируя время и расход энергии, но и их безопасность, обеспечивая избежание столкновений и остальных опасностей.

*Разработка и оптимизация.* Алгоритмы и методы навигации разрабатываются и постоянно оптимизируются с учетом новых технологических достижений, таких как искусственный интеллект и машинное обучение, что позволяет создавать более интеллектуальные и автономные системы навигации БПЛА.

В итоге алгоритмы обеспечивают «мозг» навигационным системам БПЛА, позволяя эффективно использовать сенсорные данные и методы навигации для выполнения задачи.

### Маршрутизация и алгоритмы планирования маршрута

Маршрутизация беспилотных летательных аппаратов включает несколько этапов, начиная с разработки маршрута и заканчивая его оптимизацией и корректировкой в реальном времени. На этапе планирования маршрута определяются точки пути (waypoints), через которые должен пройти БПЛА, при этом учитываются ограничения по высоте, зоны полетов и наличие опасных объектов.

Алгоритм A\* (A-star) реализует один из самых распространенных одноименный метод плани-

рования маршрутов. Он применяется для поиска кратчайшего пути в графах и представляет собой усовершенствованную версию алгоритма Дейкстры, так как использует эвристическую функцию для оценки расстояния до конечной цели.

Формула для вычисления маршрута с применением модифицированного алгоритма Дейкстры (A\*) [3]:

$$f(n) = g(n) + h(n),$$

где  $f(n)$  — полная оценка стоимости пути через узел  $n$ ,  $g(n)$  — стоимость пути от начальной точки до узла  $n$ ,  $h(n)$  — эвристическая оценка стоимости пути от узла  $n$  до конечной точки. Пример работы алгоритма приведен на рис. 2.

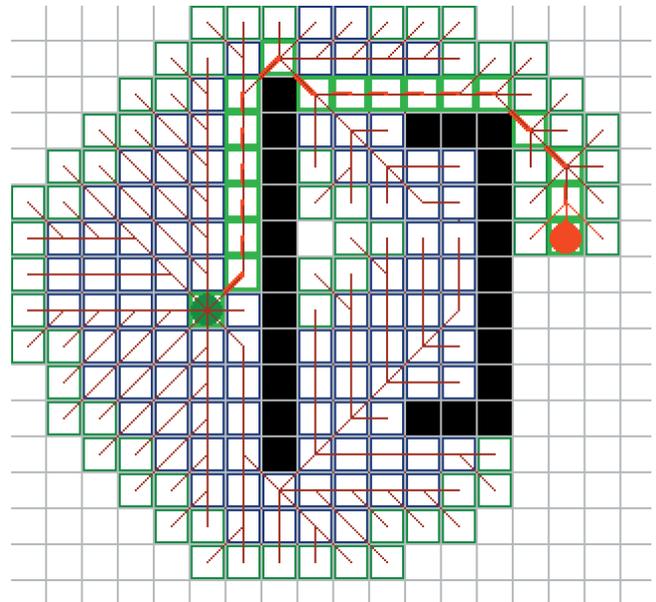


Рис. 2. Пример работы алгоритма A\*

Алгоритм Дейкстры предназначен для определения кратчайшего пути от одной вершины графа ко всем остальным вершинам. Он функционирует за счет итеративного пересмотра оценок расстояний и служит основой для множества других алгоритмов [3]:

$$d(v) = \min(d(v), d(u) + w(u, v)),$$

где  $d(v)$  — стоимость пути до вершины  $v$ ,  $d(u)$  — стоимость пути до вершины  $u$ ,  $w(u, v)$  — вес ребра между вершинами  $u$  и  $v$ . Блок-схема и пример работы алгоритма Дейкстры приведены на рис. 3.

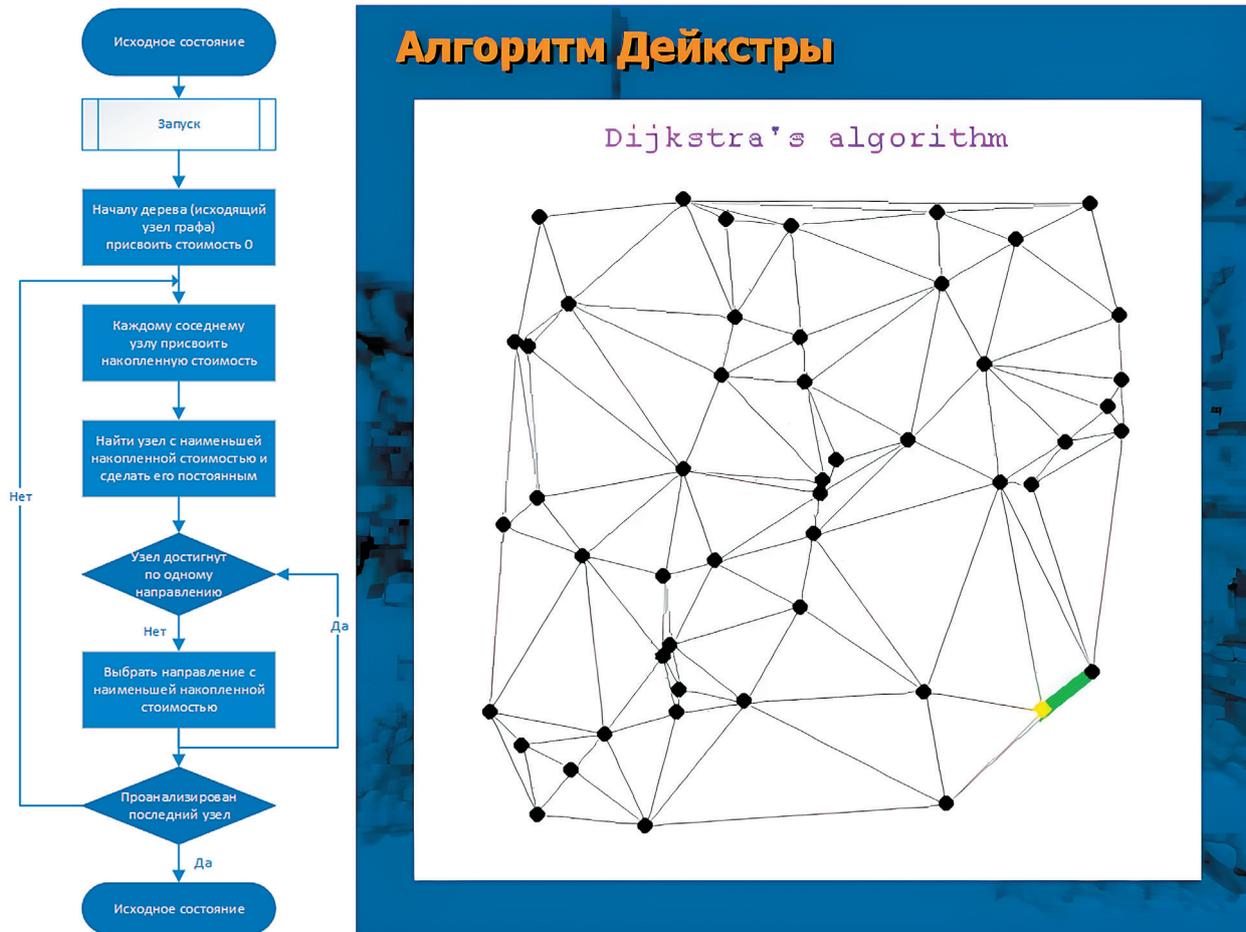


Рис. 3. Блок-схема и пример работы алгоритма Дейкстры

Разработка новых модификаций существующих алгоритмов маршрутизации предлагает оригинальные улучшения алгоритмов, таких как RRT, A\*, или алгоритмов на основе потенциалов, адаптировав их под условия динамической среды с реальными временными ограничениями. Например, связь алгоритмов A\* и RRT лучше оптимизирует путь с учетом изменения окружающей среды, а также делает это с меньшими вычислительными затратами в сравнении с алгоритмом Дейкстры.

### Генетический алгоритм маршрутизации

Генетические алгоритмы (ГА) представляют собой эффективные инструменты для решения сложных задач оптимизации в таких областях, как наука о данных, инженерия, экономика и логистика, включая задачи маршрутизации.

Эти алгоритмы имитируют процесс естественного отбора, применяя принципы наследования,

мутации, селекции и кроссинговера для поиска наилучших решений [4].

Генетический алгоритм включает в себя несколько ключевых этапов:

1. *Создание начальной популяции маршрутов:* формирование исходного набора возможных маршрутов полета БПЛА (вариантов перемещения).
2. *Оценка эффективности маршрута:* анализ каждого маршрута полета БПЛА с точки зрения определенной целевой функции для планирования маршрута.
3. *Отбор маршрутов:* выбор наиболее оптимальных маршрутов для последующего скрещивания, основываясь на их эффективности.
4. *Скрещивание маршрутов:* объединение элементов отобранных маршрутов для создания новых вариантов маршрутов перемещения.
5. *Мутация маршрутов:* внесение случайных изменений в некоторые маршруты для обеспечения

разнообразия и избежания застревания в локальных оптимумах.

6. *Обновление популяции маршрутов*: замена предыдущего поколения маршрутов БПЛА заново сгенерированными вариантами.

7. *Итерация*: повторение процесса оценки эффективности, отбора, скрещивания, мутации и обновления до достижения заданного критерия завершения или нахождения оптимального маршрута перемещения.

В задачах маршрутизации решения обычно представляют в виде хромосом, каждая из которых соответствует определенному маршруту. Например, в задаче коммивояжера хромосома может состоять из последовательности точек маршрута (waypoints), которые необходимо посетить коммивояжеру. Задача коммивояжера и задача планирования перемещения БПЛА тесно связаны друг с другом, поскольку обе являются вариацией классической проблемы маршрутизации. В обоих случаях целью является оптимизация маршрута таким образом, чтобы достигнуть максимальной эффективности посещения ряда точек на карте или узлов в графе.

Функция приспособленности оценивает качество каждого решения по установленным критериям, таким как длина маршрута, время в пути или затраты энергии. В задачах маршрутизации часто в качестве показателя приспособленности используется общее расстояние маршрута.

Формула для оценки приспособленности [4]:

$$f(X) = \sum_{i=1}^{n-1} d(x_i, x_{i+1}),$$

где  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$  — маршрут,  $d(x_i, x_{i+1})$  — расстояние между точками  $x_i$  и  $x_{i+1}$

Селекция отбирает особей для размножения, основываясь на их адаптивности. Один из популярных подходов — это турнирная селекция, при которой случайным образом выбирается несколько особей и наиболее подходящая из них включается в группу родителей.

Пример турнирной селекции:

1. Выбираются случайные индивиды:  $ind_1, ind_2, ind_3$ .

2. Оценивается их приспособленность:  $f(ind_1), f(ind_2), f(ind_3)$ .

3. Лучший индивид добавляется в набор родителей.

Кроссинговер объединяет фрагменты двух родительских хромосом для формирования новых организмов. Один из способов этого процесса — одноточечный кроссинговер, при котором случайным образом выбирается одна точка разрыва и происходит обмен частями хромосом.

Пример одноточечного кроссинговера:

Родители:  $[A, B, C|D, E]$  и  $[V, W, X|Y, Z]$ .

Дети:  $[A, B, C|Y, Z]$  и  $[V, W, X|D, E]$ .

Мутация случайным образом изменяет некоторые части хромосом для поддержания генетического разнообразия. Один из методов мутации — инверсия, где случайно выбранный сегмент хромосомы переворачивается.

Пример мутации инверсии:

Исходная хромосома:  $[A, B, C, D, E]$

Мутированная хромосома:  $[A, D, C, B, E]$

Рассмотрим пример задачи коммивояжера, где необходимо найти кратчайший маршрут, проходящий через заданное количество маршрутных точек. Для этого применим генетический алгоритм, который состоит из следующих шагов:

1. *Инициализация*: создание начальной популяции из случайных маршрутов.

2. *Оценка приспособленности*: вычисление суммарного расстояния для каждого маршрута.

3. *Селекция*: выбор лучших маршрутов для воспроизводства.

4. *Кроссинговер*: комбинирование части выбранных маршрутов для создания новых.

5. *Мутация*: случайное изменение некоторых маршрутов.

6. *Замена*: обновление популяции новыми маршрутами.

7. *Итерация*: повторение процесса до достижения оптимального маршрута.

Генетические алгоритмы являются эффективным и адаптивным средством для решения задач маршрутизации. Они основываются на принципах естественного отбора с применением таких механизмов, как наследование, мутация, селекция

и кроссинговер для поиска наилучших решений. Хотя у них есть некоторые недостатки, такие как высокая вычислительная сложность и необходимость в настройке параметров, генетические алгоритмы находят успешное применение в различных сферах, включая логистику, транспорт и автономные системы.

Пример генетического алгоритма для маршрутизации БПЛА.

Дано:

1. Заранее определенные ключевые точки, которые БПЛА должен пройти, или точки, которые нужно облететь.

2. Окружающая среда, включающая препятствия, которые необходимо избегать (здания, деревья и т.д.).

3. Набор возможных маршрутов, каждый из которых представлен как хромосома (список точек).

4. Фитнес-функция, определяющая качество каждого маршрута, основываясь на его длине и штрафах за приближение к препятствиям.

5. Операторы генетического алгоритма (селекция, кроссовер, мутация).

Найти:

1. Оптимальный маршрут для БПЛА.

2. Лучший маршрут среди популяции, который будет отвечать условиям фитнес-функции.

```
def genetic_algorithm ():
```

```
# 1. Инициализация
```

```
population = initialize_population()
```

```
for generation in range (MAX_GENERATIONS):
```

```
# 2. Оценка фитнеса
```

```
fitness_scores = evaluate_fitness (population)
```

```
# 3. Селекция
```

```
selected_routes = selection (population, fitness_scores)
```

```
# 4. Кроссовер
```

```
new_population = crossover (selected_routes)
```

```
# 5. Мутация
```

```
new_population = mutate(new_population)
```

```
# 6. Оценка новой популяции
```

```
population = new_population
```

```
# 7. Проверка условий завершения
```

```
if stop_condition_met(fitness_scores):
```

```
break
```

```
# Возвращаем лучший маршрут
```

```
return get_best_route(population, fitness_scores)
```

```
# Пример фитнес-функции
```

```
def evaluate_fitness(route):
```

```
return 1 / (route_length(route) + penalty_for_obstacles(route))
```

Для каждого маршрута в популяции вычисляется его фитнес-функция, которая определяет, насколько эффективен маршрут. Обычно в качестве фитнес-функции используется минимизация длины маршрута с учетом избегания препятствий и энергетических затрат на выполнение полета.

Фитнес-функция:

$$f(route) = \frac{1}{L(route) + P_{avoid}(route)},$$

где  $L(route)$  — общая длина маршрута,  $P_{avoid}(route)$  — штраф за приближение к препятствиям (например, если маршрут близок к препятствиям, фитнес уменьшается).

## Системы и алгоритмы избегания препятствий

Реактивное управление и предотвращение столкновений с препятствиями играют ключевую роль в маршрутизации беспилотных летательных аппаратов. Алгоритмы локального планирования дают возможность адаптировать маршрут в зависимости от актуальных условий и избегать столкновений с различными преградами.

Сила избегания препятствия при планировании маршрута БПЛА обычно рассчитывается с использованием алгоритмов искусственных потенциальных полей. В этом подходе пространство вокруг БПЛА рассматривается как поле, в котором препятствия создают отталкивающие потенциальные поля, а цель — притягивающее потенциальное поле. Сила, действующая на БПЛА, является градиентом создаваемого потенциального поля.

Базовая формула для расчета силы избегания препятствий  $F_{avoid}$ , возникающей из потенциала  $U_{avoid}$ , создаваемого препятствием, выглядит следующим образом [5]:

$$F_{avoid} = -\nabla U_{avoid},$$

где  $\nabla U_{avoid}$  — градиент потенциальной энергии, связанной с препятствием.

Градиент указывает направление наибольшего возрастания потенциала и определяется как:

$$U_{avoid} = \frac{1}{2} k_{avoid} \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{D_0} \right)^2,$$

где  $k_{avoid}$  — коэффициент, определяющий величину отталкивания,  $d$  — текущее расстояние до препятствия,  $D_0$  — пороговое расстояние, на котором начинает действовать сила.

Таким образом, сила избегания препятствия направлена в сторону, противоположную градиенту потенциала, и возрастает по мере приближения к препятствию.

Системы предотвращения столкновений для беспилотных летательных аппаратов должны гарантировать выявление препятствий и изменение маршрута полета в режиме реального времени. Для достижения этой цели применяются разнообразные датчики и сенсоры, включая камеры, лидары, ультразвуковые и инфракрасные устройства, а также системы GPS и инерциальной навигации (INS) [5].

Датчики и сенсоры, применяемые для оценки маршрутов:

1. *Камеры*: обеспечивают визуальную информацию об окружающей среде и используются для обнаружения и классификации препятствий с помощью алгоритмов компьютерного зрения.

2. *Лидары*: лазерные дальнометры, создающие трехмерную карту окружающей среды, что позволяет точно определять расстояние до объектов.

3. *Ультразвуковые датчики*: измеряют расстояние до ближайших объектов, используя звуковые волны. Они особенно эффективны на коротких дистанциях.

4. *Инфракрасные датчики*: используют инфракрасное излучение для обнаружения объектов, что особенно полезно в условиях низкой освещенности.

Для безопасного и эффективного полета БПЛА требуется наличие систем, способных избегать препятствия. Эти системы должны в реальном времени выявлять преграды и корректировать маршру-

т движения. Синергия этих систем обеспечивает надежное управление и предотвращение столкновений в различных условиях [6].

*Алгоритм избегания препятствий на основе потенциалов*

Алгоритм на основе потенциалов воспринимает пространство как поле потенциальной энергии, в котором цель притягивает беспилотный летательный аппарат, а преграды отталкивают его. Главная концепция заключается в формировании искусственного силового поля, которое направляет БПЛА к цели, одновременно предотвращая столкновения с препятствиями. Формула потенциального поля [7]:

$$F = F_{аттракция} + F_{репульсия},$$

где  $F_{аттракция}$  — сила притяжения к цели, а  $F_{репульсия}$  — сила отталкивания от препятствий.

Алгоритм на основе потенциалов представляет собой эффективное средство для организации маршрутов и навигации беспилотных летательных аппаратов, особенно когда имеются ограничения по вычислительным ресурсам и необходима высокая плавность перемещения [7].

### Алгоритм обхода препятствий в реальном времени RRT

Алгоритм RRT (Rapidly-exploring Random Tree) создает дерево потенциальных маршрутов от стартовой позиции к цели, случайным образом создавая новые точки и проверяя их на наличие преград. Это дает возможность эффективно определять пути в сложных и изменяющихся условиях.

Основные шаги алгоритма RRT:

1. Генерация случайной точки в пространстве.
2. Нахождение ближайшей вершины дерева и создание нового ребра к случайной точке.
3. Проверка на столкновение с препятствиями и добавление новой точки в дерево, если путь безопасен.
4. Повторение процесса до достижения цели.

Алгоритм RRT является мощным инструментом для разработки маршрутов беспилотных летательных аппаратов в сложных и изменяющихся условиях. Его способность быстро находить пути делает его особенно ценным для задач, где необходима

быстрая реакция на изменения в окружающей среде. Тем не менее для эффективного применения RRT в реальных условиях часто требуются его адаптация и сочетание с другими методами планирования, чтобы преодолеть такие проблемы, как неоптимальные маршруты и значительная нагрузка на вычислительные мощности [8].

#### *Воксельные карты*

Воксельная карта — это трехмерная сетка, в которой каждая ячейка (воксель) может быть либо занята, либо свободна. Такой подход позволяет эффективно обрабатывать данные о препятствиях и разрабатывать безопасные маршруты [9].

Процесс построения воксельной карты включает несколько этапов:

1. *Сбор данных:* с помощью датчиков, таких как лидары, камеры, ультразвуковые и инфракрасные сенсоры, собираются данные об окружающей среде.

2. *Обработка данных:* полученные данные обрабатываются для выделения объектов и определения их положения в пространстве.

3. *Заполнение воксельной карты:* каждая ячейка воксельной карты заполняется информацией о состоянии (занята или свободна) на основе обработанных данных.

Использование трехмерного представления окружающей среды с помощью вокселей способствует эффективному моделированию сложных пространств, позволяя учитывать препятствия и де-

тализовать маршруты. Воксельные карты значительно повышают точность и надежность полетов беспилотников, особенно в условиях ограниченной видимости и сложного рельефа. В сочетании с современными алгоритмами планирования и датчиками воксельные карты обеспечивают высокий уровень автономности и безопасности для БПЛА.

#### **Алгоритм локализации и картографирования SLAM**

Одновременная локализация и картографирование (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM) — это метод, который позволяет одновременно создавать карту окружающей среды и определять местоположение беспилотного летательного аппарата на этой карте. Воксельные карты являются важным элементом SLAM, так как они обеспечивают точные данные о пространстве и препятствиях [10].

Главная проблема SLAM заключается в том, что для создания карты необходимо точно знать местоположение БПЛА, а для определения этого местоположения требуется наличие точной карты. Этот процесс требует использования методов, которые могут исправлять ошибки, возникающие во время локализации и картографирования. Основные компоненты SLAM:

1. Для реализации SLAM на БПЛА используются различные типы сенсоров, такие как камеры,

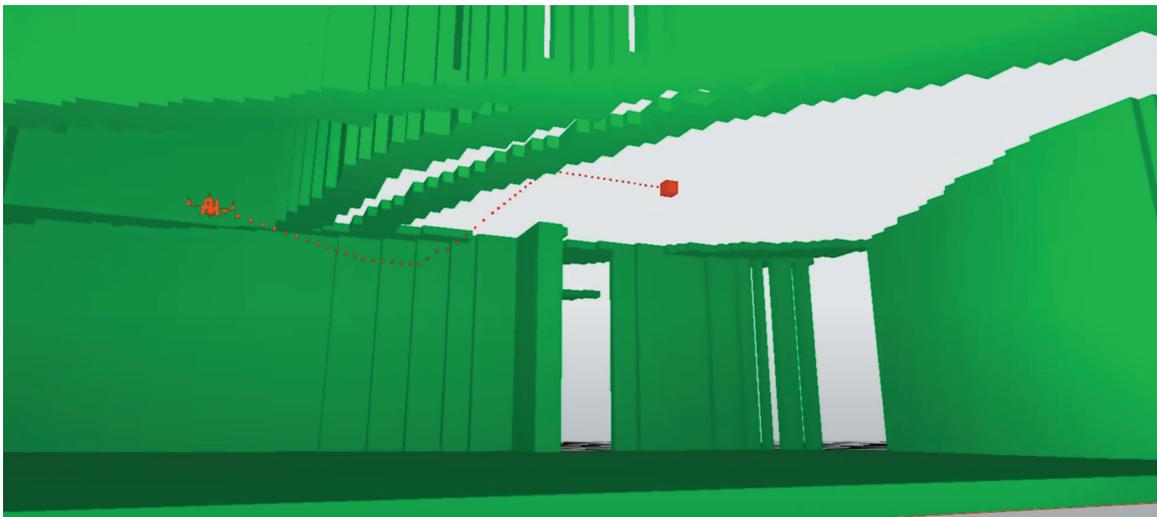


Рис. 4. Пример использования воксельной карты

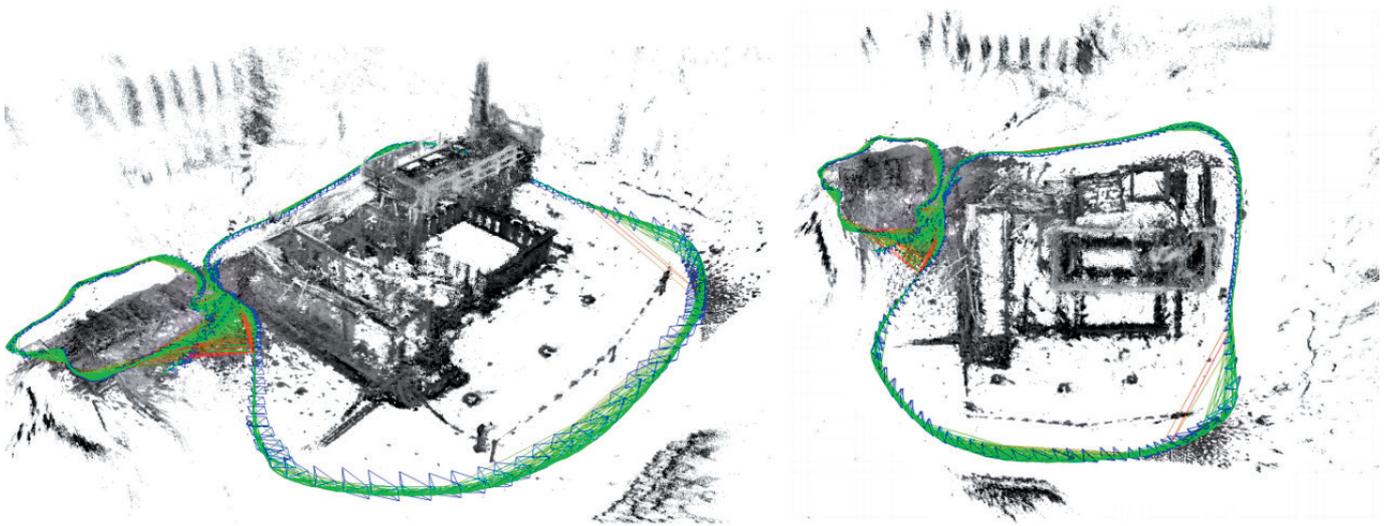


Рис. 5. Пример использования воксельной карты и метода SLAM

лидары, ультразвуковые и инфракрасные датчики. Эти сенсоры собирают данные об окружающей среде, которые затем обрабатываются для создания карты и определения местоположения [11].

2. Для работы с шумными и неполными данными, полученными от сенсоров, используются алгоритмы фильтрации, такие как Калмановский фильтр, расширенный Калмановский фильтр (Extended Kalman Filter — EKF) и фильтр частиц. Эти методы позволяют предсказывать движение БПЛА и корректировать его положение на основе новых данных.

3. Система SLAM должна уметь распознавать и сопоставлять особенности окружающей среды, такие как углы зданий, деревья или другие уникальные объекты, для корректной привязки карты к реальному миру.

4. Построение карты заключается в создании модели окружающей среды на основе данных, собранных с сенсоров. Это может быть двухмерная (2D) или трехмерная (3D) карта, в зависимости от сложности задачи и типа среды.

5. После получения данных и построения начальной карты проводится оптимизация, которая минимизирует ошибки и корректирует как карту, так и местоположение БПЛА.

SLAM представляет собой основополагающую технологию для автономной навигации беспилотных летательных аппаратов, позволяя одновре-

менно создавать карту окружающей среды и определять свое местоположение в режиме реального времени. Прогресс в разработке алгоритмов SLAM открывает новые горизонты для использования БПЛА в сложных и изменяющихся условиях, где классические методы навигации оказываются неэффективными [12].

### Заключение

В статье рассмотрены ключевые алгоритмы и подходы, применяемые для перемещения БПЛА по заранее определенным маршрутным точкам. С учетом современных тенденций в развитии технологий БПЛА становятся все более важными в различных сферах, таких как логистика, экологический мониторинг и поисково-спасательные операции. Для эффективного выполнения этих задач требуется обеспечить надежное и точное перемещение аппаратов по заданному маршруту, используя современные алгоритмы планирования и навигации.

Одной из основных задач организации перемещения БПЛА является обеспечение точности и безопасности их полетов. Это достигается благодаря применению различных систем позиционирования, таких как GPS и INS, а также сенсорных технологий для обнаружения и обхода препятствий. Важно подчеркнуть необходимость разработки и внедрения интеллектуальных

алгоритмов маршрутизации, которые способны адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды, учитывать как динамические, так и статические препятствия, а также эффективно использовать ограниченные вычислительные мощности БПЛА.

В частности, в статье кратко рассмотрены генетические алгоритмы, алгоритм RRT, алгоритм на основе потенциалов, алгоритм A\*, воксельные карты и алгоритмы SLAM для моделирования окружающей среды и планирования маршрутов в трехмерном пространстве.

Таким образом, успешное перемещение БПЛА по заданным точкам требует комплексного подхода, который включает в себя точное позиционирование, надежные алгоритмы маршрутизации

и использование сенсорных данных для предотвращения столкновений.

Одним из направлений дальнейших исследований является разработка алгоритмов автоматической навигации и управления, которые позволят БПЛА безопасно и эффективно выполнять заданные маршруты [13, 14]. Еще одним важным аспектом исследований является разработка системы обнаружения и обхода препятствий на пути движения БПЛА, что потенциально позволит уменьшить риск столкновения и повысить безопасность полетов [15, 16]. Кроме того, исследования в области оптимизации маршрутов [17, 18] и управления энергопотреблением БПЛА [19–21] могут улучшить эффективность и экономичность использования этих технологий.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Elmeseiry N., Alshaer N., Ismail T. A. Detailed Survey and Future Directions of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) with Potential Applications // *Aerospace Engineering*. 2021. Vol. 8, iss. 12. No. 363. 29 p. DOI: 10.3390/aerospace8120363
2. Groves P. D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. Second Edition. Norwood (MA): Artech House, 2013. 776 p.
3. Roberge V., Tarbouchi M., Labonte G. Comparison of Parallel Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization for Real-Time UAV Path Planning // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2013. Vol. 9, iss. 1. Pp. 132–141. DOI: 10.1109/TII.2012.2198665
4. Лего Т., Фомичев А. В., Лю Я. Решение задачи планирования полета малогабаритного беспилотного летательного аппарата в условиях городской среды // *Автоматизация. Современные технологии*. 2015. № 7. С. 19–24.
5. Kuwata Y. Real-Time Trajectory Design for Unmanned Aerial Vehicles Using Receding Horizon Control: A Thesis for the Degree of Master of Science in Aeronautics and Astronautics. Massachusetts Institute of Technology, 2003. 151 p. URL: <http://www.researchgate.net/publication/242403825> (assessed: 19.08.2024).
6. Ristić-Durrant D., Franke M., Michels K. A Review of Vision-Based On-Board Obstacle Detection and Distance Estimation in Railways // *Sensors*. 2021. Vol. 21, iss. 10. No. 3452. 30 p. DOI: 10.3390/s21103452
7. Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicles: A Review / F. Ahmed [et al.] // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2022. Vol. 47, iss. 7. Pp. 7963–7984. DOI: 10.1007/s13369-022-06738-0
8. UAV Path Planning Based on Improved A\* and DWA Algorithms / X. Bai [et al.] // *International Journal of Aerospace Engineering*. 2021. Vol. 2021. No. 4511252. 12 p. DOI: 10.1155/2021/4511252
9. Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age / C. Cadena [et al.] // *IEEE Transactions on Robotics*. 2016. Vol. 32, iss. 6. Pp. 1309–1332. DOI: 10.1109/TRO.2016.2624754
10. Ubina N. A., Cheng S.-C. A Review of Unmanned System Technologies with Its Application to Aquaculture Farm Monitoring and Management // *Drones*. 2022, Vol. 6, iss. 1. Art. 12. 41 p. DOI: 10.3390/drones6010012
11. Visual SLAM for Unmanned Aerial Vehicles: Localization and Perception / L. Zhuang [et al.] // *Sensors*. 2024. Vol. 24, iss. 10. Art. 2980. 24 p. DOI: 10.3390/s24102980
12. Алагорцев Д. В., Хамухин А. В. Анализ эффективных методов оценки дальности и алгоритмов обработки видеoinформации на БПЛА // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2020. Вып. 12. С. 255–261.

13. Али Б., Садеков Р. Н., Цодокова В. В. Алгоритмы навигации беспилотных летательных аппаратов с использованием систем технического зрения // *Гироскопия и навигация*. 2022. Т. 30, № 4 (119). С. 87–105. DOI: 10.17285/0869-7035.00105
14. Хомоненко А. Д., Яковлев Е. Л. Обоснование архитектуры сверточной нейронной сети для автономного распознавания объектов на изображениях бортовой вычислительной системой // *Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли*. 2018. Т. 10, № 6. С. 86–93. DOI: 10.24411/2409-5419-2018-10190
15. A Review on IoT Deep Learning UAV Systems for Autonomous Obstacle Detection and Collision Avoidance / P. Fraga-Lamas [et al.] // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, iss. 18. Art. 2144. 29 p. DOI: 10.3390/rs11182144
16. Новиков П. А., Хомоненко А. Д., Яковлев Е. Л. Комплекс программ для навигации мобильных устройств внутри помещений с помощью нейронных сетей // *Информационно-управляющие системы*. 2016. № 1 (80). С. 32–39. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2016.1.32
17. Способ построения «субоптимальных» маршрутов мониторинга разнотипных источников беспилотным летательным аппаратом / А. В. Тимошенко [и др.] // *Труды МАИ*. 2020. № 111. 18 с. DOI: 10.34759/trd-2020-111-10
18. Improved Artificial Bee Colony Algorithm-Based Path Planning of Unmanned Autonomous Helicopter Using Multi-Strategy Evolutionary Learning / Z. Han [et al.] // *Aerospace Science and Technology*. 2022. Vol. 122. Art. 7374. 17 p. DOI: 10.1016/j.ast.2022.107374
19. Energy-Efficient UAV-Assisted Mobile Edge Computing: Resource Allocation and Trajectory Optimization / M. Li [et al.] // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2020. Vol. 69, iss. 3. Pp. 3424–3438. DOI: 10.1109/TVT.2020.2968343
20. Energy-Efficient Trajectory Optimization for UAV-Assisted IoT Networks / L. Zhang [et al.] // *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2021. Vol. 21, iss. 12. Pp. 4323–4337. DOI: 10.1109/TMC.2021.3075083
21. Resource Allocation and Trajectory Optimization for QoE Provisioning in Energy-Efficient UAV-Enabled Wireless Networks / F. Zeng [et al.] // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2020. Vol. 69, iss. 7. Pp. 7634–7647. DOI: 10.1109/TVT.2020.2986776

Дата поступления: 25.08.2024

Решение о публикации: 16.09.2024

## Technologies and Methods for Planning the Movement of UAVs Along Waypoints

**Ilya D. Lipanov**<sup>1</sup> — Graduate student at the Department of Information and Computing systems.  
E-mail: illipanov@mail.ru

**Anatoly D. Khomonenko**<sup>1,2</sup> — Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Information and Computing systems; Professor of the Department of Mathematics and Software.  
E-mail: khomonenko@pgups.ru

<sup>1</sup> Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

<sup>2</sup> Mozhaisky Military Aerospace Academy, 13, Zhdanovskaya str., St. Petersburg, 197198, Russia

**For citation:** Lipanov I. D., Khomonenko A. D. Technologies and Methods for Planning the Movement of UAVs Along Waypoints // *Intellectual Technologies on Transport*. 2024. № 3 (39). Pp. 30–43. DOI: 10.20295/2413-2527-2024-339-30-43. (In Russian)

**Abstract.** Unmanned aerial vehicles (UAVs) occupy a special place in our world. Their ability to navigate along set routes opens up prospects in various fields. **The purpose of the study** is to review and analyze navigation systems and UAV routing algorithms, methods that allow UAVs to follow the route with high accuracy. GPS and inertial navigation (INS) systems that provide accurate location determination are being investigated. The capabilities of sensor systems — cameras, lidars and ultrasonic sensors — are analyzed to detect obstacles and adjust the trajectory; voxel maps for three-dimensional modeling of the environment and methods of simultaneous localization and mapping (SLAM); algorithm  $A^*$  (*A-star*); genetic routing algorithm, potential-based obstacle avoidance algorithms and RRT. **Practical significance:** the use of these methods and technologies can significantly improve the safety and accuracy of UAV routing, the ability to navigate autonomously in complex and dynamically changing landscapes. In conclusion, the advantages and limitations of navigation approaches and technologies **are discussed**; the importance of integrating sensor systems and SLAM methods to increase the autonomy and efficiency of UAVs; directions for further research.

**Keywords:** UAV routing, GPS, INS, SLAM, ADS-B, voxel maps, sensor systems, genetic algorithm, RRT algorithm

## REFERENCES

1. Elmeseiry N., Alshaer N., Ismail T. A. Detailed Survey and Future Directions of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) with Potential Applications // *Aerospace Engineering*. 2021. Vol. 8, iss. 12. No. 363. 29 p. DOI: 10.3390/aerospace8120363
2. Groves P. D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. Second Edition. Norwood (MA): Artech House, 2013. 776 p.
3. Roberge V., Tarbouchi M., Labonte G. Comparison of Parallel Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization for Real-Time UAV Path Planning // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2013. Vol. 9, iss. 1. Pp. 132–141. DOI: 10.1109/TII.2012.2198665
4. Lego T., Fomichev A. V., Lyu YA. Reshenie zadachi planirovaniya poleta malogabaritnogo bespilotnogo letatel'nogo apparata v usloviyah gorodskoj srede // *Avtomatizaciya. Sovremennye tekhnologii*. 2015. № 7. S. 19–24.5.
5. Kuwata Y. Real-Time Trajectory Design for Unmanned Aerial Vehicles Using Receding Horizon Control: A Thesis for the Degree of Master of Science in Aeronautics and Astronautics. Massachusetts Institute of Technology, 2003. 151 p. URL: <http://www.researchgate.net/publication/242403825> (assessed: 19.08.2024).
6. Ristić-Durrant D., Franke M., Michels K. A Review of Vision-Based On-Board Obstacle Detection and Distance Estimation in Railways // *Sensors*. 2021. Vol. 21, iss. 10. No. 3452. 30 p. DOI: 10.3390/s21103452
7. Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicles: A Review / F. Ahmed [et al.] // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2022. Vol. 47, iss. 7. Pp. 7963–7984. DOI: 10.1007/s13369-022-06738-0
8. UAV Path Planning Based on Improved  $A^*$  and DWA Algorithms / X. Bai [et al.] // *International Journal of Aerospace Engineering*. 2021. Vol. 2021. No. 4511252. 12 p. DOI: 10.1155/2021/4511252
9. Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age / C. Cadena [et al.] // *IEEE Transactions on Robotics*. 2016. Vol. 32, iss. 6. Pp. 1309–1332. DOI: 10.1109/TRO.2016.2624754
10. Ubina N. A., Cheng S.-C. A Review of Unmanned System Technologies with Its Application to Aquaculture Farm Monitoring and Management // *Drones*. 2022, Vol. 6, iss. 1. Art. 12. 41 p. DOI: 10.3390/drones6010012
11. Visual SLAM for Unmanned Aerial Vehicles: Localization and Perception / L. Zhuang [et al.] // *Sensors*. 2024. Vol. 24, iss. 10. Art. 2980. 24 p. DOI: 10.3390/s24102980
12. Alatorcev D. V., Hamuhin A. V. Analiz effektivnyh metodov ocenki dal'nosti i algoritmov obrabotki videoinformacii na BPLA // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2020. Vyp. 12. S. 255–261. (In Russian)
13. Ali B., Sadekov R. N., Codokova V. V. Algoritmy navigacii bespilotnyh letatel'nyh apparatov s ispol'zovaniem sistem tekhnicheskogo zreniya // *Giroskopiya i navigaciya*. 2022. T. 30, № 4 (119). С. 87–105. DOI: 10.17285/0869-7035.00105 (In Russian)

14. Khomonenko A. D., Yakovlev E. L. Obosnovanie arhitektury svertochnoj nejronnoj seti dlya avtonomnogo raspoznaniya ob'ektov na izobrazheniyah bortovoj vychislitel'noj sistemoj // Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyah Zemli. 2018. T. 10, № 6. S. 86–93. DOI: 10.24411/2409-5419-2018-10190 (In Russian)
15. A Review on IoT Deep Learning UAV Systems for Autonomous Obstacle Detection and Collision Avoidance / P. Fraga-Lamas [et al.] // Remote Sensing. 2019. Vol. 11, iss. 18. 2144. 29 p. DOI: 10.3390/rs11182144
16. Novikov P. A., Khomonenko A. D., Yakovlev E. L. Kompleks programm dlya navigacii mobil'nyh ustrojstv vnutri pomeshchenij s pomoshch'yu nejronnyh setej // Informacionno-upravlyayushchie sistemy. 2016. № 1 (80). S. 32–39. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2016.1.32 (In Russian)
17. Sposob postroeniya “suboptimal'nyh” marshrutov monitoringa raznotipnyh istochnikov bespilotnym letatel'nyim apparatom / A. V. Timoshenko [i dr.]. // Trudy MAI. 2020. № 111. 18 c. DOI: 10.34759/trd-2020-111-10 (In Russian)
18. Improved Artificial Bee Colony Algorithm-Based Path Planning of Unmanned Autonomous Helicopter Using Multi-Strategy Evolutionary Learning / Z. Han [et al.] // Aerospace Science and Technology. 2022. Vol. 122. Art. 7374. 17 p. DOI: 10.1016/j.ast.2022.107374
19. Energy-Efficient UAV-Assisted Mobile Edge Computing: Resource Allocation and Trajectory Optimization / M. Li [et al.] // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2020. Vol. 69, iss. 3. Pp. 3424–3438. DOI: 10.1109/TVT.2020.2968343
20. Energy-Efficient Trajectory Optimization for UAV-Assisted IoT Networks / L. Zhang [et al.] // IEEE Transactions on Mobile Computing. 2021. Vol. 21, iss. 12. Pp. 4323–4337. DOI: 10.1109/TMC.2021.3075083
21. Resource Allocation and Trajectory Optimization for QoE Provisioning in Energy-Efficient UAV-Enabled Wireless Networks / F. Zeng [et al.] // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2020. Vol. 69, iss. 7. Pp. 7634–7647. DOI: 10.1109/TVT.2020.2986776

Received: 25.08.2024

Accepted: 16.09.2024