



УДК 004.896:629.735.33:631.3

МРНТИ 27.35.15:28.23.19:29.19.15

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_37_2_7

К.О. Якунин^{1,2}, А. Сымагулов^{1,2}, Р.И. Мухамедиев^{1,2}, Н.Р. Юничева^{2*,3}

¹КазННТУ им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

²Институт информационных и вычислительных технологий КН МНВО РК, Алматы, Казахстан

³Алматинский Университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, Алматы, Казахстан

²E-mail: naduni@mail.ru*

ПЛАНИРОВАНИЕ МАРШРУТОВ ОБЛЕТА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Аннотация. В работе предложен алгоритм планирования маршрутов облёта сельскохозяйственных полей с препятствиями для решения задач точного земледелия. Алгоритм можно применять как в задачах обработки, так и в задачах мониторинга полей. В отличие от классических методов, которые ограничиваются простым зигзагообразным обходом (Zamboni) и элементарным обходом препятствий по периметру, данный алгоритм учитывает наличие парка разнородных беспилотных летательных аппаратов (разного типа, дальности, стоимости, скорости) и движущейся наземной платформы, обеспечивающей энергией и необходимыми ресурсами процесс выполнения облёта. Взлёт и посадка дронов осуществляется в различных точках вдоль дороги, которая обычно огибает поле. Ключевым нововведением является двухэтапная процедура оптимизации: сначала формируется случайный набор разбиений поля на несколько подмножеств с заданными долями площади (учитывая внутренние препятствия), а затем, для оптимального варианта разбиения, запускается генетический алгоритм, оптимизирующий параметры облёта (угол пролёта, точку входа, состав и порядок запуска дронов и маршрут платформы). Оптимизация достигается за счёт более локализованного обхода отдельных частей поля (каждый участок обслуживается подходящим типом дрона), а также гибкого перемещения наземной платформы, сокращающей бесполезные перелёты. Численные эксперименты показывают, что в зависимости от размера препятствия и размера поля достигается сокращение стоимости облётов на 12-15%. В заключительной части статьи обсуждаются перспективы развития решения, включая учёт трёхмерного рельефа, динамических факторов (изменение погодных условий, остановка дрона по техническим причинам) и автоматическое предотвращение коллизий на пересекающихся участках маршрутов.

Ключевые слова: Алгоритм покрытия, беспилотные летательные аппараты, генетический алгоритм, планирование полетов, искусственный интеллект.

Введение.

Современные технологии «точного земледелия» (Precision Agriculture) базируются на принципе дифференцированного подхода к выращиванию и обслуживанию

сельскохозяйственных культур. В отличие от традиционных методов, когда удобрения, гербициды или другие агротехнические средства вносились сплошным методом по всему полю, точное земледелие предполагает сбор детальных данных о состоянии каждой части поля (например, с помощью оптических, тепловых или мультиспектральных сенсоров на беспилотных летательных аппаратах — БПЛА) и принятие решений по локальному внесению ресурсов. Так повышается эффективность использования удобрений и химикатов, сокращается негативное влияние на почву, а также оптимизируется расход энергоресурсов. Однако для максимально эффективного сбора данных, а также для целенаправленного внесения веществ, важно спланировать маршруты полётов беспилотников так, чтобы они «покрыли» (то есть пролетели над) все необходимые участки поля с нужным перекрытием. Задача Coverage Path Planning (CPP) в контексте точного земледелия может иметь ряд сложностей:

1. Сложная форма полей. Поля не всегда имеют прямоугольную или близкую к этому форму. Зачастую наблюдается неконвексность (выпуклые «вырезы») или иные геометрические особенности.

2. Наличие препятствий внутри поля, которые по различным причинам недоступны для пролёта или не требуют обработки (озёра, скалы, высокие лесополосы, хозяйственные дворы). Также в качестве препятствий могут рассматриваться участки, которые необходимо исключить из зоны покрытия (например, не требующие распыления гербицидов). В данной работе под «препятствиями» понимаются зоны в границах поля, которые нужно полностью исключить из маршрутов — либо потому что там невозможно или нецелесообразно лететь.

3. Разнородность парка БПЛА. В хозяйстве могут присутствовать разные модели дронов (мультикоптеры, вертолётного типа, самолётного типа), отличающиеся по дальности, скорости, стоимости эксплуатации, грузоподъёмности и т.д.

4. Использование наземной платформы (трактор, грузовик, пикап), которая перемещается вдоль дороги у кромки поля или пересекает его по возможным путям. Такая платформа даёт возможность более эффективной логистики: дроны могут взлетать и приземляться не в одной-единственной точке, а в разных местах вдоль дороги, сокращая общий пробег дронов и время возврата для смены аккумуляторов или заправки.

Чтобы объединить все эти аспекты, необходимо комплексное решение, позволяющее:

- Учесть геометрию: сложную форму поля и препятствия.
- Оптимально распределять задействованные БПЛА (с их неодинаковыми характеристиками).
- Оптимально прокладывать маршрут наземной платформы (или набор остановок) для минимизации общего времени миссии.
- Снижать стоимость и время (две ключевые метрики): где стоимость — это совокупность расходов на износ БПЛА, их амортизацию, зарплату персоналу, а время — длительность всей операции, обычно ограниченная рабочим днём или погодным окном.

Нужно отметить, что задача планирования пути привлекает большое внимание исследователей [1, 2]. Поскольку большое число приложений БПЛА связано с задачами мониторинга, то одной из популярных задач планирования является задача планирования покрытия некоторой территории (coverage path planning) [3-6]. Для решения этой задачи при тех или иных ограничивающих условиях применяют алгоритмы мягкого искусственного интеллекта [7-9]. В данной статье мы предлагается метод, основанный на генетическом алгоритме (ГА) и дополнительном «разбиении» поля (исключая препятствия) на несколько сегментов, каждый с определённой долей общей площади. Этот метод потенциально более гибкий и экономически эффективный, чем простой базовый подход, при котором вся территория (без явного разбиения) обходится стандартным «zamboni»-маршрутом (зигзагом, или «туда-обратно»), а препятствия обводятся по или против часовой стрелки. Далее будет детально разобран базовый подход и какие у него ограничения, а затем представим нашу улучшенную двухэтапную схему.

Материалы и методы исследования.

1. Базовый подход к покрытию: zamboni + обход препятствий

Для понимания вклада предлагаемого метода рассмотрим классический и наиболее прямолинейный вариант решения. Назовём его базовый подход и опишем принцип его работы:

1. Маршрут zamboni (зигзагообразный обход). Поле покрывается параллельными «проходами»: дрон летит по прямолинейному участку, затем совершает поворот и летит в обратном направлении, чуть сместившись относительно предыдущей полосы. Это напоминает, как заливают лёд на хоккейной площадке или как проходят полосы жатки у комбайна. Повороты обычно стараются делать на краях поля.

2. Обход препятствий (против или по часовой стрелке). Если внутри поля есть большая препятствующая зона (например, пруд, лесопосадка), то при классическом подходе дрон формально «вырезает» контур препятствия из своего маршрута, облетая этот контур по или против часовой стрелки, после чего продолжает движение по прямолинейным полосам. Из-за этого маршруты могут содержать длинные манёвры вокруг препятствия, с дополнительными поворотами и пустыми пролётами. Фактически каждая встреча с препятствием может превращать одиночную прямую полосу в три-четыре отдельных фрагмента.

3. Единый дрон или несколько однотипных. Чаще всего задача СРР предполагает использование одного или нескольких однотипных дронов (считается, что все имеют одинаковые характеристики), взлетающих из одной точки. При необходимости дополнительной заправки (зарядки) дрон возвращается обратно туда же, затем продолжает маршрут с места прерывания.

4. Без оптимизации маршрута наземной платформы. В существующих работах не учитывается возможность использования мобильной платформы. Либо предполагается, что платформа стоит в одной точке (или вообще отсутствует), поэтому нет механизма сокращения пути дрона за счёт передвижения платформы к точкам, где дрон нуждается в посадке.

Основным недостатком такого подхода является отсутствие гибкости при облёте препятствий – в зависимости от выбора константного угла построения Zamboni маршрута, все препятствия вне зависимости от положения и формы будут обходить в одинаковом направлении. Далее в статье будут рассмотрены ситуации, в которых такой подход не позволяет получить оптимальный план облёта.

Также ограничением базовых алгоритмов является отсутствие учёта разнородности дронов, а также отсутствие учёта движущейся платформы – подробнее это описано в оригинальной статье [10].

В результате общее время и затраты могут быть субоптимальны, в первую очередь из-за многократного облёта дронами одной и той же территории в процессе выполнения циклов взлётов-посадок, а также за счёт неэффективного облёта препятствий. Впрочем, данный метод прост в реализации — многие коммерческие решения по планированию маршрутов в программном обеспечении для построения маршрутов облётов дронов работают именно так (с минимальным обходом препятствий, либо без возможности указания препятствий).

Данное исследование исходит из гипотезы, что дополнительное разделение поля на подполигоны (где каждый полигон может быть покрыт более эффективно определённым типом дроном/под определённым углом) и продвинутая оптимизация маршрута платформы дают потенциальное улучшение по экономическим показателям. Это особенно актуально для больших и сложных полей.

2. Концепция предложенного расширенного алгоритма

Предлагается алгоритм планирования облёта, основанный на следующих идеях:

1. Разбиение поля (с препятствиями) на несколько долевого зон:

- Поле, имеющее в себе препятствия, можно рассматривать как исходный многоугольник P за вычетом внутренних запрещённых областей (препятствий).
- Вместо того чтобы обходить весь многоугольник одной цепочкой *zamboni*, мы хотим поделить это поле на подмножества $P_1, P_2, \dots, P_m$ так, чтобы они не пересекались и покрывали всё доступное пространство. При этом каждое P_i получает долю площади (например, 30% всей доступной, 20%, 50% и т. д.).
- Смысл такого разбиения: возможно, один участок (подполигон) удобнее облетать дронами самолётного типа (они эффективны на длинных ровных полосах), а другой участок (извилистый, с мелкими фрагментами) — мультикоптерами. Или же может оказаться, что имеет смысл разбить поле на несколько блоков, чтобы минимизировать общее число пролётов вокруг препятствий. Разбиение проводится с помощью библиотеки *rode* [11], реализующей алгоритм из статьи *Polygon Area Decomposition for Multiple-Robot Workspace Division* [12].

2. Двухэтапный оптимизационный подход:

- Одновременная оптимизация деления многоугольника и параметров облёта не представляется возможной, поскольку изменения в делении многоугольника (а значит в форме общего зигзага) в общем случае могут приводить к тому, что оптимальные параметры облёта станут неоптимальными. Таким образом, эти два компонента должны оптимизироваться отдельно. Пространство возможных нарезок многоугольника является непрерывным с огромным количеством возможных вариаций, то есть дискретный подход с отдельной оптимизацией параметров облёта под каждый возможный вариант нарезки многоугольника вычислительно очень дорог. Следовательно, предлагается двухэтапный подход к оптимизации:

- На первом шаге генерируется множество различных способов долевого разбиения (каждый способ задаётся вектором площадей, суммирующихся до 1). Для каждого способа оценивается его предварительная экономическую эффективность через набор случайных планов полёта. Исходя из минимальной стоимости облётов выбирается потенциально наиболее оптимальное разбиение.

- На втором шаге (основном) запускается генетический алгоритм: особи (кандидаты решения) кодируют маршруты облёта (включая угол облёта, точку входа, набор дронов, траекторию мобильной платформы), с учётом выбранного во время выполнения первого этапа разбиения многоугольника. Затем, итеративно происходит отбор и смешивания кандидатов, в процессе которого происходит поиск оптимального облёта заданной конфигурации многоугольников, описывающих поле за исключением препятствий.

3. Подробное описание алгоритма

Ниже приводится описание всего процесса. На входе имеем

- Многоугольник поля P ,
- Множество препятствий $\{H_1, H_2, \dots, H_s\}$, каждое $H_i \subset P$,
- Дорога (или набор дорог) D , вдоль которой может перемещаться наземная платформа,
- Множество дронов $L = \{L_1, \dots, L_l\}$ с заданными характеристиками,
- Экономические параметры: ставка пилота (в час и за взлёт), стоимость износа дронов на дистанцию и время и т. п.

Алгоритм:

Вычисляем доступную площадь поля с учётом препятствий:

$$A_{available} = Area(P) - \sum_{i=1}^s Area(H_i)$$

Считаем, что препятствия не пересекаются между собой.

Этап 1 (предварительный поиск лучшего разбиения):

1) Выбираем параметр N — сколько разных векторов разбиения протестировать. Для каждого разбиения требуется получить случайное число m долей, в сумме равных 1.

2) Для n от 1 до N :

- Случайно сгенерировать вектор $r = (r_1, \dots, r_m)$, где $\sum r_i = 1$, m может быть от 1 до некоторого случайного $m_{\max}$.

- Разделить поле (используя библиотеку `rode`) на подмножества $\{P_1, \dots, P_m\}$, где площадь каждого $P_i = r_i \times A_{\text{available}}$.

- Сгенерировать M случайных параметров облёта – угол облёта, стартовая точка, набор и порядок использования дронов, а также точки взлёта и посадки.

- Оценить для каждого плана суммарную стоимость (без использования полноценного ГА).

- Получить целевое значение (среднее + минимум стоимости) по этим M планам.

3) Выбрать разбиение r^* , которое дало наилучшее значение целевого показателя на случайных облётах.

Этап 2 (генетическая оптимизация на базе найденного разбиения):

1) На вход подаётся итоговое r^* .

2) Инициализируем популяцию генетического алгоритма: каждая особь (индивид) кодирует

- θ — угол пролёта ($0..360^\circ$),

- `start_corner` — одна из 4 опций («NW», «NE», «SW», «SE»),

- `dronesList` — упорядоченный набор индексов дронов,

- `carPoints` — упорядоченный набор точек, описываемых число от 0 до 1, где 0 и 1 – края дороги, а дробные значения описывают пропорционально возможные положения на дороге.

- `subPolygonsTraversalOrder` – порядок облёта под-многоугольников из разбиения r^* .

3) Для каждого поколения:

- Декодирование: превращаем особь в реальный маршрут. С учётом `subPolygonsTraversalOrder` и угла θ строим зигзагообразные линии, и проводим симуляцию облёта с помощью дронов `dronesList`, с точками взлёта-посадки из `carPoints`, с стартовой точкой облёта `start_corner`.

- Вычисляем стоимость (расходы на полёты, взлёты, зарплату) и штраф P_{penalty} за избыточное время (если общее время T_{total} оказалось выше заданного порога).

- Отбор (Selection): сортируем особи по целевому показателю (общей стоимости), лучшие особи участвуют в скрещивании.

- Скрещивание (Crossover): случайно выбираем пары особей, обмениваемся фрагментами генома (например, угол, часть списка дронов, и т.д.)

- мутация (Mutation): с некоторой вероятностью меняем угол, переставляем дронов, добавляем или удаляем точку в `carPoints` и т.д.

4) По достижении критерия остановки (достаточное число поколений или стабилизация результата) выбираем особь с лучшим целевым значением. Используем данный маршрут облёта в качестве финального.

4. Псевдокод обобщённого алгоритма

Ниже представлен псевдокод (не привязанный к синтаксису конкретного языка):

ALGORITHM TwoStageGA(P , $Obstacles$, L , $Road$, N , M , $MaxGen$):

1. ComputeAvailableArea:

$A_{\text{avail}} = \text{Area}(P) - \text{SUM}(\text{Area}(H_i) \text{ for each } H_i \text{ in } Obstacles)$

2. $\text{best_score} = +\infty$

$\text{best_partition} = \text{NULL}$

```

3. // ----- STAGE I: SEARCH FOR PARTITION -----
FOR n IN 1..N:
    // Generate a random partition vector r = (r1, ..., rm),
    // sum of r_i = 1, m can vary
    partition_n = DividePolygonWithObstacles(P, Obstacles, r)
    partial_scores = []
    // Evaluate M random "plans"
    FOR test_plan IN 1..M:
        plan = GenerateRandomPlan()
        cost_value = QuickEvaluate(plan, partition_n, Road, L)
        partial_scores.add(cost_value)
    // Combine partial_scores into final metric
    metric_n = SomeFunction(partial_scores) // e.g. average + min
    IF metric_n < best_score:
        best_score = metric_n
        best_partition = partition_n
4. // ----- STAGE II: GENETIC OPTIMIZATION WITH BEST PARTITION -----
GA_population = InitializePopulation()
FOR generation IN 1..MaxGen:
    // Evaluate fitness of each individual:
    FOR individual IN GA_population:
        cost_f = EvaluateCost(individual, best_partition, Road, L)
        individual.fitness = cost_f
    // Selection
    GA_population = SelectBest(GA_population)
    // Crossover
    GA_population = CrossOver(GA_population)
    // Mutation
    GA_population = Mutate(GA_population)
// Get the final best solution
best_individual = FindBest(GA_population)
RETURN best_individual as the final plan.

```

Таким образом, всё алгоритмическое решение укладывается в двухэтапную схему, которая реализует предложенный подход: сначала ищем лучшее разбиение, затем применяем генетический алгоритм.

Результаты и их обсуждение.

В таблице 1 представлены результаты расчётов. Колонки «Простой подход» и «Оптимизация нарезки» содержат лучшую общую стоимость облёта за 25 итераций. Первый столбец показывает результаты для отсутствия разбиения – маршрут строится так, как будто препятствий нет, но динамически происходит уточнение маршрута с обгибанием препятствий по контуру. Второй столбец показывает результаты для предложенного двухэтапного метода. Как можно увидеть, предложенный подход достигает 10 и более процентного преимущества по сравнению с базовым подходом для приведенных полей.

Таблица 1 – Результаты расчётов

Поле					Простой подход	Оптимизаци я разбиения	Время расчёта (с)
Поле 1	–	Большое	препятствие	прямоугольной формы	465.300863	399.7649577	234
Поле 2	–	Большое	препятствие	продолговатой формы	375.7315059	331.2337709	190

олонка «Время расчёт (с)» содержит время расчёта оптимизации на 8-ядерном процессоре потребительского уровня. При этом важно учитывать, что около 110-120 секунд занимает первый этап алгоритма – предварительный поиск наилучшего разбиения. На рисунках 1 и 2 показаны результаты экспериментов для двух полей с отличающейся формой препятствий (Поле 1 и Поле 2).



Рисунок 1 – Результаты расчётов для Поля 1. Слева – базовый подход, справа – предложенный двухэтапный метод

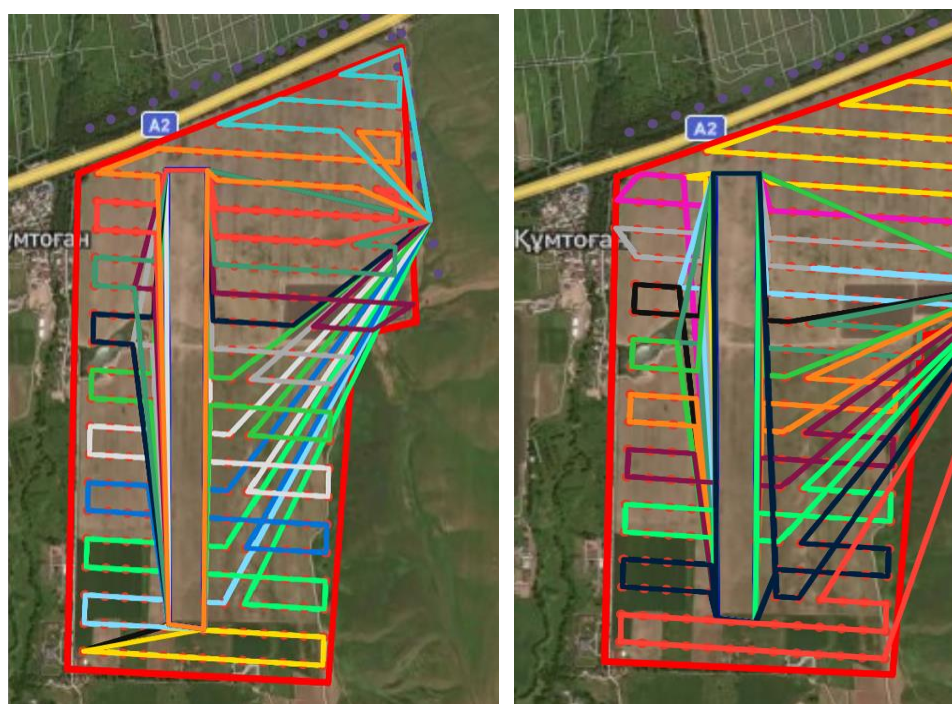


Рисунок 2 – Результаты расчётов для Поля 2. Слева – базовый подход, справа – предложенный двухэтапный метод

Заключение и дальнейшие направления исследования

В данной работе описан алгоритм планирования облёта сельскохозяйственных полей в задаче точного земледелия. Сложность постановки заключается в:

- сложной геометрии поля,
- наличии внутри поля препятствий,
- неоднородном составе доступных БПЛА,
- возможности (и желательности) использовать подвижную наземную платформу.

Предложено двухэтапное решение: (1) поиск оптимального разбиения (долевого) путём быстрого перебора нескольких схем и базовых оценочных планов; (2) полноценная генетическая оптимизация параметров маршрутов, исходя из выбранного разбиения.

Такой подход потенциально, в зависимости от формы, размеры поля, а также размеров и количества препятствий, может давать более оптимальные решения, чем простой алгоритм вида «zamboni + обход препятствий», поскольку избегает больших неоптимальных манёвров внутри общей траектории и даёт много степеней свободы для выбора экономически выгодного способа завершить миссию.

Перспективные направления дальнейших исследований:

- Учёт детального трёхмерного рельефа и перепадов высот (например, когда над лесополосой можно подняться выше, но это требует дополнительных энергозатрат).
- Включение онлайн-коррекции маршрутов в случае изменения условий (погодные факторы, внезапный отказ дрона).
- Исследование коллизионной безопасности, чтобы траектории двух разных дронов не пересекались критично близко друг к другу при параллельном выполнении полётов.

Также одним из ограничений представленной программной реализации является неспособность работы с невыпуклыми препятствиями, ввиду технических особенностей библиотек, реализующих геометрические преобразования и проверки на пересечения.

Благодарность.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23488745 «Оперативная оценка засоленности почвы с применением маловысотных беспилотных летательных платформ (RASS)» и № BR24992908 «Система поддержки агротехнических мероприятий в растениеводстве на базе комплекса средств мониторинга и методов искусственного интеллекта (Agroscope)»).

Список литературы

1. Кумар, К. & Кумар, Н. (2023). Планирование пути с учетом покрытия региона для беспилотных летательных аппаратов: систематический обзор. *Physical Communication*, 59, 102073. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2023.102073>.
2. Хуан, Г. и др. (2023). Совместное назначение миссии для нескольких БПЛА на основе гибридного алгоритма WAFC-RRAS. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.>
3. Мааджи, С. С. & Ланда-Сильва Д. (2023). Планирование пути БПЛА для покрытия области и потребления энергии в среде разведки нефти и газа. На Международной конференции по вычислительной логистике (стр. 467-481). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30351-7_32.
4. Ли Дж. и др. (2023). Метод планирования маршрута покрытия для сельскохозяйственного распыления БПЛА в произвольной многоугольной области. *Аэрокосмическая техника*, 10(9), 755. <https://doi.org/10.3390/aerospace10090755>
5. Чжан, Л. и др. (2023). Планирование пути покрытия с минимальной стоимостью, подходящей для тротуара. В 2023 г. 3-я Международная конференция по информатике, электронной информационной инженерии и интеллектуальным технологиям управления

(CEI) (стр. 801-805). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CEI59349.2023>.

6. Плессен, М. (2024). Планирование пути для точечного опрыскивания с помощью БПЛА, объединяющее TSP и покрытие площади. Препринт arXiv arXiv:2408.08001. <https://arxiv.org/abs/2408.08001>.

7. Ахурака, Ф. и др. (2023). Хаотическое планирование движения для мобильных роботов: прогресс, проблемы и возможности. IEEE Access, 11, 134917-134939. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3234567>.

8. Онлер, Э. (2024). Сравнительный анализ генетического и жадного алгоритмов для планирования оптимального маршрута полета дронов в сельском хозяйстве. Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi, 39(1), 129-142. <https://doi.org/10.7161/omuanajas.2024.39.1.129>.

9. Бине, Л. М. С. и др. (2023). Новое планирование траектории покрытия, вдохновленное колонией муравьев, для интернета дронов. Компьютерные сети, 235, 109963. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109963>

10. Мухамедиев, Р.И., Якунин, К., Аубакиров, М., Асанов, И., Кучин, Ю., Сымагулов, А., Левашенко, В., Зацева, Е., Соколов, Д. & Амиргалиев Ю. (2023). Оптимизация планирования пути покрытия гетерогенной группы БПЛА для точного земледелия. Доступ IEEE, 11(15), 5789-5803. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3235207>.

11. Джорджи, С. (н.д.). PODe: Декомпозиция полигональной области для разделения рабочего пространства нескольких роботов [Компьютерное программное обеспечение]. GitHub. Проверено 15 января 2025 г. с сайта <https://github.com/GeorgySk/pode>

12. Херт, С. & Лумельский В. (1998). Декомпозиция полигональной области для разделения рабочего пространства нескольких роботов. Международный журнал вычислительной геометрии и приложений, 8 (4), 437-466. <https://doi.org/10.1142/S0218195998000230>.

References

1. Kumar, K. & Kumar, N. (2023). Region coverage-aware path planning for unmanned aerial vehicles: A systematic review. Physical Communication, 59, 102073. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2023.102073>.

2. Huang G., et al. (2023). Multi-UAV cooperative mission assignment based on hybrid WAFC-RRAS algorithm. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023>.

3. Maaji, S. S. & Landa-Silva D. (2023). UAV path planning for area coverage and energy consumption in oil and gas exploration environment. In International Conference on Computational Logistics (pp. 467-481). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30351-7_32.

4. Li, J. et al. (2023). Coverage path planning method for agricultural spraying UAV in arbitrary polygon area. Aerospace, 10(9), 755. <https://doi.org/10.3390/aerospace10090755>.

5. Zhang, L. et al. (2023). Coverage path planning with minimum cost suitable for sidewalk. In 2023 3rd International Conference on Computer Science, Electronic Information Engineering and Intelligent Control Technology (CEI) (pp. 801-805). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CEI59349.2023>.

6. Plessen, M. (2024). Path planning for spot spraying with UAVs combining TSP and area coverages. arXiv preprint arXiv:2408.08001. <https://arxiv.org/abs/2408.08001>.

7. Ahuraka, F., et al. (2023). Chaotic motion planning for mobile robots: Progress, challenges, and opportunities. IEEE Access, 11, 134917-134939. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3234567>.

8. Önlér, E. (2024). Comparative analysis of genetic and greedy algorithm for optimal drone flight route planning in agriculture. Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi, 39(1), 129-142. <https://doi.org/10.7161/omuanajas.2024.39.1.129>.

9. Bine, L. M. S., et al. (2023). A novel ant colony-inspired coverage path planning for internet of drones. Computer Networks, 235,

109963. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109963>

10. Mukhamediev, R. I., Yakunin, K., Aubakirov, M., Assanov, I., Kuchin, Y., Symagulov, A., Levashenko, V., Zatceva, E., Sokolov, D. & Amirgaliyev, Y. (2023). Coverage path planning optimization of heterogeneous UAVs group for precision agriculture. IEEE Access, 11(15), 5789-5803. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3235207>.

11. Georgy, S. (n.d.). PODE: Polygon area decomposition for multiple-robot workspace division [Computer software]. GitHub. Retrieved January 15, 2025, from <https://github.com/GeorgySk/pode>.

12. Hert, S. & Lumelsky V. (1998). Polygon area decomposition for multiple-robot workspace division. International Journal of Computational Geometry & Applications, 8(4), 437-466. <https://doi.org/10.1142/S0218195998000230>.

ҰШҚЫШСЫЗ ҰШУ АППАРАТТАРЫНЫҢ ГЕТЕРОГЕНДІ ТОБЫ ҮШІН АУЫЛ ШАРУАШЫЛЫҒЫ АЛҚАПТАРЫНЫҢ ҰШУ МАРШРУТТАРЫН ЖОСПАРЛАУ

Аңдатпа. Жұмыста дәл егіншілік мәселелерін шешу үшін кедергілері бар ауыл шаруашылығы алқаптарының ұшу маришруттарын жоспарлау алгоритмі ұсынылған. Алгоритмді өңдеу тапсырмаларында да, өрістерді бақылау тапсырмаларында да қолдануға болады. Қарапайым зигзагпен (Zamboni) және периметрлік кедергілерді қарапайым айналып өтумен шектелетін классикалық әдістерден айырмашылығы, бұл алгоритм әр түрлі ұшқышсыз ұшу аппараттарының паркінің (әр түрлі типтегі, диапазондағы, құнның, жылдамдықтың) және энергиямен және қажетті ресурстармен қамтамасыз ететін қозғалмалы жер үсті платформасының болуын ескереді. Ұшу процесі. Ұшқышсыз ұшу және қону әдетте өрісті айналып өтетін жол бойындағы әртүрлі нүктелерде жүзеге асырылады. Негізгі жаңалық екі сатылы оңтайландыру процедурасы болып табылады: алдымен өрісті берілген аумақ үлестері бар бірнеше ішкі бұрыштарға бөлудің кездейсоқ жиынтығы жасалады (ішкі кедергілерді ескере отырып), содан кейін бөлудің оңтайлы нұсқасы үшін ұшу параметрлерін оңтайландыратын генетикалық алгоритм іске қосылады (ұшу бұрышы, кіру нүктесі, дрондарды ұшыру құрамы мен тәртібі және платформаның бағыты). Оңтайландыруға өрістің жекелеген бөліктерін локализацияланған айналып өту арқылы қол жеткізіледі (әр учаскеге дронның қолайлы түрі қызмет етеді), сондай-ақ пайдасыз рейстерді азайтатын жер үсті платформасының икемді қозғалысы. Сандық тәжірибелер көрсеткендей, кедергі мөлшері мен өріс көлеміне байланысты ұшу құнын 12-15% төмендетуге қол жеткізіледі. Мақаланың соңғы бөлімінде үш өлшемді рельефті, динамикалық факторларды (ауа-райының өзгеруі, техникалық себептерге байланысты дронды тоқтату) және қиылысатын бағыттардағы соқтығысуды автоматты түрде болдырмауды қоса алғанда, шешімнің даму перспективалары талқыланады.

Түйін сөздер: қамту алгоритмі, ұшқышсыз ұшу аппараттары, генетикалық алгоритм, ұшуды жоспарлау, жасанды интеллект.

AGRICULTURAL FIELD OVERFLIGHT ROUTE PLANNING FOR A HETEROGENEOUS GROUP OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

Abstract. The paper proposes an algorithm for planning routes for overflying agricultural fields with obstacles to solve precision farming problems. The algorithm can be applied in both processing and field monitoring tasks. Unlike classical methods, which are limited to simple zigzag traversal (Zamboni) and elementary perimeter traversal of obstacles, this algorithm takes into account the presence of a fleet of heterogeneous drones (different type, range, cost, speed) and a moving ground platform that provides energy and necessary resources for the

process of overflight. The drones take off and land at various points along a road that typically wraps around a field. The key innovation is a two-stage optimization procedure: first, a random set of field partitions is generated into several sub-multiples with specified area fractions (taking into account internal obstacles), and then, for the optimal partition, a genetic algorithm is run to optimize the overflight parameters (flight angle, entry point, composition and order of drone launches, and platform route). Optimization is achieved through a more localized traversal of certain parts of the field (each area is served by a suitable type of drone), as well as flexible movement of the ground platform, reducing useless flights. Numerical experiments show that, depending on the size of the obstacle and the size of the field, a 12-15% reduction in the cost of overflights is achieved. The final part of the paper discusses the prospects of the solution development, including consideration of 3D terrain, dynamic factors (changing weather conditions, drone stopping for technical reasons) and automatic collision prevention on intersecting route sections.

Keywords: Coverage algorithm, drones, genetic algorithm, flight planning, artificial intelligence.

Сведение об авторах

Якунин Кирилл Олегович	PhD, «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева» (НАО "КазННТУ им. К.И.Сатпаева"). E-mail: yakunin.k@mail.ru
Сымағұлов Адилхан	«Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева» (НАО "КазННТУ им. К.И.Сатпаева"). E-mail: asmogulove00@gmail.com
Мухамедиев Равиль Ильгизович	Доктор инженерных наук, профессор, Институт автоматизации и информационных технологий, кафедра программной инженерии, «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева» (НАО "КазННТУ им. К.И.Сатпаева"). E-mail: ravil.muhamedyev@gmail.com
Юничева Надия Рафкатовна	к.т.н., доцент, Ведущий научный сотрудник Института информационных и вычислительных технологий КН МНВО РК. E-mail: naduni@mail.ru

Авторлар туралы мәлімет

Якунин Кирилл Олегович	"Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті" E-mail: yakunin.k@mail.ru
Сымағұлов Әділхан	"Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті" E-mail: asmogulove00@gmail.com
Мұхамедиев Равиль Ильгизович	Инженерия ғылымдарының докторы, профессор, "Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті" E-mail: ravil.muhamedyev@gmail.com
Юничева Надия Рафкатовна	т. ғ. к., доцент, ҚР БҒМ ҒК АЕТИ жетекші ғылыми қызметкері, E-mail: naduni@mail.ru

Information about the authors

Yakunin Kirill O.	PhD, Satbayev University (KazNRTU), Almaty, Kazakhstan E-mail: yakunin.k@mail.ru
Symagulov Adilkhan	Satbayev University (KazNRTU), Almaty, Kazakhstan E-mail: asmogulove00@gmail.com
Mukhamediev Ravil I.	Doctor of Engineering, Professor, Institute of Automation and Information Technologies, Satbayev University (KazNRTU), Almaty, Kazakhstan E-mail: ravil.muhamedyev@gmail.com
Yunicheva Nadiya	Candidate of Technical Science, leading researcher of the Institute of High Technologies of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, E-mail: naduni@mail.ru ,