

УДК 519.688:338.47

Алгоритм численных расчетов перемещения группы роботов при выполнении транспортных миссий*

Р.В.Мещеряков, А.А.Саломатин, Д.В.Сенчук

Институт проблем управления им В.А. Трапезникова Российской академии наук (Москва, Россия)

Algorithm for Numerical Calculations of Robotic Group Movement During Transport Mission

R.V. Meshcheryakov, A.A. Salomatin, D.V. Senchuk

V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Рассматривается алгоритм поиска времени обследования крыш жилого фонда средствами беспилотной авиационной системы, имеющей в своем составе беспилотные летательные аппараты (БПЛА) мультикоптерного типа с полезной нагрузкой в виде тепловизионного прибора. Рассматриваются алгоритмы и их реализация для поставленной задачи. Решается задача перемещения группы мультикоптеров с ограничениями по нагрузке, дальности перемещения, высоте крыш и другим характеристикам. Предложен и обоснован оригинальный алгоритм функционирования системы. Достоинством алгоритма является быстрый поиск решения, наглядность и возможность быть верифицированным пользователем. Недостатки: получаемое решение субоптимально, сложность по памяти растет по степенному, или экспоненциальному закону, не учтено время зарядки БПЛА (при отсутствии заменной батареи). Алгоритм реализован в среде MatLab, представлен пример расчетов, проведен вычислительный эксперимент. В дальнейших исследованиях предполагается ввести большее количество ограничений и условий, а также опробовать динамическое изменение логистических маршрутов при отказах БПЛА.

Ключевые слова: алгоритм, беспилотные летательные аппараты, группа, численный расчет.

DOI: 10.14258/izvasu(2021)1-19

Введение

В рамках исполнения указа Президента РФ от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» правительством РФ 2 марта 2020 г. утверждено постановление № 221 «О внесении изменений в государственную программу Российской Федерации

The paper considers an algorithm for searching for the time of residential roof inspection using an unmanned aerial system, which incorporates unmanned aerial vehicles (UAV) of a multicopter type with a thermal imaging device as a transporting load. Algorithms and their implementation for the problem are considered. The problem of multicopter group movement with restrictions on load, range, roof height and other characteristics is solved. An original algorithm for the system functioning is proposed and justified. The advantage of the algorithm is a quick solution search, visibility and the ability to be verified by the user. There are some disadvantages, such as the resulting solution being suboptimal, the memory complexity growing exponentially, and the UAV charging time being out of consideration (in the absence of a replacement battery). The algorithm is implemented in the MatLab environment, and the example of calculations is presented, the computational experiment is conducted. In further research, it is planned to introduce a larger number of restrictions and conditions and also to test the dynamic change in logistics routes for UAV failures.

Key words: algorithm, unmanned aerial vehicles, group, numerical calculation.

„Развитие энергетики“, согласно которому руководителями различного уровня активно проводятся мероприятия по обеспечению ускоренного внедрения цифровых технологий в экономике и социальной сфере. Так, одной из актуальных проблем социальной сферы является вопрос рационального расхода энергоресурсов и энергоэффективности. Решение данно-

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-08-00331).

го вопроса усложняется климатическими особенностями РФ, которые влияют на эксплуатацию жилого фонда. Однако использование автономных беспилотных авиационных систем (БАС), состоящих из БПЛА мультикоптерного типа, может обеспечить успешное оперативное решение широкого спектра прикладных задач: выявление теплопотерь (некачественная теплоизоляция приводит к потерям тепла, что провоцирует рост коммунальных платежей), поиск дефектов оборудования (оперативный поиск места обрыва линии электропередачи), локализацию утечек или точек сброса сточных вод, мониторинг облицовки зданий.

Так, например, своевременная диагностика теплоизоляции комплекса зданий с применением тепловизионного оборудования, установленного на БПЛА, позволит в максимально короткие сроки обнаружить места «утечки» тепла и провести ремонт для их устранения. Исследованию данного и смежных вопросов посвящен ряд работ современных ученых [1–7], однако представленная область прикладных разработок далека от своего завершения. Научная новизна данной статьи состоит в создании оригинального алгоритма перемещения БПЛА, который повысит эффективность использования транспортных средств и их группы, называемой далее БАС, — беспилотной авиационной системы [8].

1. Постановка задачи

Для расчета времени исследования жилой зоны примем следующие ограничения: БАС в составе десяти БПЛА (массой 5 кг со скоростью 2 км/мин каждый).

Максимальная дальность полета аппарата — 30 км. При решении задачи от точки запуска (пункта наземного управления) расстояние должно быть не больше 15 км до объекта исследования.

Максимальная обследуемая площадь — 2500 м² (площадь ЦАО г. Москва). Введем ограничение, что крыши зданий могут располагаться на границах ЦАО, который в общем случае может быть представлен кругом. Тогда радиус такого круга будет

$$r = \sqrt{\frac{2500}{\pi}} \approx 28 \text{ км.}$$

Это означает, что диаметр круга — максимальное расстояние между крышами — может достигать величины $2r = 56$ км.

Введем следующие ограничения: минимальное расстояние между крышами 1 км, максимальная высота крыши 100 м, минимальная высота крыши 80 м. Таким образом, по ограничениям необходимо исключить среди массива объектов исследования крыши с высотой $h_i \notin [80; 100]$, $i = 1, \dots, N$, где N — число крыш в округе. Расстояния между крышами заданы симметричной матрицей D , где каждый элемент матрицы будет представлять собой расстояние в 1 км между двумя крышами. Элементы главной диагонали этой матрицы будут равны нулю.

БПЛА должны своевременно обеспечиваться питанием (подзаряжаться), чтобы иметь возможность пролететь расстояние до 30 км. Для этого происходит замена батареи на точке старта, что занимает время $t = 5$ мин. Указанное время является задержкой перед его возможным следующим полетом.

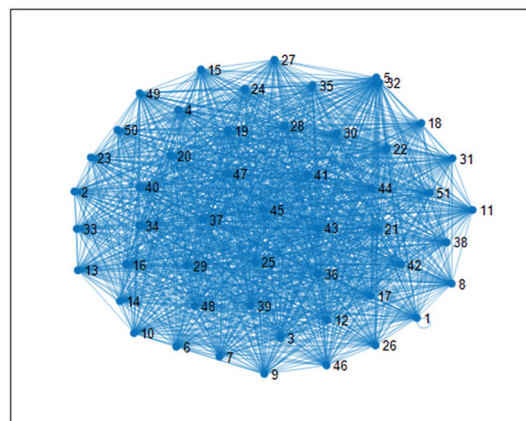
2. Определение продолжительности обследования жилого фонда ЦАО г. Москва БАС с использованием тепловизионных приборов

Для определения времени обследования необходимо смоделировать задачу и найти ее решение, связанное с поиском пути для БПЛА, обследуемыми на этом пути крышами и пройденным расстоянием, из которого можно будет при заданной скорости вычислить время, затраченное на передвижение [9].

Решение будем искать на графе. Допустим, что среди всех крыш были выбраны те, для которых все ограничения удовлетворены, и в итоге рассматривается 51 крыша, причем крыша под номером 1 — точка старта. Граф путей между крышами представлен на рисунке. Для формирования графа была использована подматрица B матрицы D , удовлетворяющая ограничениям, связанным с высотой крыши и максимальной дальностью полета аппарата:

$$B = \begin{pmatrix} 0 & b_{1,2} & \dots & b_{1,51} \\ b_{2,1} & 0 & \dots & b_{2,51} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{51,1} & b_{51,2} & \dots & 0 \end{pmatrix},$$

где $b_{i,j} = b_{j,i} \forall i \neq j$; $i, j = 1, \dots, 51$; $b_{1,k} \in [1; 15]$, $b_{q,k} \in [1; 56]$, $\forall i \neq k$; $q, k = 2, \dots, 51$.



Граф путей между объектами исследования

Для поиска решения необходимо также исключить пути, для которых расстояние между двумя крышами среди исходных 50, отличных от точки старта, больше 30 км. Иными словами, исключаются $b_{q,k} > 30$, $\forall i \neq k$; $q, k = 2, \dots, 51$. Такое преобразование ускорит поиск решения.

Далее опишем алгоритм, обеспечивающий субоптимальное решение. Рассматривается первый незадействованный БПЛА. Пусть длина его пути на этапе алгоритма равна L_m , где m — уже обследованное на данном этапе число крыш. Длина кратчайшего пути между вершинами i, j ; $i \neq j$; $i, j \leq 11$ равна $l_{i,j}$ и не для всех крыш тождественно равна $b_{i,j}$. Обследование крыш согласно алгоритму придерживается следующих принципов:

1) один из БПЛА должен обследовать максимальное число крыш, передвигаясь по кратчайшим расстояниям;

2) он перемещается от одной крыши к другой, которая не была обследована, преодолевая путь с наименьшим расстоянием;

3) если на каком-то этапе было обследовано m крыш и $L_m < 30$, то аппарат начинает искать очередную $m+1$ -ю крышу-кандидат для обследования. Ищется путь с наименьшим расстоянием от последней обследованной крыши к той, которая не была еще обследована, $l_{m,m+1}$. Формируется величина L_{m+1} ;

4) проверяется выполнение условия, учитывающего обратный путь из вершины кандидата в точку запуска: $L_{m+1} + l_{m+1,m} < 30$. Если суммарное расстояние больше 30 км, то крыша-кандидат не обследуется и рассматривается обратный путь из последней обследуемой вершины с длиной $l_{m,1}$;

5) для остальных БПЛА определяются аналогичные вычисления, за исключением того, что при поиске новых вершин исключаются из поиска крыши, которые уже запланированы под обследование аппаратами, но пути перемещений из графа не исключаются;

6) дополнительные (вторые, третьи и т.д.) полеты осуществляются после зарядки всех имеющихся 10 БПЛА.

Решение для первого БПЛА в примере выглядит следующим образом:

Путь: 1, 11, 2, 11, 7, 13, 10, 13, 45, 23, 5, 48, 30, 1.

Обследуются крыши: 2, 7, 11, 13, 10, 45, 23, 5, 48, 30 (исследовано 10 крыш).

Длина маршрута: 27,0632 км. Время обследования: $27,0632 / 2 = 13,5316$ мин.

Преимущества алгоритма:

1. Быстрый поиск решения, связанный с наглядностью решения. Не требуется обучение нейронных сетей и не вводятся дополнительные переменные для применения алгоритма.

2. Решение может быть проведено вручную для небольшого числа крыш (имеется возможность ручной проверки компьютерного алгоритма).

Недостатки алгоритма:

1. Субоптимальное решение.

2. При большом количестве объектов исследования необходимо исключать огромное число крыш для БПЛА при поиске путей, что требует много памяти, т.е. сложность по памяти алгоритма растет по степенному, или экспоненциальному закону.

3. Возможна ситуация, когда какой-то БПЛА на одном из этапов закончит обследование и зарядится, а остальные еще будут проводить свои обследования длительное время, что приведет к простаиванию аппарата без работы [10].

Заключение

Отличительная особенность представленной работы заключается в том, что указанный алгоритм может быть применен на первичных этапах решения задачи при планировке или в условиях сжатых сроков, когда оператору необходимо быстро принимать решение [11]. Наибольшую эффективность он показывает при небольшом числе обследуемых крыш, так как в таком случае решение может быть найдено вручную и полученное решение может совпадать с наилучшим. При большом числе крыш решение будет субоптимальное, однако данный алгоритм можно применить к отдельным группам обследуемых объектов (разбиениям), что позволит также получить хороший результат.

Библиографический список

1. Гладких Т.Я., Мигачев А.Н. Использование БПЛА для тепловизионного мониторинга объектов инфраструктуры с целью повышения энергетической эффективности: сб. трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. М., 2019.

2. Вытовтов А.В., Калач А.В., Куликова Т.Н. Алгоритм распознавания пламени с борта беспилотного воздушного судна // Современные проблемы гражданской защиты. 2017. № 3 (24).

3. Колодкин Н.С., Винтер А.Р., Платонов В.Д., Житников А.А., Рублев М.В. Использование тепловизионного контроля в оценке энергосбережения зданий и сооруже-

ний // Наука, образование, инновации: пути развития: матер. X национальной (всероссийской) научн.-практич. конфер. Петропавловск-Камчатский, 2019.

4. Бисс А.А., Кочурова К.А., Пономарев Н.С. Экспериментальное определение потерь тепла здания с помощью тепловизора // Современные тенденции развития науки и технологий. Белгород, 2017. № 3–3.

5. Миляков Д.А. Новый подход к управлению большой группой беспилотных летательных аппаратов как системой с распределенными параметрами // XVI Национальная конфер. по искусственному интеллекту с междунар.

участием КИИ-2018 (24–27 сентября 2018 г., Москва, Россия). Труды конференции. М., 2018. Т. 1.

6. Сапрыкин Р.В. Алгоритмы информационного взаимодействия интеллектуальных мобильных роботов при картографировании внешней среды функционирования // Известия Южного федерального ун-та. Технические науки. 2015. № 3 (164).

7. Chernukhin Y.V., Priemko A.A. Method of an environment mapping in neural network control system of adaptive mobile robot // Opt. Mem. Neural Networks. 2006. Vol. 1.

8. Кутахов В.П., Мещеряков Р.В. Принципы формирования модели оптимизации системы роботизированных авиационных средств : сб. трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. М., 2019.

9. Павлова Н.В., Смеюха А.В. Повышение эффективности выполнения полетного задания современными маневренными летательными аппаратами // Труды МАИ. 2016. № 87. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=69703>.

10. Нго К.Т., Соленая О.Я., Ронжин А.Л. Анализ подвижных роботизированных платформ для обслуживания аккумуляторов беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=84444>.

11. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Групповое управление движением мобильных роботов в неопределенной среде с использованием неустойчивых режимов // Труды СПИИРАН. 2018. № 5 (60).