

Алгоритмы расчета траекторий полета беспилотных воздушных судов для решения сельскохозяйственных задач

Валерия Валентиновна Лебедева,
младший научный сотрудник,
e-mail: izhboldina.valeriia@gmail.com;

Игорь Владимирович Лебедев,
младший научный сотрудник,
e-mail: igorlevedev@gmail.com

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Реферат. Обосновали актуальность использования беспилотных воздушных судов (БВС) по сравнению с другими способами аэрокосмической съемки. Привели примеры задач, требующие применения БВС для аэрофотосъемки с разной высоты. Показали, что внедрение сельскохозяйственных роботов, в том числе БВС, ускоряет выполнение полевых работ, а также позволяет получать уникальные данные, необходимые для оценки сельскохозяйственных территорий, обработки посевов и стимуляции роста растений. Отметили, что проблема построения траекторий движения БВС мультироторного типа при выполнении сельскохозяйственных задач за минимальное время остается нерешенной. (*Цель исследования*) Уменьшить длину траектории покрытия заданного участка и сократить время полета БВС мультироторного типа с учетом анализа возможных препятствий и участков земли, не представляющих интереса при решении поставленной задачи. (*Материалы и методы*) Использовали геометрические методы расчета траектории полета БВС для покрытия заданного участка, траекторию движения в среде с препятствиями к назначенной точке. С помощью методов фотограмметрии провели обработку изображений аэрофотосъемки при формировании ортофотоплана и карты рельефа местности. (*Результаты и обсуждение*) Показали, что рассчитанная разработанным алгоритмом траектория удовлетворяет все требования: она непрерывна, имеет минимальное количество поворотов, сглажена, а также осуществима для БВС мультироторного типа. (*Выводы*) Определили, что для расчета по предложенному алгоритму траектории покрытия на прямоугольном участке со сторонами 200 и 30 метров потребовалось менее 0,05 секунды. Выявили, что траектория на первом участке, площадью 10 200 квадратных метров, уменьшилась на 9 процентов, а на втором, площадью 950 000 квадратных метров, – на 6 процентов, по сравнению с длиной траектории, построенной по стандартным алгоритмам, причем время полета сократилось на 32 и 10 процентов соответственно. Отметили основные преимущества применения БВС для видеосъемки: гарантированное высокое разрешение фотоматериалов и возможность съемки в заданное время, позволяющие оценивать состояние посевов.

Ключевые слова: сельскохозяйственная робототехника, беспилотное воздушное судно, планирование траектории беспилотного воздушного судна, мониторинг сельскохозяйственных территорий, аэрофотосъемка.

■ **Для цитирования:** Лебедева В.В., Лебедев И.В. Алгоритмы расчета траекторий полета беспилотных воздушных судов для решения сельскохозяйственных задач // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №3. С. 40-47. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-40-47. EDN WIJAUS.

Algorithms for Calculating the Trajectory of Unmanned Aerial Vehicles for Solving Agricultural Problems

Valeria V. Lebedeva,
junior researcher,
e-mail: izhboldina.valeriia@gmail.com;

Igor V. Lebedev,
junior researcher,
e-mail: igorlevedev@gmail.com

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The relevance of using unmanned aerial vehicles (UAV) is substantiated in comparison with other methods of aerospace survey. The paper provides examples of tasks requiring the use of UAVs for aerial photography from different heights. It is shown that the introduction of agricultural robots, including UAVs, increases the speed of field work, allows obtaining unique data necessary for the assessment of agricultural territories, crops processing and plant growth stimulation. It is noted that the problem of constructing the movement trajectories of a multirotor UAV for performing agricultural tasks within a minimum time limit

remains unresolved. (*Research purpose*) To reduce the length of the trajectory covering a given area and reduce the flight time of a multirotor UAV, taking into account the analysis of possible obstacles and land plots that are beyond the task scope. (*Materials and methods*) Geometric methods have been used to calculate the UAV flight trajectory covering a given section, the trajectory of movement in an environment with obstacles to the designated point. Photogrammetry methods have been used for processing aerial photography images when forming an orthophotoplane and a terrain map. (*Results and discussion*) The trajectory calculated by the developed algorithm proves to meet all the requirements: it is continuous, has a minimum number of turns, it is smoothed, and feasible for a multirotor UAV. (*Conclusions*) It was determined that according to the proposed algorithm it takes less than 0.05 seconds to calculate the trajectory covering a rectangular section with the sides of 200 by 30 meters. It was found that the trajectory in the first 10,200-square-meter section decreased by 9 percent, and in the second 950,000-square-meter section it reduced by 6 percent, compared with the length of the trajectory built using standard algorithms. The flight time reduced by 32 and 10 percent, respectively. The paper presents the key advantages of using UAV for video shooting such as: guaranteed high resolution of photographic materials and the ability to shoot at a given time, allowing for the crop condition assessment

Keywords: agricultural robotics, unmanned aerial vehicle, UAV trajectory planning, monitoring of agricultural territories, aerial photography.

■ For citation: Lebedeva V.V., Lebedev I.V. Algoritmy rascheta traektoriy poleta bespilotnykh vozдушnykh sudov dlya resheniya sel'skokhozyaystvennykh zadach [Algorithms for calculating the trajectory of unmanned aerial vehicles for solving agricultural problems]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N3. 40-47 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-2-40-47. EDN WIJAUS.

Обработка изображений, получаемых в ходе видеосъемки с беспилотных воздушных судов (БВС), позволяет создавать картографическую основу с точными координатами всех объектов на территории, необходимую для визуального анализа объектов [1]. С помощью фотоматериала можно определить объективную площадь пашни, сенокосов, пастбищ, залежей, язби, сева, недосево и присево. Результаты аэрофотосъемки позволяют определять границы участков при кадастровом учете, уточнять границы земельных участков и линейных объектов. Аэрофотосъемка с БВС более детализована по сравнению с космическими снимками. Кроме того, БВС позволяют вести съемку даже в условиях облачности, что актуально для Северо-Западного региона [2].

С помощью БВС возможно решение следующих задач:

- облет сельскохозяйственных угодий для контроля работы сельскохозяйственной техники и персонала [3];
- учет качества обработанной земли [4];
- создание электронных карт участков и топографических карт территории [5];
- инвентаризация посевов и полей, определение объективной площади пашни, а также сенокосов, пастбищ, многолетних трав, залежей [6];
- анализ и отслеживание очагов возгорания и последствий ущерба, нанесенного стихийными бедствиями [7];
- внесение химикатов на отдельные зараженные участки поля или по всему заданному участку [8, 9];
- мультиспектральная съемка на специальном оборудовании, с изображениями RGB, NIR, NDVI и NDRE за один полет [10];
- охрана урожая на поле [11];
- лазерная стимуляция растений [12].

Все представленные задачи предполагают работу

с большими участками, а также движение БВС на дальние расстояния. Поэтому необходима разработка новых алгоритмов построения маршрутов для работы БВС на больших территориях или для движения аппарата на дальние расстояния.

Все траектории движения БВС мультироторного типа для решения сельскохозяйственных задач можно разделить на три группы в зависимости от размера обрабатываемой территории и поставленной задачи (рис. 1):

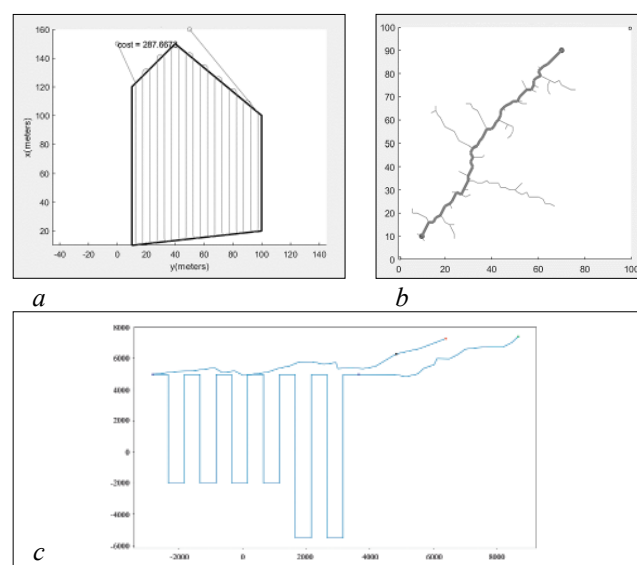


Рис. 1. Примеры траекторий для решения сельскохозяйственных задач: а – траектория, покрывающая заданный участок; б – траектория движения к назначенной точке на карте; в – комбинированная траектория

Fig. 1. Examples of trajectories for solving agricultural problems. a – trajectory covering a given section; b – the trajectory of movement to the designated point on the map; c – composite trajectory

- траектория, покрывающая заданный участок;
- траектория движения к назначенной точке на карте;
- комбинированная траектория, сочетающая траекторию покрытия и траекторию к точке.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ – уменьшение длины покрываемой траектории и времени полета БВС мультиторного типа на заданном участке.

Задачи исследования:

- анализ возможных препятствий и участков земли, не представляющих интереса [13];
- разработка алгоритма на основе декомпозиции рабочего пространства на ячейки с разным функционалом;
- построение графовой модели маршрута БВС мультиторного типа с покрытием всего рабочего пространства, сокращением числа поворотов и сглаживанием их траектории.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. При выполнении таких задач, как мониторинг сельскохозяйственных угодий, равномерная лазерная стимуляция растений, равномерное внесение удобрений на большом участке земли, аэрофотосъемка с последующим созданием модели или карты местности для БВС мультиторного типа, необходимо спланировать траекторию покрытия выделенной территории.

Назначение планировщика полета, функционирующего на борту БВС, – планирование траектории движения, чтобы полностью охватить заданную территорию [14]. Существуют методы как без разделения рабочей области на несколько частей, так и использующие точную и приближенную декомпозицию пространства [15].

Построение траектории покрытия территории правильной геометрической формы без препятствий с помощью одного БВС обычно основано на методах без декомпозиции рабочей области. Для исследования таких участков достаточно предопределенных траекторий. Наиболее распространенные паттерны – это возвратно-поступательное движение и спираль [16].

Приближенная декомпозиция разделяет заданный участок на части в зависимости от препятствий, находящихся на нем. Если он в форме невыпуклого многоугольника, тогда происходит хаотичное разбиение на выпуклые многоугольники. После приближенной декомпозиции планировщик на борту БВС строит траектории покрытия в каждой части участка, используя известные паттерны движения (рис. 2а) [17-18].

Точная декомпозиция – это наложение сетки на всю заданную территорию. Каждой ячейке присваивается статус: занята препятствием (1) или свободна (0). Затем на основе имеющихся свободных ячеек строится траектория, соединяющая все эти ячейки сетки (рис. 2б) [19-20].

Главное, чтобы маршрут движения БВС полно-

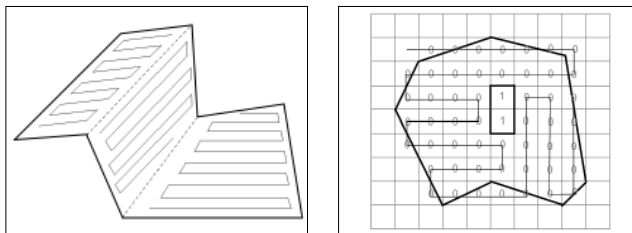


Рис. 2. Примеры декомпозиции заданной области: а – приближенной; б – точной

Fig. 2. Examples of a given section decomposition: a – approximate; b – exact

стью покрывал заданную территорию. Например, для аэрофотосъемки сельскохозяйственной территории может быть использован набор изображений для реконструкции местности, построения карты рельефа или ортофотоплана. Поэтому необходимо определить некоторые правила сбора фотоматериала.

Последовательные изображения должны иметь заданный уровень перекрытия. Чем больше перекрытие, тем выше точность трехмерной модели, карты или плана местности. Необходимо, чтобы все изображения были сделаны в одной и той же ориентации, поскольку это упрощает процесс трехмерной реконструкции и сшивки, что способствует поиску особых точек на смежных снимках. Съемка в одной ориентации уменьшает также количество маневров, что снижает потребление энергетических ресурсов и сокращает время полета БВС.

Для алгоритма, который решает задачу покрытия заданной области, в качестве входных данных используют:

- количество углов обследуемой области и их координаты;
- координаты точек взлета и посадки (начальная и конечная точки соответственно);
- число препятствий внутри обследуемой области и их расположение;
- параметры камеры: длину и ширину кадра, заданный горизонтальный и вертикальный уровень перекрытия между изображениями (рис. 3).

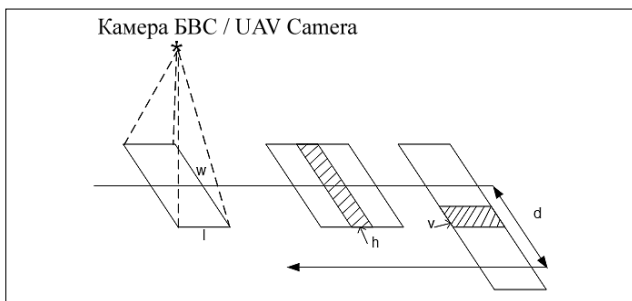


Рис. 3. Параметры камеры: l – длина; w – ширина; h и v – горизонтальный и вертикальный уровни перекрытия изображений соответственно

Fig. 3. Camera parameters: l – length; w – width; h and v – horizontal and vertical levels of image overlap, respectively

Выходные данные алгоритма построения траектории покрытия представлены самой траекторией в виде массива координат точек. Она должна быть непрерывной, покрывать весь обследуемый участок, а также сглаженной и минимизированной по длине. Длина траектории зависит от способа разбиения рабочего пространства, то есть от параметров камеры или другого сканирующего устройства, способа сглаживания траектории и количества маневров. Если траектория удовлетворяет вышеописанные требования, то задача обследования сельскохозяйственного поля считается решенной.

Ранее был разработан алгоритм, который рассчитывает траекторию полета БВС с покрытием территории на основе возвратно-поступательного движения [12]. Расчет проводят в двумерной плоскости, так как БВС мультироторного типа совершает полет на фиксированной высоте. На вход алгоритма подаются стартовая координата (по условиям задачи стартовая координата равна конечной), координаты вершин обследуемого участка и шаг покрытия (ширина кадра). Можно рассчитать количество параллельных линий полета при покрытии территории [21, 22]. Доказана работоспособность предложенного алгоритма [12]. Эксперименты проводили на ЭВМ с параметрами: процессор *Intel Core i5-8250U* (1,6 ГГц), память (ОЗУ) 8 Гб *DDR4* – 2400 МГц, видеокарта *nVidia GeForce MX 150* 2 Гб *GDDR5*, основной жесткий диск *SSD M2* 256 Гб (3300 МБ/с – чтение с диска; 1200 МБ/с запись на диск). Как показали результаты, время, затраченное на расчет траекторий на участке 200×30 м, не превышает 0,05 с (рис. 4).

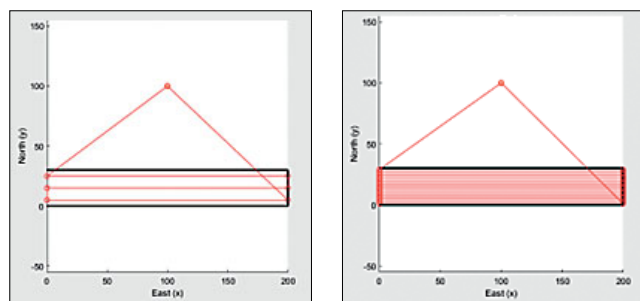


Рис. 4. Спланированные траектории для прямоугольного поля длиной 200 м и шириной 30 м с шагом: а – 10 м; б – 2 м

Fig. 4. Planned trajectories for a rectangular field of 200 m in length by 30 m in width with a step of: a – 10 m; b – 2 m

Рассмотрим блок-схему и описание алгоритма построения траектории покрытия сельскохозяйственного поля в виде многоугольника (рис. 5). Данный алгоритм – это усовершенствованная версия ранее предложенного [12]. Он учитывает наличие препятствий на обследуемом участке. Для расчета траектории покрытия новым алгоритмом необходимо ввести следующие данные:

- количество вершин участка и их координаты;
- число препятствий;
- координаты препятствий;
- координаты точки взлета (стартовой) и точки посадки (конечной);
- ширина кадра;
- уровень требуемого перекрытия.

На основе известных значений параметров камеры рассчитывается размер одной ячейки [26-29]. Далее необходимо разбить обследуемый участок на ячейки определенного ранее размера. После декомпозиции рабочего пространства и на основе известных данных о препятствиях каждой ячейке присваивается свой статус. Если ячейка свободна, то ее статус равен 0, если ячейка содержит препятствие или его часть, то ее статус равен 1. В результате происходит упрощение представления карты для дальнейшей навигации БВС на ней. Затем строится граф, соединяющий центры всех свободных ячеек. Он принимается за найденную траекторию, которая состоит из массива координат центров ячеек и сглаживается методом кубической интерполяции [14, 23-25].

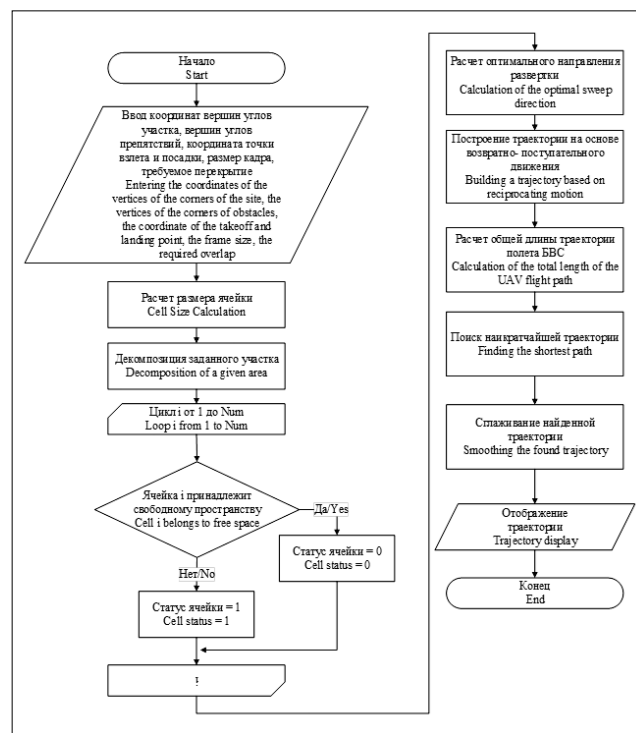


Рис. 5. Блок-схема алгоритма построения траектории БВС (Num – количество ячеек)

Fig. 5. Block diagram of the algorithm for constructing the UAV trajectory (Num is the number of cells)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Для проверки работоспособности разработанного алгоритма построения покрывающей траектории составили 6 экспериментов (табл. 1).

Для моделирования полета БВС по рассчитанным траекториям установлены следующие параметры:

Таблица 1

Table 1

ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ АЛГОРИТМА / INPUT DATA FOR THE ALGORITHM

№ участка Plot number	Координаты взлета и посадки Takeoff and landing coordinates	Площадь участка, м ² Plot area, m ²	Координаты вершин препятствий на участке The coordinates of the plot obstacle vertices	Ширина кадра, м Frame width, m
1	[0, 0; 0, 125]	10200	–	5
2	[600, –600; –550, 0]	950000	[–250, 0; 150, 0; 150, –100; –250, –100]	100

Таблица 2

Table 2

ВЛИЯНИЕ РАСЧЕТА НА ОПТИМИЗАЦИЮ ТРАЕКТОРИИ* / IMPACT OF CALCULATION ON TRAJECTORY OPTIMIZATION*

Показатели / Parameters	1 вариант / Option 1	2 вариант / Option 2	3 вариант / Option 3
Длина траектории, м / Trajectory length, m: 1 участок / plot 1 2 участок plot 2	2720 9850	2680 9531	2490 9300
Время полета, с / Flight time, s: 1 участок / plot 1 2 участок / plot 2	472 951	384 906	320 852

*1 вариант – без дополнительного расчета направления оптимальной развертки; 2 вариант – с оптимальным направлением развертки, но без сглаживания; 3 вариант – с рассчитанным направлением оптимальной развертки и сглаживанием.

*Option 1 – without additional calculation of the optimal sweep direction; Option 2 – with the optimal sweep direction, but without smoothing; Option 3 – with the calculated direction of the optimal sweep and smoothing.

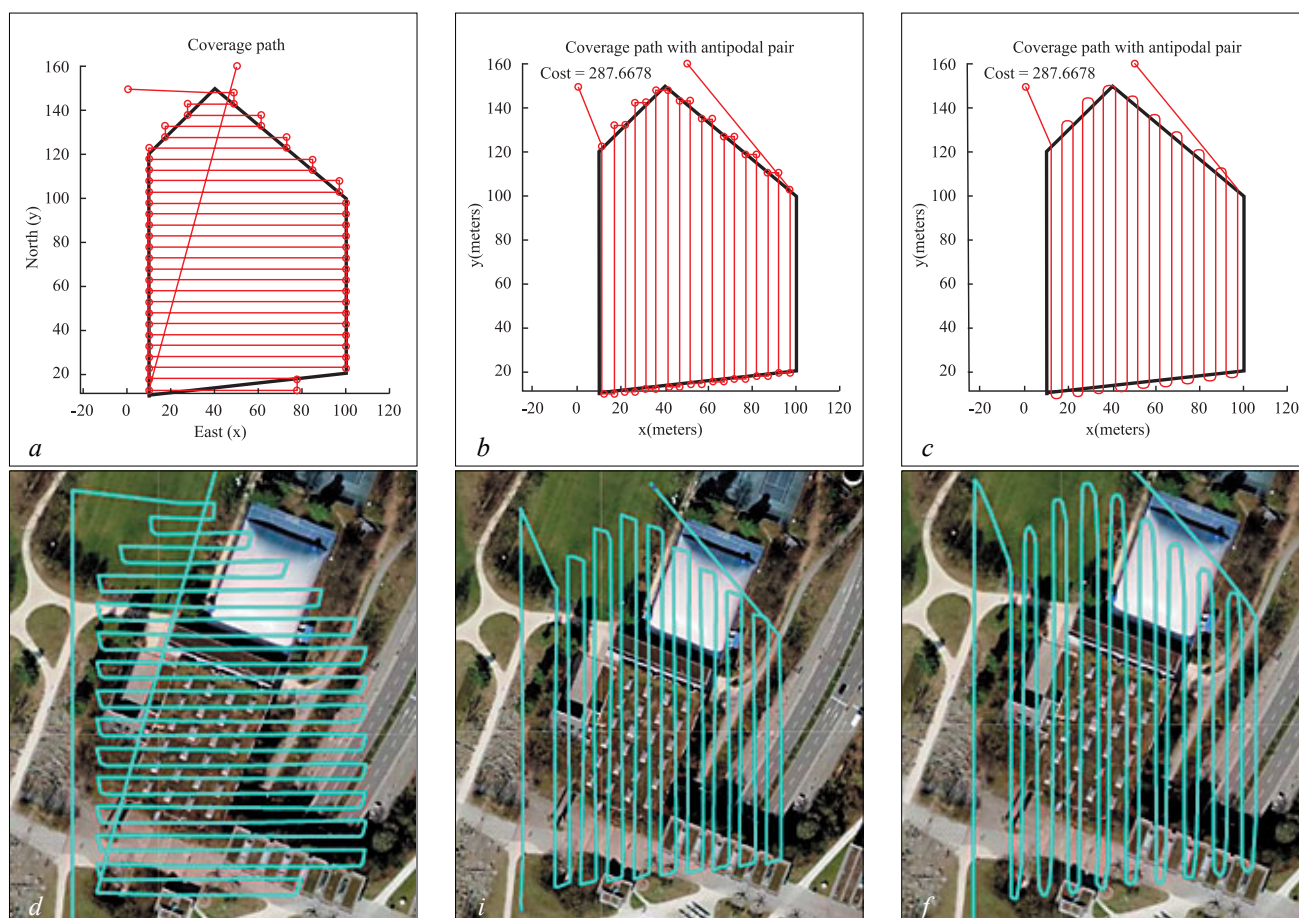


Рис. 6. Визуализация траекторий для первого эксперимента: а, б, с – результат построения траекторий; д, е, ф – фактическая траектория полета

Fig. 6. Visualization of trajectories for the first experiment: а, б, с – the result of constructing trajectories; д, е, ф – actual flight path (taken from the UAV log files)

скорость – 7 м/с, высота полета – 35 и 95 м. В условиях экспериментов предусмотрены 3 варианта построения траектории (табл. 2, рис. 6):

- без дополнительного расчета направления оптимальной развертки;
- с оптимальным направлением развертки, но без сглаживания;
- с рассчитанным направлением оптимальной развертки и сглаживанием.

Применение разработанного алгоритма позволило сократить длину траектории на первом и втором участке на 9 и 6%, а время полета – на 32 и 10% соответственно (табл. 2). Визуально видно, что уменьшилось количество поворотов и сгладились их углы (рис. 6). Фактические траектории получены при помощи моделирования движения БВС в симуляторе Gazebo (рис. 7). Рассчитанные траектории, записанные в файл, направлялись на полетный контроллер модели. Отображенная траектория, вдоль которой двигается БВС, рассчитана предложенным выше алгоритмом.

Рассчитанная траектория соответствует всем выдвинутым требованиям к построению траектории по-

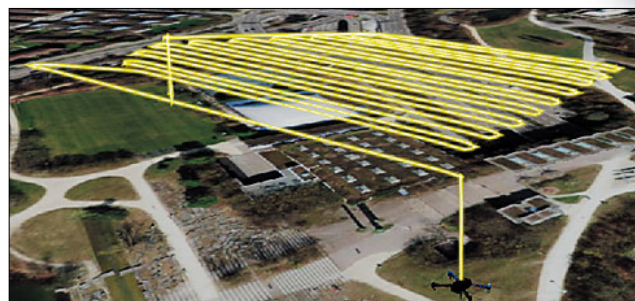


Рис. 7. Моделирование полета по траектории покрытия

Fig. 7. Simulation of UAV flight along the coverage trajectory

крытия: она непрерывна, имеет минимальное количество поворотов, сглажена, а также осуществима для БВС мультироторного типа.

Выводы. Предложили и протестировали алгоритм построения траектории покрытия для БВС мультироторного типа. Использовали его для расчета траектории покрытия на участке 200×30 м, что заняло менее 0,05 с. Применение разработанного алгоритма позволило сократить длину траектории на первом и втором участке на 9 и 6%, а время полета – на 32 и 10% соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рамеш Бабу Н., Набоков В.И., Скворцов Е.А. Классификация и особенности робототехники в сельском хозяйстве // *Аграрный вестник Урала*. 2017. N2(156). С. 82-88.
2. Ардентов А.А., Бесчастный И.Ю., Маштаков А.П. Алгоритмы вычисления положения БПЛА с использованием системы машинного зрения // *Программные системы: теория и приложения*. 2012. N3. С. 23-38.
3. Vu Q., Raković M., Delic V., Ronzhin A. Trends in development of UAV-UGV cooperation approaches in precision agriculture. *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. 2018. 213-221.
4. Ampatzidis Y., Partel V., Costa L. Agrovieview. Cloud-based application to process, analyze and visualize UAV-collected data for precision agriculture applications utilizing artificial intelligence. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. N174. 105457.
5. Meinen B.U., Robinson D.T. Mapping erosion and deposition in an agricultural landscape: Optimization of UAV image acquisition schemes for SfM-MVS. *Remote Sensing of Environment*. 2020. N239. 111666.
6. Messina G., Modica G. Applications of UAV thermal imagery in precision agriculture: State of the art and future research outlook. *Remote Sensing*. 2020. N12(9). 1491.
7. Islam S., Huang Q., Afghah F., Fule P., Razi A. Fire frontline monitoring by enabling uav-based virtual reality with adaptive imaging rate. 53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. IEEE. 2019. 368-372.
8. Albuquerque C.K., Polimante S., Torre-Neto A., Prati R.C. Water spray detection for smart irrigation systems with Mask R-CNN and UAV footage. *IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (Metro-AgriFor)*. 2020. 236-240.
9. Асовский В.П., Кузьменко А.С., Худоленко О.В. Оценка показателей работ беспилотных мультикоптеров по внесению пестицидов и агрохимикатов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N3. С. 55-62.
10. Deng L., Mao Z., Li X., Hu Z., Duan F., Yan Y. UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*. 2018. N146. 124-136.
11. Li X., Giles D.K., Niederholzer F.J., Andaloro J.T., Lang E.B., Watson L.J. Evaluation of an unmanned aerial vehicle as a new method of pesticide application for almond crop protection. *Pest management science*. 2021. 77(1). 527-537.
12. Севостьянова Н.Н., Лебедев И.В., Лебедева В.В., Ватаманюк И.В. Инновационный подход к автоматизированной фотоактивации посевных площадей посредством БПЛА с целью стимуляции роста культур // *Информатика и автоматизация*. 2021. Т. 20. N6. С. 1395-1417.
13. Bai Y., Wang Y., Svinin M., Magid E., Sun R. Adaptive multi-agent coverage control with obstacle avoidance. *IEEE Control Systems Letters*. 2021. N6. 944-949.
14. Nam L.H., Huang L., Li X.J., Xu J.F. An approach for coverage path planning for UAVs. IEEE 14th international workshop on advanced motion control (AMC). IEEE. 2016. 411-416.
15. Choset H. Coverage for robotics – A survey of recent results. *Annals of mathematics and artificial intelligence*. 2001. 31(1). 113-126.
16. Cabreira T.M., Brisolara L.B., Ferreira Jr P.R. Survey on coverage path planning with unmanned aerial vehicles. *Drones*. 2019. 3(1). 4.

17. Torres M., Pelta D.A., Verdegay J.L., Torres J.C. Coverage path planning with unmanned aerial vehicles for 3D terrain reconstruction. *Expert Systems with Applications*. 2016. 55. 441-451.
18. Pham T.H., Bestaoui Y., Mammari S. Aerial robot coverage path planning approach with concave obstacles in precision agriculture. *Work-shop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems*. IEEE. 2017. 43-48.
19. Muñoz J., López B., Quevedo F., Monje C.A., Garrido S., Moreno L.E. Multi UAV Coverage Path Planning in Urban Environments. *Sensors*. 2021. 21(21). 7365.
20. Acevedo J.J., Arrue B.C., Maza I., Ollero A. Distributed approach for coverage and patrolling missions with a team of heterogeneous aerial robots under communication constraints. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2013. 10(1). 28.
21. Barrientos A., Colorado J., Cerro J.D., Martinez A., Rossi C., Sanz D., Valente J. Aerial remote sensing in agriculture: A practical approach to area coverage and path planning for fleets of mini aerial robots. *Journal of Field Robotics*. 2011. 28(5). 667-689.
22. Wang C., Liu P., Zhang T., Sun J. The adaptive vortex search algorithm of optimal path planning for forest fire rescue UAV. *IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference*. 2018. 400-403.
23. Karur K., Sharma N., Dharmatti C., Siegel J.E. A Survey of Path Planning Algorithms for Mobile Robots. *Vehicles*. 2021. 3(3). 448-468.
24. Ценч Ю.С. Профессиональные стандарты как фактор сокращения дефицита квалифицированных кадров // Вестник Челябинской государственной агроинженерной академии. 2014. Т. 67. №2. С. 62-65.
25. Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И., Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С. Цифровые технологии в почвообработке // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. №1(30). С. 191-197.
26. Курбанов Р.К., Костомахин М.Н., Захарова Н.И. и др. Рекомендации для легких беспилотных летательных аппаратов по сбору данных // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2018. №6. С. 47-53.
27. Артюшин А.А., Курбанов Р.К., Марченко Л.А., Захарова О.М. Выбор типоразмерного ряда беспилотных летательных аппаратов и полезной нагрузки для мониторинга сельскохозяйственных полей // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019. №4(37). С. 36-43.
28. Kurbanov R., Litvinov M. Development of a gimbal for the Parrot Sequoia multispectral camera for the UAV DJI Phantom 4 Pro. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Rostov-on-Don, 20-22 октября 2020 года*. Rostov-on-Don: 2020. 012062.
29. Kurbanov R., Zakharova N., Sidorenko V., Vilyunov S. The Use of Vegetation Indices in Comparison to Traditional Methods for Assessing Overwintering of Grain Crops in the Breeding Process. *Advances in Artificial Systems for Power Engineering II: Conference proceedings, Москва, 17-19 декабря 2021 года*. Москва: Springer Nature Switzerland AG, 2022. 52-64.

REFERENCES

1. Ramesh Babu N., Nabokov V.I., Skvortsov E.A. Klassifikatsiya i osobennosti robototekhniki v sel'skom khozyaystve [Classification and features of robotics in agriculture]. *Agrarnyy vestnik Urala*. 2017. №2(156). 82-88 (In Russian).
2. Ardentov A.A., Beschastnyy I.Yu., Mashtakov A.P. Algoritmy vychisleniya polozheniya BPLA s ispol'zovaniem sistemy mashinnogo zreniya [Algorithms for Evaluation Position and Orientation of UAV]. *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya*. 2012. №3. 23-38 (In Russian).
3. Vu Q., Raković M., Delic V., Ronzhin A. Trends in development of UAV-UGV cooperation approaches in precision agriculture. *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. 2018. 213-221(In English).
4. Ampatzidis Y., Partel V., Costa L. Agroview. Cloud-based application to process, analyze and visualize UAV-collected data for precision agriculture applications utilizing artificial intelligence. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. №174. 105457 (In English).
5. Meinen B.U., Robinson D.T. Mapping erosion and deposition in an agricultural landscape: Optimization of UAV image acquisition schemes for SfM-MVS. *Remote Sensing of Environment*. 2020. №239. 111666 (In English).
6. Messina G., Modica G. Applications of UAV thermal imagery in precision agriculture: State of the art and future research outlook. *Remote Sensing*. 2020. №12(9). 1491 (In English).
7. Islam S., Huang Q., Afghah F., Fule P., Razi A. Fire frontline monitoring by enabling uav-based virtual reality with adaptive imaging rate. *53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*. IEEE. 2019. 368-372 (In English).
8. Albuquerque C.K., Polimante S., Torre-Neto A., Prati R.C. Water spray detection for smart irrigation systems with Mask R-CNN and UAV footage. *IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor)*. 2020. 236-240 (In English).
9. Asovskiy V.P., Kuz'menko A.S., Khudolenko O.V. Otsenka pokazateley rabot bespilotnykh mul'tikopterov po vnesheniyu pestitsidov i agrokhimikatov [Evaluation of unmanned multicopters' performance indicators for pesticide and agrochemical application]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol.15. №3. 55-62 (In Russian).
10. Deng L., Mao Z., Li X., Hu Z., Duan F., Yan Y. UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*. 2018. №146. 124-136 (In English).
11. Li X., Giles D.K., Niederholzer F.J., Andaloro J.T., Lang E.B., Watson L.J. Evaluation of an unmanned aerial vehicle as a new method of pesticide application for almond crop protection. *Pest management science*. 2021. 77(1). 527-537 (In English).
12. Sevost'yanova N.N., Lebedev I.V., Lebedeva V.V., Vatamanuk I.V. Innovatsionnyy podkhod k avtomatizirovannoy fotoaktivatsii posevnykh ploshchadey posredstvom BPLA s tsel'yu stimulyatsii rosta kul'tur [An innovative approach to

- automated photo-activation of crop acreage using uavs to stimulate crop growth]. *Informatika i avtomatizatsiya*. 2021. Vol. 20. N6. 1395-1417 (In Russian).
13. Bai Y., Wang Y., Svinin M., Magid E., Sun R. Adaptive multi-agent coverage control with obstacle avoidance. *IEEE Control Systems Letters*. 2021. N6. 944-949 (In English).
 14. Nam L.H., Huang L., Li X.J., Xu J.F. An approach for coverage path planning for UAVs. IEEE 14th international workshop on advanced motion control (AMC). IEEE. 2016. 411-416 (In English).
 15. Choset H. Coverage for robotics – A survey of recent results. *Annals of mathematics and artificial intelligence*. 2001. 31(1). 113-126 (In English).
 16. Cabreira T.M., Brisolara L.B., Ferreira Jr P.R. Survey on coverage path planning with unmanned aerial vehicles. *Drones*. 2019. 3(1). 4 (In English).
 17. Torres M., Pelta D.A., Verdegay J.L., Torres J.C. Coverage path planning with unmanned aerial vehicles for 3D terrain reconstruction. *Expert Systems with Applications*. 2016. 55. 441-451 (In English).
 18. Pham T.H., Bestaoui Y., Mammari S. Aerial robot coverage path planning approach with concave obstacles in precision agriculture. Work-shop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems. IEEE. 2017. 43-48 (In English).
 19. Muñoz J., López B., Quevedo F., Monje C.A., Garrido S., Moreno L.E. Multi UAV Coverage Path Planning in Urban Environments. *Sensors*. 2021. 21(21). 7365 (In English).
 20. Acevedo J.J., Arrue B.C., Maza I., Ollero A. Distributed approach for coverage and patrolling missions with a team of heterogeneous aerial robots under communication constraints. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2013. 10(1). 28 (In English).
 21. Barrientos A., Colorado J., Cerro J.D., Martinez A., Rossi C., Sanz D., Valente J. Aerial remote sensing in agriculture: A practical approach to area coverage and path planning for fleets of mini aerial robots. *Journal of Field Robotics*. 2011. 28(5). 667-689 (In English).
 22. Wang C., Liu P., Zhang T., Sun J. The adaptive vortex search algorithm of optimal path planning for forest fire rescue UAV. IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference. 2018. 400-403 (In English).
 23. Karur K., Sharma N., Dharmatti C., Siegel J.E. A Survey of Path Planning Algorithms for Mobile Robots. *Vehicles*. 2021. 3(3). 448-468. (In English).
 24. Tsench Yu.S. Professional'nye standarty kak faktor sokrashcheniya defitsita kvalifitsirovannykh kadrov [Professional standards as a factor in reducing the shortage of qualified personnel]. *Vestnik Chelyabinskoy gosudarstvennoy agroinzhenernoy akademii*. 2014. Vol. 67. N2. 62-65 (In Russian).
 25. Lobachevskiy Ya.P., Starovoytov S.I., Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S. Tsifrovye tekhnologii v pochvoobrabotke [Digital technologies in tillage]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2019. N1(30). 191-197 (In Russian).
 26. Kurbanov R.K., Kostomakhin M.N., Zakharova N.I., et al. Rekomendatsii dlya legkikh bespilotnykh letatel'nykh apparatov po sboru dannykh [Recommendations for light unmanned aerial vehicles for data collection]. *Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont*. 2018. N6. 47-53 (In Russian).
 27. Artyushin A.A., Kurbanov R.K., Marchenko L.A., Zakharova O.M. Vybory tiporazmernogo ryada bespilotnykh letatel'nykh apparatov i poleznoy nagruzki dlya monitoringa sel'skokhozyaystvennykh poley [Selection of a standard-sized range of unmanned aerial vehicles and payloads for monitoring agricultural fields]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019. N4(37). 36-43 (In Russian).
 28. Kurbanov R., Litvinov M. Development of a gimbal for the Parrot Sequoia multispectral camera for the UAV DJI Phantom 4 Pro. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Rostov-on-Don, 20–22 october 2020*. Rostov-on-Don: 2020. 012062.
 29. Kurbanov R., Zakharova N., Sidorenko V., Vilyunov S. The Use of Vegetation Indices in Comparison to Traditional Methods for Assessing Overwintering of Grain Crops in the Breeding Process. *Advances in Artificial Systems for Power Engineering II: Conference proceedings, Moscow, 17-19 december 2021*. Moscow: Springer Nature Switzerland AG. 2022. 52-64.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Лебедева В.В. – литературный анализ, разработка теоретических предпосылок, обработка результатов экспериментов, доработка текста;

Лебедев И.В. – разработка программного обеспечения для движения БПЛА и построения траекторий покрытия, формирование общих выводов, проведение экспериментов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Lebedeva V.V. – literature review, development of theoretical premises, processing the experimental results, manuscript revision;

Lebedev I.V. – development of software for UAV movement and construction of coverage trajectories, formulating general conclusions, and conducting the experiments.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

31.05.2022

28.07.2022