

CONSTRUCTION OF A UAV FLIGHT TRAJECTORY FOR MONITORING AGRICULTURAL LAND

A. S. Rodionov^{*,**}, T. A. Matkurbanov^{**}, U. B. Khairullaev^{**}

^{*}Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
630090, Novosibirsk, Russia,

^{**}Novosibirsk State University,
630090, Novosibirsk, Russia

DOI: 10.24412/2073-0667-2025-1-5-17

EDN: XFUXBA

When using agricultural lands, one of the tasks is to monitor their condition, in particular soil moisture and the quality of crops. For monitoring, various types of sensors are used, data from which must be periodically transmitted to the processing center. It is not economically feasible to create a wired network of sensors; wireless technologies are used. The lifetime of the sensor network is determined by the battery discharge rate. The least energy consuming is data transmission on demand. In conditions of extensive farmland, such collection can be organized using unmanned aerial vehicles (UAVs). In turn, the cost of collecting data using a UAV is determined by the length of the chosen route. The problem of constructing an optimal flight path for data collection is considered. There may be a shortage of fuel (battery charge in the case of an electric motor) of the UAV and it is necessary to lay out several routes of limited length, the total length of which is minimal. This paper solves the problem of optimizing the trajectory of an individual UAV. An essential feature of the problem is the ability to simultaneously collect data from several sources within the radio visibility radius, which eliminates the need to fly up to each of the sensors. The paper experimentally compares two approaches to solving the problem: solving the traveling salesman problem using previously found points and removing from the list of unvisited points those points that are within the visibility of the next visited one. It is shown that in the latter case, the algorithm that solves the classical traveling salesman problem better may be inferior to a faster and less accurate algorithm for solving the classical problem. **Keywords:** sensor, UAV, traveling salesman problem, algorithm, optimal route, programming.

Key words: sensor, UAV, traveling salesman problem, algorithm, optimal route.

References

1. Srivastava K., Pandey P. C., Sharma J. K. An Approach for Route Optimization in Applications of Precision Agriculture Using UAVs // *Drones*. 2020. V. 4. N 3. [Electron. res.]: <https://www.mdpi.com/2504-446X/4/3/58>.
2. Cabreira T. M., Brisolaro L. B., Ferreira Jr. P. R. Survey on Coverage Path Planning with Unmanned Aerial Vehicles // *Drones*. 2019. V. 3. N 1. [Electron. res.]: <https://www.mdpi.com/2504-446X/3/1/4>.
3. Moses B., Jain L., Finn R., Drake S. Multiple UAVs path planning algorithms: A comparative study // *Fuzzy Optimization and Decision Making*. 2008. 04. V. 7. P. 257–267.
4. Mannan A., Obaidat M. S., Mahmood K., Ahmad A., Ahmad R. Classical versus reinforcement learning algorithms for unmanned aerial vehicle network communication and coverage path planning:

A systematic literature review // *International Journal of Communication Systems*. 2023. V. 36. N 5. P. e5423. [Electron. res.]: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/dac.5423>.

5. Khoufi I., Laouiti A., Adjih C. A Survey of Recent Extended Variants of the Traveling Salesman and Vehicle Routing Problems for Unmanned Aerial Vehicles // *Drones*. 2019. 08. V. 3. P. 66.

6. Timoshenko A.V. i dr. Sposob postroeniya "suboptimal'nyh" marshrutov monitoringa raznotipnyh istochnikov bespilotnym letatel'nyim apparatom // *Trudy MAI*. 2020. N 111. S. 10.

7. de Berg M., Bodlaender H.L., Kisfaludi-Bak S., Kolay S. An ETH-Tight Exact Algorithm for Euclidean TSP // *SIAM Journal on Computing*. 2023. V. 52. N. 3. P. 740–760.

8. Pekár J., Brezina I., Jaroslav K., Ushakova I., Dorokhov O. Computer tools for solving the traveling salesman problem // *Development Management* 2020. 06. V. 18. P. 25–39. [Electron. res.]: [https://doi.org/10.21511/dm.18\(1\).2020.03](https://doi.org/10.21511/dm.18(1).2020.03).

9. Karkory F. A., Abudalmola A. A. Implementation of Heuristics for Solving Travelling Salesman Problem Using Nearest Neighbour and Minimum Spanning Tree Algorithms // *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering*. 2013. V. 7. P. 1524–1534. [Electron. res.]: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:56966538>.

10. Ivanov S.V. Metodika postroeniya suboptimal'nyh marshrutov dlya gruppy bespilotnyh letatel'nyh apparatov na osnove bioinspirirovannyh algoritmov pri nalichii prepyatstviy // *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*. 2022. N 2. S. 1–23.

11. Budaev D.S. i dr. Mul'tiagentnaya sistema soglasovannogo upravleniya gruppoj bespilotnyh letatel'nyh apparatov // *Trudy XVIII Mezhdunarodnoj konferencii "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnyh sistemah"*. Samara. 2016. S. 180–190.

12. Abdulkarim H., Alshammari I.F. Comparison of Algorithms for Solving Traveling Salesman Problem // *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2015. 08. V. ISSN. P. 2249–8958.

13. Helsgaun K. An effective implementation of the Lin-Kernighan traveling salesman heuristic // *European Journal of Operational Research* 2000. V. 126. N 1. P. 106–130. [Electron. res.]: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221799002842>.

14. Alekhin R. A. i dr. Obzor metaevristicheskikh metodov optimizacii, primenyaemyh pri reshenii elektroenergeticheskikh zadach // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2019. N 3 (63). S. 6–19.

15. Lyu V. Metody planirovaniya puti v srede s prepyatstviyami (obzor) // *Matematika i matematicheskoe modelirovanie*. 2018. N 1. S. 15–58.

16. Semenov S. S. i dr. Analiz trudoemkosti razlichnyh algoritmicheskikh podhodov dlya resheniya zadachi kommivoyazhera // *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*. 2017. N 1. S. 116–131.

17. Sahin M. Solving TSP by using combinatorial Bees algorithm with nearest neighbor method // *Neural Computing and Applications*. 2022. 10. V. 35.

18. Sargolzaei A., Abbaspour A., Crane C.D. Control of Cooperative Unmanned Aerial Vehicles: Review of Applications, Challenges, and Algorithms // *Optimization, Learning, and Control for Interdependent Complex Networks* / ed. by Amini M.H. Cham: Springer International Publishing, 2020. P. 229–255. [Electron. res.]: https://doi.org/10.1007/978-3-030-34094-0_10.

19. Zhuk A. A., Bulojchik V.M., Akulich S.V. Planirovanie optimal'nogo marshruta dvizheniya bespilotnogo letatel'nogo apparata po kriteriyu minimuma obshchego raskhoda topliva // *Sistemnyj analiz i prikladnaya informatika*. 2022. N 3. S. 43–49.

ПОСТРОЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ ПОЛЕТА БПЛА ДЛЯ МОНИТОРИНГА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ

А. С. Родионов^{*,**}, Т. А. Маткурбанов^{**}, У. Б. Хайруллаев^{**}

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия

**Новосибирский государственный университет,
630090, Новосибирск, Россия

УДК 65.012

DOI: 10.24412/2073-0667-2025-1-5-17

EDN: XFUXBA

При использовании сельскохозяйственных земель одной из задач является мониторинг их состояния, в частности увлажнения почвы и качества посевов. Для мониторинга используются датчики различного типа, данные с которых необходимо периодически передавать в центр обработки. Проводную сеть датчиков создавать экономически нецелесообразно, используются беспроводные технологии. Время жизни сети датчиков определяется скоростью разряда батарей. Наименее энергозатратной является передача данных по запросу. В условиях обширных сельхозугодий такой сбор возможно организовать с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В свою очередь, затраты на облет датчиков с целью сбора данных определяются длиной выбранного маршрута. Рассматривается задача построения оптимальной траектории облета для сбора данных. Возможна нехватка горючего (заряда батареи в случае электромотора) БПЛА, и требуется проложить несколько маршрутов ограниченной длины, суммарная длина которых минимальна. В данной работе решается задача оптимизации траектории отдельного БПЛА. Ставится задача, аналогичная задаче коммивояжера. Существенной особенностью является возможность одновременного сбора данных от нескольких источников в пределах радиуса радиовидимости, что избавляет от необходимости подлета к каждому из датчиков. В работе экспериментально сравниваются два подхода к решению задачи: решение задачи коммивояжера по предварительно найденным точкам и с удалением из списка непосещенных тех точек, которые находятся в пределах видимости от очередной посещенной. Показано, что в последнем случае алгоритм, лучше решающий классическую задачу коммивояжера, может уступать более быстрому и менее точному алгоритму решения классической задачи.

Ключевые слова: мониторинг, БПЛА, задача коммивояжера, алгоритм, оптимальный маршрут.

Введение. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) становятся все более значимыми в области мониторинга сельскохозяйственного производства и биологического контроля. Однако работа БПЛА в сельскохозяйственных районах сталкивается с уникальными проблемами и сложностями.

Основная цель заключается в поиске наиболее подходящего пути облета мест расположения датчиков с совпадающими начальной и конечной точками с учетом ограничений,

накладываемых рельефом и мощностью приемо-передающей аппаратуры, определяющими зоны радиовидимости.

Важно отметить, что выбор конкретного метода для решения задачи маршрутизации БПЛА в сельскохозяйственных районах зависит от множества факторов, таких как размер области, количество точек, ограничения и требования задачи, доступные вычислительные ресурсы и другие [1–3].

Для решения задачи маршрутизации БПЛА в сельскохозяйственных районах могут использоваться различные методы и алгоритмы. Классический подход включает в себя методы динамического программирования, жадные алгоритмы, алгоритмы поиска с возвратом и генетические алгоритмы [4]. Эти методы могут использоваться для поиска оптимального маршрута БПЛА, учитывая ограничения, такие как препятствия, временные ограничения, требования к сбору данных и другие факторы.

Часто применяется комбинация различных методов и алгоритмов для достижения наилучших результатов. Для решения задачи коммивояжера, имеющей доказанную NP-трудность, были разработаны различные приближенные и эвристические алгоритмы. Эти алгоритмы стремятся найти оптимальный маршрут, который минимизирует длину или время полета, учитывая ограничения и цели задачи маршрутизации БПЛА [5]. В зависимости от размера области, учета возможного получения информации от датчиков на некотором удалении, плотности расположения этих датчиков, т. е. возможности получения данных от нескольких датчиков при нахождении БПЛА в одной точке и других условий, включая рельеф и запретные подобласти, используются различные точные и эвристические алгоритмы [6]. Последние необходимы в силу NP сложности задачи при достаточно большом охвате территории и многих датчиков. В статье [5] рассматриваются эвристические алгоритмы решения задачи коммивояжера в классической постановке, в статье [2] рассматриваются модификации, связанные с учетом конфигурации территории, т. е. наличием подобластей, свободных от датчиков и/или запретных для полетов БПЛА. В статье [7] приведены алгоритмы нахождения маршрута, позволяющего взять данные на расстоянии от датчиков, так называемые алгоритмы облета кругов.

В статьях [8–13] решение задачи TSP рассматривается эвристическими методами, в частности методом ближайшего соседа и жадным алгоритмом. В статьях [14] и [15] приведены результаты использования эвристических алгоритмов оптимизации маршрутов путем использования генетических и иных био-инспирированных алгоритмов. Выбор конкретного метаэвристического алгоритма зависит от контекста задачи, требований и ограничений, а также доступных вычислительных ресурсов [16]. Во многих из перечисленных исследований для решения оптимизационных задач использовалось специализированное программное обеспечение, в частности, среда MatLab [17].

Одной из практически реализуемых задач, в которых можно применять алгоритмы для решения задачи коммивояжера, является поиск целевых объектов с помощью группы БПЛА. В такой постановке задачи особенностью является высокая динамика и влияние внешней среды на объекты во время выполнения задачи [18].

Мы представляем результаты проведенных исследований, связанных с разработкой компьютерных программ и программного обеспечения для решения задачи TSP в специальной постановке, а именно учета возможности одновременного обслуживания нескольких близко находящихся пунктов, что соответствует радиовидимости датчиков. Также показано удобство среды Google Colab для моделирования системы сбора данных с датчиков с применением различных алгоритмов маршрутизации БПЛА.



Рис. 1. Использование БПЛА при мониторинге сельскохозяйственных земель

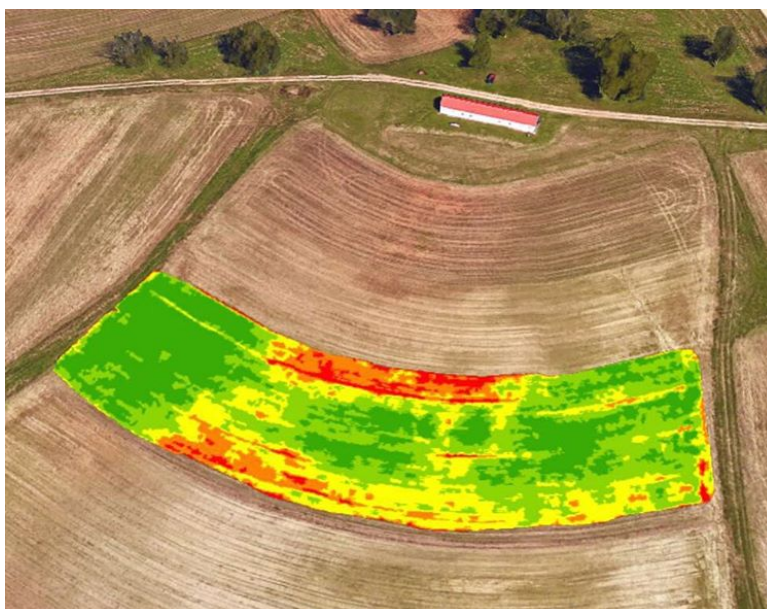


Рис. 2. Изображение зоны расположения датчиков на основе компьютерной томографии

В работе экспериментально сравниваются два подхода к решению задачи: решение задачи коммивояжера по предварительно найденным точкам и с удалением из списка непосещенных тех точек, которые находятся в пределах видимости от очередной посещенной. Последняя постановка позволяет, в частности, динамически определять траекторию в случае наличия подвижных датчиков (считаем, что скорость перемещения датчиков существенно ниже скорости полета БПЛА). Была проведена сравнительная оценка вычислительной эффективности предложенных алгоритмов, основанных на алгоритмах ближайшего соседа и оптимального соседа.

1. Методы исследования. В данной работе основное внимание уделяется решению задачи коммивояжера в условиях сельской местности, т.е. возможности использования произвольных маршрутов между пунктами. В качестве модели используется полный ори-

ентированный граф, где существуют взвешенные ребра между каждой парой пунктов, и затраты на пролет между ними не зависят от направления движения. БПЛА проходит каждую вершину графа только один раз. Считается, что взлет и посадка происходят на одной и той же площадке.

Эффективность построения маршрута зависит от количества пунктов, через которые необходимо пройти, и радиуса, в пределах которого возможно обслуживание нескольких пунктов. Методика построения субоптимального маршрута может быть реализована следующим образом.

Определяются зоны облета БПЛА и точка истока (начала маршрута) на земной поверхности. Вычисляется минимальное расстояние от каждого БПЛА группы до точки истока. Расстояние от точки нахождения БПЛА (x_s, y_s) до ближайшего пункта (x_r, y_r) рассчитывается по классической формуле расстояния между двумя точками в евклидовой плоскости. Аналогично рассчитываются все расстояния d_{ij} между парами пунктов.

Далее решается модифицированная задача коммивояжера, где критерием оптимальности, который необходимо минимизировать, является длина пути полета по маршруту с учетом возможности одновременного обслуживания нескольких близко находящихся пунктов. Для решения этой задачи предлагается использовать метод “оптимального соседа”, являющийся расширением известного метода “ближайшего соседа”. В отличие от этого известного метода, рассматриваются все двухшаговые переходы, на основании сравнения длин которых делается ОДИН переход, после чего операция повторяется. Всего на первом шаге рассматривается n^2 вариантов. На втором шаге рассматривается уже $(n - 1)^2$ вариантов и т. д. По известной формуле суммы квадратов первых n чисел натурального ряда имеем

$$N = \frac{n(n + 1)(2n + 1)}{6} \quad (1)$$

рассмотренных вариантов. Таким образом, алгоритм имеет сложность $O(n^3)$.

2. Учет радиовидимости при сборе данных. Учет радиовидимости заключается в исключении из рассмотрения коротких переходов в пределах заданного радиуса. Это возможно выполнить как за счет предварительного выбора точек из представленного набора, так и динамически, исключая близкие точки после каждого перехода.

Для первого варианта представлен эвристический алгоритм, основная идея которого заключается в предварительном разбиении множества точек на группы, находящиеся достаточно близко друг от друга для возможности одновременного обслуживания. При этом учитывается, что при неполном переборе такая группа может покрываться кругом большего, чем требуется, радиуса, на основе экспериментов предложено выбирать в группе несколько точек в зависимости от ее объема. Далее для найденных точек используется один из алгоритмов решения задачи коммивояжера, например, оптимального соседа, формальное описание которого представлено ниже (Алгоритм 1).

Во втором варианте при поиске маршрута динамически, после каждого перехода, из рассмотрения исключаются точки, находящиеся в зоне радиовидимости от очередной точки маршрута. Схема алгоритма в этом случае приобретает следующий вид (Алгоритм 2). Отметим, что это алгоритмы верхнего уровня, определение очередной точки маршрута осуществляется в соответствии с выбранным алгоритмом решения задачи коммивояжера. В нашем случае рассматриваются: алгоритм оптимального соседа (ОСС для предварительного нахождения точек и ОСД в динамике), алгоритм ближайшего соседа (ОБС и

Алгоритм нахождения точек псевдооптимального пути

Ввод списка точек

Вычисление матрицы расстояний `distmatrix` с помощью `distance_matrix(points,points)`

Определение порогового расстояния `thresholddistance`

Группировка близких точек создание `groups` (список) и `visited` (множество)

for all $i \in points$ **do**

if $i \notin visited$ **then**

 Создать `group` и добавить в него i

for $j = i + 1$ **to** n **do**

if $distmatrix[i,j] \leq thresholddistance$ **then**

 Добавить j в `group`

 Добавить j в `visited`

end if

 Добавить `group` в `groups`

end for

end if

end for

Выбор оставшихся точек: создать `points2select` (множество)

for all $group \in groups$ **do**

 Добавить произвольную точку из `group` в `points2select`

if $\|group\| \geq 4 \wedge \|group\| < 6$ **then**

 Добавить вторую

else if $\|group\| \geq 6$ **then**

 Добавить третью

end if

end for

Визуализация

ОБД, соответственно) и алгоритм двухшагового перехода (ДШС и ДШД, соответственно)

В конкретном примере радиус радиовидимости может быть принят равным 10 м, что соответствует применению технологии ZigBee. Однако, численные эксперименты проводились и для больших радиусов что, соответствует возможному применению других, более мощных устройств приема-передачи данных.

3. Результаты экспериментов.

3.1. *Выбор вычислительной платформы и исходных данных.* Для проведения экспериментов использовалась платформа Google Colab, так как это облегчает проверку программы и обеспечивает высокую вычислительную эффективность. При выборе стандартного программного обеспечения учитывалась его функциональность и доступность. Для реализации алгоритмических модулей использовался язык Python как наиболее удобный в данном контексте. Однако следует отметить, что программный продукт, написанный на этом языке, подходит для быстрых компьютеров с мощным процессором или платформ для высокоскоростных онлайн-вычислений.

Архитектура разработанного программного обеспечения является открытой и позволяет расширение его функциональных возможностей. На предварительном этапе генери-

Алгоритм нахождения псевдооптимального пути

Ввод списка точек $Points$, $n = Lenth(Points)$

Вычисление матрицы расстояний $distmatrix$ с помощью $distance_matrix(points,points)$

Определение порогового расстояния $thresholddistance$

Задание начальной точки

while $i \leq n$ **do**

 Нахождение следующей точки k выбранным алгоритмом,
 например, оптимального соседа

 включение k в $visited$

for $i \notin visited$ **do**

if $distmatrix[k,i] \leq thresholddistance$ **then**

 Исключение точки i из $Points$

$n := n - 1$

end if

end for

end while

Замыкание маршрута возвратом в исходную точку

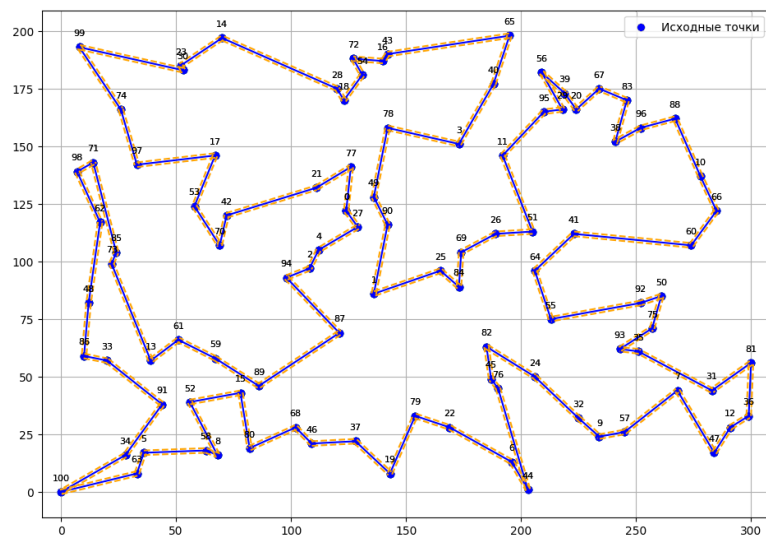


Рис. 3. Маршрут, полученный решением задачи коммивояжера методом оптимального соседа. Длина 2197,98

руются равномерно расположенные на прямоугольной области точки, соответствующие пунктам сбора данных. Рис. 3 показывает расширенную структурную схему алгоритма работы программы маршрутизации БПЛА на основе полученных координат точек.

Предложенные алгоритмы реализованы на языке Python.

Для иллюстрации работы алгоритмов было сгенерировано 100 случайных точек в области 300x200. Методом оптимального соседа (рис. 3) получен путь длины 2197,98. В экспериментах радиус видимости варьировался от 5 до 50 с шагом 5 при использовании того же расположения точек на плоскости.

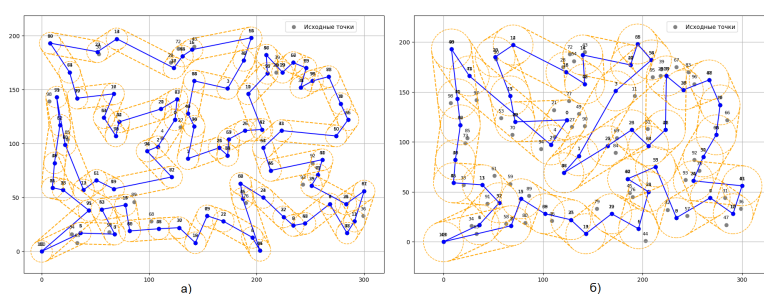


Рис. 4. Маршруты, полученные алгоритмом ОСС: а) радиус видимости 10 (длина 2122,12) и б) радиус видимости 20 (длина 1790,79)

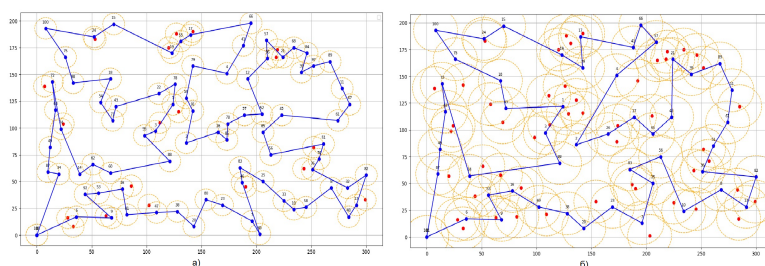


Рис. 5. Маршруты, полученные алгоритмом ОСД: а) радиус видимости 10 (длина 2122,43) и б) радиус видимости 20 (длина 1799,46)

Для получения средних значений для каждого радиуса проводилось 100 экспериментов со случайным расположением 100 точек на той же области.

3.2. *Сравнение алгоритмов с предварительным нахождением точек маршрута и с динамическим их определением.* На рис. 4 приведены маршруты, полученные эвристическим алгоритмом предварительного выбора возможных точек маршрута для радиусов 10 и 20, соответственно, с применением метода ближайшего соседа, а на рис. 5 приведены маршруты, полученные динамическим алгоритмом выбора точек маршрута для тех же радиусов и того же базового алгоритма. Можно сделать вывод, что исключение предварительного нахождения маршрута незначительно влияет на качество решения.

В табл. 1 и 2 приведены усредненные результаты численных экспериментов для 100 случайно выбранных точек на области 300×200 м при радиусе видимости 10, 20 и 30 метров, 100 и 1000 экспериментов для каждого радиуса.

Можно сделать вывод, что длина маршрута минимальна при применении алгоритма оптимального соседа в случае предварительного определения множества возможных точек маршрута, но при этом требуется самое большое время счета. Разница качества решения как по длине маршрута, так и по количеству посещенных точек для алгоритмов двухшагового перехода и ближайшего соседа при предварительном определении множества возможных точек и при динамическом нахождении очередной точки незначительна, но динамический вариант требует меньше времени для расчетов. В случае использования алгоритма оптимального соседа динамическое определение точек маршрута существенно быстрее, но заметно проигрывает по его длине. Метод ближайшего соседа ожидаемо дает худший результат по длине маршрута как при предварительном определении множества возможных точек, так и при динамическом нахождении очередной точки. Также очевид-

Таблица 1

Результаты при радиусе видимости 10, 20 и 30 метров, 100 экспериментов

алгоритм	радиус	длина пути	посещенных точек	время счета
ДЖД	10	2314,67	80,82	6,59
	20	1962,93	50,87	2,08
	30	1613,04	32,48	0,80
ДШС	10	2320,16	79,23	6,08
	20	1987,30	50,13	2,06
	30	2314,79	79,68	64,60
БСД	10	2383,26	80,65	0,49
	20	2053,22	51,46	0,29
	30	1723,70	32,48	0,20
БСС	10	2366,65	80,23	0,37
	20	2041,32	51,18	0,26
	30	1725,32	32,46	0,19
ОСД	10	2356,92	80,05	0,33
	20	2026,07	54,58	0,22
	30	1739,27	33,44	0,18
ОСС	10	2059,07	79,29	10,43
	20	1782,30	50,52	3,90
	30	1499,51	31,34	1,76

Таблица 2

Результаты при радиусе видимости 10, 20 и 30 метров, 1000 экспериментов

алгоритм	радиус	длина пути	посещенных точек	время счета
ДЖД	10	2309,95	80,64	67,50
	20	1963,00	51,05	23,15
	30	1620,49	32,44	8,88
ДШС	10	2314,79	79,68	64,60
	20	1971,64	50,22	23,31
	30	1628,51	31,48	9,81
БСД	10	2375,79	80,67	4,16
	20	2049,32	51,07	2,62
	30	1733,81	32,53	2,73
БСС	10	2364,59	80,62	3,76
	20	2067,10	51,21	2,80
	30	1726,73	32,47	2,15
ОСД	10	2348,52	80,22	3,24
	20	2041,52	51,77	5,46
	30	1723,92	33,58	1,73
ОСС	10	2055,88	79,75	105,41
	20	1784,65	50,26	42,24
	30	1496,31	31,47	17,13

на существенная разница длин маршрутов для различных случайных размещений точек: усреднение по 1000 экспериментов дает заметно отличные результаты от усреднения по 100, при этом увеличение времени счета пропорционально.

Заключение. В этой статье мы изучили проблему проектирования траектории БПЛА, пролетающего над сельской местностью. Мы сформулировали задачу оптимизации для поиска минимального пути, сгруппированного в нескольких географических точках. На основе проведенного обзора выбраны и реализованы алгоритмы решения задачи коммивояжера для маршрутизации БПЛА. Результаты моделирования показывают получение надежных решений. На основе проведенных экспериментов показано, что алгоритм оптимального соседа дает в среднем порядка 10 % выигрыш в пройденном пути по сравнению с алгоритмом ближайшего соседа.

В ходе работы был создан программный комплекс, предлагающий оптимальную траекторию полета БПЛА на основе нескольких параметров. Моделирование алгоритма и тестирование полученного приложения проводились на платформе Google Colab. В дальнейшем этот программный комплекс может быть использован в транспортных вопросах, в работах по построению минимальных траекторий.

В части развития алгоритмов маршрутизации БПЛА при облете территории для сбора данных с датчиков будут исследованы алгоритмы нахождения минимального множества точек, облет которых позволит собрать данные со всех датчиков с учетом радиуса радиовидимости БПЛА, а также будет проведена разработка дальнейших модификаций алгоритмов решения задачи коммивояжера.

Выражаем признательность сотрудникам лаборатории системного моделирования и оптимизации Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН, оказавшим практическую поддержку исследованиям нового алгоритма.

Список литературы

1. Srivastava K., Pandey P. C., Sharma J. K. An Approach for Route Optimization in Applications of Precision Agriculture Using UAVs // *Drones*. 2020. V. 4. N 3. [Electron. res.]: <https://www.mdpi.com/2504-446X/4/3/58>.
2. Cabreira T. M., Brisolaro L. B., Ferreira Jr. P. R. Survey on Coverage Path Planning with Unmanned Aerial Vehicles // *Drones*. 2019. V. 3. N 1. [Electron. res.]: <https://www.mdpi.com/2504-446X/3/1/4>.
3. Moses B., Jain L., Finn R., Drake S. Multiple UAVs path planning algorithms: A comparative study // *Fuzzy Optimization and Decision Making*. 2008. 04. V. 7. P. 257–267.
4. Mannan A., Obaidat M. S., Mahmood K., Ahmad A., Ahmad R. Classical versus reinforcement learning algorithms for unmanned aerial vehicle network communication and coverage path planning: A systematic literature review // *International Journal of Communication Systems*. 2023. V. 36. N 5. P. e5423. [Electron. res.]: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/dac.5423>.
5. Khoufi I., Laouiti A., Adjih C. A Survey of Recent Extended Variants of the Traveling Salesman and Vehicle Routing Problems for Unmanned Aerial Vehicles // *Drones*. 2019. 08. V. 3. P. 66.
6. Тимошенко А. В. и др. Способ построения «субоптимальных» маршрутов мониторинга разнотипных источников беспилотным летательным аппаратом // *Труды МАИ*. 2020. № 111. С. 10.
7. de Berg M., Bodlaender H. L., Kisfaludi-Bak S., Kolay S. An ETH-Tight Exact Algorithm for Euclidean TSP // *SIAM Journal on Computing*. 2023. V. 52. N 3. P. 740–760.

8. Pekár J., Brezina I., Jaroslav K., Ushakova I., Dorokhov O. Computer tools for solving the traveling salesman problem // *Development Management* 2020. 06. V. 18. P. 25–39. [Electron. res.]: [https://doi.org/10.21511/dm.18\(1\).2020.03](https://doi.org/10.21511/dm.18(1).2020.03).

9. Karkory F. A., Abudalmola A. A. Implementation of Heuristics for Solving Travelling Salesman Problem Using Nearest Neighbour and Minimum Spanning Tree Algorithms // *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering*. 2013. V. 7. P. 1524–1534. [Electron. res.]: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:56966538>.

10. Иванов С. В. Методика построения субоптимальных маршрутов для группы беспилотных летательных аппаратов на основе биоинспирированных алгоритмов при наличии препятствий // *Системы управления, связи и безопасности*. 2022. № 2. С. 1–23.

11. Будаев Д. С. и др. Мультиагентная система согласованного управления группой беспилотных летательных аппаратов // *Труды XVIII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах»*. Самара. 2016. С. 180–190.

12. Abdulkarim H., Alshammari I. F. Comparison of Algorithms for Solving Traveling Salesman Problem // *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2015. 08. V. ISSN. P. 2249–8958.

13. Helsingaun K. An effective implementation of the Lin-Kernighan traveling salesman heuristic // *European Journal of Operational Research* 2000. V. 126. N 1. P. 106–130. [Electron. res.]: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221799002842>.

14. Алехин Р. А. и др. Обзор метаэвристических методов оптимизации, применяемых при решении электроэнергетических задач // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2019. № 3 (63). С. 6–19.

15. Лю В. Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) // *Математика и математическое моделирование*. 2018. № 1. С. 15–58.

16. Семенов С. С. и др. Анализ трудоемкости различных алгоритмических подходов для решения задачи коммивояжера // *Системы управления, связи и безопасности*. 2017. № 1. С. 116–131.

17. Sahin M. Solving TSP by using combinatorial Bees algorithm with nearest neighbor method // *Neural Computing and Applications*. 2022. 10. V. 35.

18. Sargolzaei A., Abbaspour A., Crane C. D. Control of Cooperative Unmanned Aerial Vehicles: Review of Applications, Challenges, and Algorithms // *Optimization, Learning, and Control for Interdependent Complex Networks* / ed. by Amini M. H. Cham: Springer International Publishing, 2020. P. 229–255. [Electron. res.]: https://doi.org/10.1007/978-3-030-34094-0_10.

19. Жук А. А., Булойчик В. М., Акулич С. В. Планирование оптимального маршрута движения беспилотного летательного аппарата по критерию минимума общего расхода топлива // *Системный анализ и прикладная информатика*. 2022. № 3. С. 43–49.



Алексей Сергеевич Родионов

получил диплом Инженера-математика в Новосибирском электротехническом институте по направлению «Прикладная математика» в 1976 г. Закончил аспирантуру ВЦ СО АН СССР в 1980. Получил степень кандидата технических наук в 1984 году и степень доктора наук в области «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» в 2003 году в Институте

вычислительной математики и математической геофизики СО РАН.

Он является руководителем лаборатории «Системного моделирования и оптимизации» ИВМ и МГ СО РАН. Алексей Сергеевич читает лекции по компьютерному моделированию в качестве профессора Новосибирского государственного университета и Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики.

Его основные научные интересы — компьютерное моделирование и надежность сетей.

С 2016 года по настоящее время он является председателем секции R8 IEEE России по Сибири.

Alexey Rodionov received his Eng. Dipl. degree in Applied Mathematics from the Institute of electrical engineering, Novosibirsk, Russia in 1976, and his Ph.D. (Candidate of science) degree in the field of software engineering (in Russian classification, “Software of computing machines, complexes, systems and networks”) in 1984, and Doctor of Science degree in the field of “Mathematical modeling, numerical methods and program complexes” in 2003, both from the Institute of Computational mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

He is the head of the Laboratory “System modeling and optimization” of the named institute. Alexey gives lectures on computer simulation as professor of Novosibirsk state university, and Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences.

His main scientific interests are computer simulation, and network reliability. From 2016 till now he is the Chair of the R8 IEEE Russia Siberia Section.

Маткурбанов Тулкин

Алимбоевич — аспирант Новосибирского государственного университета, обучается по специальности «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» на кафедре «Компьютерные системы». В 2014 году окончил магистратуру Ташкентского университета информационных технологий по специальности «Мобильные системы связи». Его научные интересы охватывают телекоммуникационные системы, системы слежения и управления дви-



жущимися объектами, сенсорные сети, управление проектами и программирование. E-mail: t.matkurbanov@g.nsu.ru.

Matkurbanov Tulkin Alimbovich is a PhD student at Novosibirsk State University, specializing in “Mathematical Modeling, Numerical Methods, and Software Complexes” at the Department of Computer Systems. In 2014, he graduated from the Tashkent University of Information Technologies with a master’s degree in Mobile Systems of Communication. His research interests include telecommunication systems, tracking and control of moving objects, sensor networks, project management, and programming. E-mail: t.matkurbanov@g.nsu.ru.



Хайруллаев Учкун Ба-

ходирович — аспирант Новосибирского государственного университета по специальности «Искусственный интеллект и машинное обучение». В 2023 году окончил магистратуру Но-

восибирского государственного университета по специальности «Прикладная математика и информатика». Его исследовательские интересы включают разработку научного программного обеспечения, искусственный интеллект, машинное обучение, управление проектами, программирование. E-mail: u.khairullaev@g.nsu.ru.

Khairullaev Uchkun Bakhodirovich — is PhD student of Novosibirsk State University in the specialty “Artificial Intelligence and Machine Learning”. In 2023, he graduated from the Master’s program of Novosibirsk State University in the specialty “Applied Mathematics and Computer Science”. His research interests include scientific software development, artificial intelligence, machine learning, project management, programming. E-mail: u.khairullaev@g.nsu.ru.

Дата поступления — 20.02.2025