

ФОРМИРОВАНИЕ МАРШРУТА ОБЛЕТА ПЛОЩАДНОГО ОБЪЕКТА С УЧЕТОМ ГЕОМЕТРИИ ЗОНЫ ВИДИМОСТИ БПЛА

С.А.К. Диане

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: diane1990@yandex.ru

Е.А. Ерогодский

МИРЭА - Российский технологический университет
Россия, 119454, Москва, Вернадского просп., 78
E-mail: erogodsky93@gmail.com

Е.А. Лесив

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: lesivEA@yandex.ru

В.К. Капитонец

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: vikapitonets01@mail.ru

Ключевые слова: планирование маршрута, управление БПЛА, мониторинг местности, дискретная оптимизация

Аннотация: В работе анализируются исследования, посвященные мониторингу площадных объектов с применением БПЛА. Дана формализованная постановка задачи облета участка местности БПЛА с зоной видимости, представляемой в виде многоугольника. Предложен алгоритм поиска маршрута на графе местности, учитывающий взаимное расположение опорных точек местности и зоны видимости в процессе имитационного моделирования движения БПЛА. Описаны результаты проведенных в виртуальной среде экспериментов по проверке работоспособности предложенного подхода для двух типовых ситуаций расположения БПЛА относительно исследуемого участка местности. Обсуждаются особенности алгоритма и перспективы применения предложенного способа планирования маршрута БПЛА в ряде прикладных областей.

1. Введение

В современном мире использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) становится все более актуальным в различных областях, включая геодезию, картографию, геологию, сельское хозяйство и т. д. В данном контексте, формирование оптимальной траектории облета площадных объектов является важной задачей. Одним

из факторов, оказывающих значительное влияние на выбор маршрута, является геометрия зоны видимости БПЛА.

Задача формирования траектории облета площадного объекта аналогична задаче коммивояжера, где требуется найти оптимальный маршрут, проходящий через все точки наблюдения. Для приближенного решения данной задачи можно применить метод поиска на в глубину на графе местности (в сочетании с эвристиками предпочтения ближайших непосещенных вершин и правилом левой руки) [1], метод бегущей волны (алгоритм Ли), основанный на идее динамического программирования [2] или же муравьиный алгоритм в рамках парадигмы агентного моделирования [3].

Для формирования графа местности по контурам выбранного участка местности зачастую применяется метод приближенной клеточной декомпозиции [4]. Формируемые при этом ячейки обычно принимают вид квадратов, но также могут быть представлены в треугольной либо в шестиугольной форме.

При этом дополнительной проблемой, требующей внимания, является необходимость учета геометрии зоны видимости БПЛА. Поскольку площадь зоны видимости многократно превышает площадь фрагментов местности, искомая траектория БПЛА может быть существенно короче, чем при решении классической задачи коммивояжера.

Актуальность рассматриваемой задачи обусловлена в первую очередь потребностями сельскохозяйственной отрасли. Необходимость периодического мониторинга посевов в пределах обозначенной территории и борьбы с вредителями закономерно приводит к выбору квадрокоптера как наиболее удобного в эксплуатации БПЛА, позволяющего оперативно получать снимки местности высокого разрешения.

2. Постановка задачи облета площадного объекта

Пусть местность задается многоугольником $P = \{p_1, \dots, p_N\}$ с геометрическим центром в точке c_p . Местоположение квадрокоптера обозначим как c_q . Угол рысканья квадрокоптера определяется величиной α . Область наблюдаемой поверхности зададим многоугольником $Q = \{q_1, \dots, q_M\}$. Положение области видимости жестко связано с положением квадрокоптера. Пусть также некоторым образом задано множество опорных точек местности, подлежащих осмотру $R = \{r_1, \dots, r_K\}$. Иллюстрация возможного расположения перечисленных объектов приведена на рис. 1.

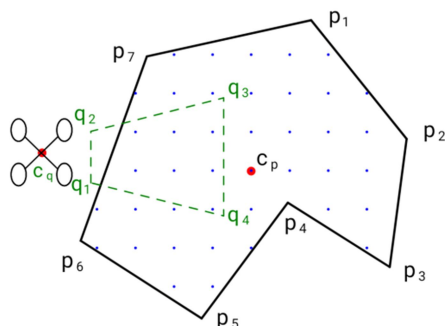


Рис. 1. Пример расположения квадрокоптера вблизи площадного объекта

Требуется определить маршрут движения квадрокоптера $G = \{g_1, \dots, g_L\}$, каждый из опорных узлов которого представляется в виде $g_i = \{r_j, \alpha_j\}$.

Учитывая отдаленность в плоскости земли проекций положения квадрокоптера и зоны видимости его бортовой камеры, становится очевидно, что искомая траектория движения БПЛА будет отличаться от аналогичной траектории, получаемой при рассмотрении БПЛА как материальной точки.

3. Алгоритм поиска маршрута БПЛА

Решение описанной задачи может быть сведено к применению методов дискретной оптимизации, а именно – поиску маршрута на графе местности.

Узлы графа, принадлежащие множеству R , могут быть расставлены по ортогональной сетке с шагом s вблизи геометрического центра участка местности.

Задача облета местности считается выполненной, если все узлы местности, по крайней мере, один раз за время движения квадрокоптера попали в его зону видимости.

Для конкретизации параметров расстановки узлов определим два дополнительных параметра: характеристический размер местности: $d_1 = \max_{p \in P} \|p - c_p\|$ и характеристический размер области видимости: $d_2 = \min_{p, q \in Q} \|p - q\|$.

Тогда алгоритм поиска траектории полета может быть задан в следующей форме:

1. Расчет параметров d_1 и d_2 .
2. Выбор шага разбиения местности $s < d_2 < d_1$.
3. Расстановка опорных точек R на местности в пределах домена $D_0 = [-d_1, d_1] \times [-d_1, d_1] \subset \mathbb{R}^2$ в позициях $(i \cdot s, j \cdot s) \in D_0, i, j \in \mathbb{Z}$.
4. Удаление опорных точек, выходящих за пределы многоугольника P , ограничивающего исследуемый участок местности.
5. Выбор стартовой точки r_0 изначального местоположения БПЛА.
6. Инициализация выходного маршрута $H = \{r_0\}$.
7. Выполнение процедуры поиска первичного маршрута G обхода местности с применением модифицированного алгоритма поиска в глубину на графе.
8. Выполнение процедуры имитационного моделирования, в рамках которой для каждого момента времени t с последовательным изменением на шаг Δt происходит:
 - 8.1. выбор ближайшего к БПЛА неосмотренного опорного узла $h_t = \Psi(p(t)) \in G$;
 - 8.2. если $h_t \notin H_{t-1}$, то добавление данного узла в выходной маршрут: $H_t = H_{t-1}, h_t$;
 - 8.3. расчет вектора направления БПЛА как функции от текущего положения БПЛА и положения целевого узла в формируемом маршруте $\vec{u} = f(p(t), h_t)$;
 - 8.4. пометка узлов местности в пределах зоны видимости БПЛА как осмотренных;
 - 8.5. смещение БПЛА вдоль вектора \vec{u} : $p(t + \Delta t) = p(t) + \vec{u} \cdot v \cdot \Delta t$, где v – скорость БПЛА;
 - 8.6. если расстояние от БПЛА до терминального узла маршрута g_L меньше пороговой величины или все узлы местности являются осмотренными, то конец, иначе переход к п. 8.1;
9. Вывод маршрута H .

Отметим, что в предложенном алгоритме узлы местности играют двоякую роль – с одной стороны, являются элементами траектории БПЛА, а с другой – минимально различимыми фрагментами исследуемой местности.

Следует также пояснить, что на этапе 7 модификация алгоритма обхода графа местности в глубину заключается в разрешении перехода из текущего узла графа в

ближайший неосмотренный узел даже при отсутствии общих дуг. Это требуется для ситуаций, когда соседние все соседние вершины уже имеют статус осмотренных и движение БПЛА в их направлении не принесет новой информации об исследуемом участке местности.

Возможной оптимизацией алгоритма, зависящей от средств программной реализации является объединение этапов 4 и 5. Кроме того, возможно применение более эффективной процедуры поиска первичного маршрута на этапе 7 (например, алгоритма бегущей волны).

4. Программная реализация

Проверка эффективности предложенного алгоритма проводилась за счет выполнения комплекса работ по программной реализации описанных математических моделей, расчетных процедур, а также графического интерфейса на языке Python.

В частности, проводилась визуализации шагов алгоритма планирования маршрута БПЛА в серии экспериментов по имитационному моделированию процесса осмотра площадного объекта.

Была выявлена зависимость длины формируемого маршрута H от начальной точки расположения БПЛА. Так, на рис. 2. представлены фрагменты эксперимента по отработке алгоритма поиска уточненного маршрута при начальном положении БПЛА, сбоку от участка местности вытянутой формы. На рис. 3. представлены фрагменты эксперимента по отработке алгоритма поиска уточненного маршрута при начальном положении БПЛА вблизи торцевой части участка местности вытянутой формы.

В процессе моделирования на экране отображаются как основные элементы математической модели (многоугольник местности, многоугольник зоны видимости, опорные точки местности, опорные точки маршрута БПЛА), так и вспомогательная информация (текущее время моделирования, длина формируемого маршрута, число наблюдаемых в текущий момент узлов местности, общее число осмотренных узлов местности).

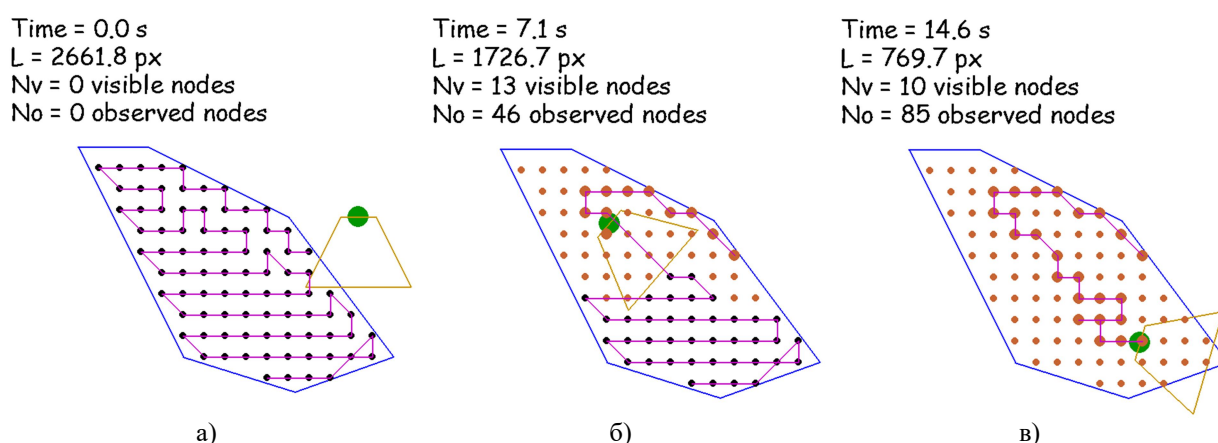
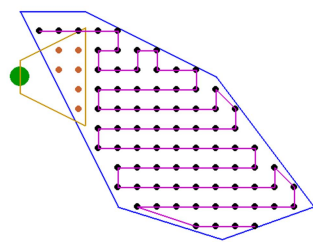


Рис. 2. Этапы построения уточненного маршрута H в процессе имитационного моделирования при первом способе начального расположения БПЛА

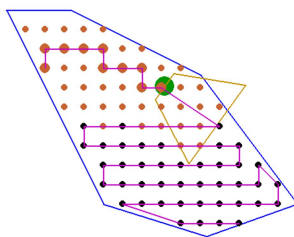
Рис. 2, а) отражает шаг 7 алгоритма, представленного в разделе 3 – сиреневым цветом показан первичный маршрут G . В процессе моделирования в соответствии с шагом 8 алгоритма происходит итеративное сокращение длины маршрута G при построении на его основе маршрута H (рис. 2, б – в). Это пояснение верно и для рис. 3., однако на рис. 3, а) часть точек считается осмотренными уже в момент старта.

Time = 0.0 s
 $L = 2459.7$ px
 $N_v = 6$ visible nodes
 $N_o = 6$ observed nodes



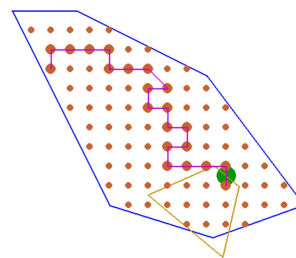
а)

Time = 5.4 s
 $L = 1895.5$ px
 $N_v = 10$ visible nodes
 $N_o = 43$ observed nodes



б)

Time = 11.9 s
 $L = 612.4$ px
 $N_v = 10$ visible nodes
 $N_o = 85$ observed nodes



в)

Рис. 3. Этапы построения уточненного маршрута H в процессе имитационного моделирования при втором способе начального расположения БПЛА

Сравнивая длины маршрута L для рис. 2, а) и рис. 2, в) можно оценить степень сокращения маршрута как $\gamma=3,45$. Аналогично, сравнивая длины маршрута L для рис. 3, а) и рис. 3, в) можно оценить степень сокращения маршрута как $\gamma=4,02$.

5. Заключение

Разработанный в данной работе алгоритм достаточно хорошо справляется с задачей планирования движений БПЛА. Анализируя результаты экспериментов, можно заключить, что первичный маршрут существенно спрямляется за счет учета геометрии зоны видимости БПЛА.

Вместе с тем, предложенный алгоритм не является оптимальным. Если обратить внимание на рис. 2, б), то можно заметить неосмотренную точку в правом нижнем углу. Фактически БПЛА развернулся преждевременно в противоположную от этой точки сторону, не достигнув ее своей зоной видимости. Эта неоптимальность вызвана тем, что приоритет движения по изначально сформированному маршруту обхода местности G выше, чем приоритет движения к ближайшим неосмотренным точкам.

По мнению авторов, решение данной проблемы возможно с привлечением эвристических и интеллектуальных методов выбора предпочтительного направления движения БПЛА в спорных ситуациях. Настройка данных методов потребует участия эксперта из прикладной области, связанной с решаемой задачей.

Список литературы

1. Paulino L., Hannum C., Varde A., Conti C. Search Methods in Motion Planning for Mobile Robots // K. Arai (Ed.): IntelliSys 2021. LNNS. Vol. 296. P. 802–822. 2022.
2. Диане С.А.К., Кузнецов А.В., Степанов Д.В., Акуловский Д.В. Алгоритмы управления движением БПЛА и наземной станции в задачах мониторинга протяженных объектов / Материалы 18-й Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и 14-ой молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах» (Таганрог, 2023). Таганрог: Лукоморье, 2023. С. 63-71.
3. Zhang Y., Guo J., Zhu R., Zhao Zh. Wang L. Path Planning Based on Improved Ant Colony Algorithm // International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems (ICVRIS) 2020. P. 946-949.
4. Choset H. Coverage for robotics – A survey of recent results. //Ann. Math. Artif. Intell. 2001. P. 113–126.