

БУМАЙ А.Ю.

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ОБЛЕТЕ ЗАДАННЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРОСТРАНСТВА

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

В статье проводится анализ различных методов построения траекторий движения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) при облете заданных областей пространства. Приводятся аналитические результаты проведенных исследований в виде качественных иллюстраций рассматриваемых методов, а также предложенной методики формирования оптимальной траектории полета БЛА вдоль границ заданной области пространства, учитывающей соответствующие процессы изменения управляющего ускорения и скорости движения БЛА и позволяющей сформировать требования к системе управления БЛА на этапе предварительного проектирования. Проводится анализ методов формирования траекторий БЛА на основе которого сделан вывод о работоспособности предложенной методики для формирования оптимальной траектории БЛА при облете заданной области пространства и целесообразности ее дальнейшего использования в качестве основы для первоначального этапа синтеза системы управления БЛА.

Ключевые слова: построение траектории, заданная область, беспилотный летательный аппарат, оптимальная траектория, математическое моделирование

Введение

Одной из задач при разработке систем управления (СУ) беспилотных летательных аппаратов (БЛА) на первоначальном этапе является создание алгоритмов формирования траектории полета БЛА, которая должна проходить через заданные точки пространства. Ввиду того что БЛА имеет ограниченный радиус действия, время, затрачиваемое на выполнение поставленной задачи, должно быть сведено к минимуму [1]. Разнообразные задачи, решаемые современными БЛА, обеспечиваются выполнением полета по заданной траектории с соблюдением режима полета во времени и прохождением БЛА через заданные точки пространства, при этом БЛА должен иметь возможность приближаться к месту выполнения задачи с определенных направлений. Одной из вспомогательных задач при следовании по заданной траектории является недопустимость попадания БЛА в заданные области пространства, которые могут представлять собой зоны, запрещенные для полетов или препятствия. Следовательно, ограничения, наложенные на траекторию полета БЛА, всегда будут основными факторами в любом алгоритме формирования траектории БЛА. Алгоритмы и методики формирования траектории должны быть реализуемы на борту БЛА и работать в режиме реального времени, позволяя БЛА при необходимости перепланировать свою траекторию без существенной задержки по времени.

Существуют определенные государственные стандарты и рекомендуемая практика, в

отношении эксплуатационных маршрутов БЛА с соответствующими ограничениями, а также задачами, выполняемыми БЛА, разработанных с учетом действующих в государстве нормативно правовых документов [2]. Соответствующие требования подлежат выполнению разработчиком БЛА и должны учитывать тип летательного аппарата, сложность установленного на борту оборудования, характеристики средств обеспечения захода на посадку, оборудования взлетно-посадочной полосы, а также – квалификацию операторов БЛА [2].

Методы и подходы к формированию траектории различаются в зависимости от области применения БЛА. В настоящее время в исследовательской литературе доступно множество подходов к решению задач формирования траекторий БЛА при облете заданных областей пространства и каждый подход имеет свои достоинства и недостатки. Современные алгоритмы формирования оптимальной траектории полета БЛА при облете заданных областей пространства представляют интерес в качестве предмета исследования для специалистов, разрабатывающих СУ БЛА в связи с ростом сфер применения БЛА и количеством и сложностью задач, которые они способны решать.

Методы формирования траекторий БЛА при облете заданных областей пространства

Большинство современных методов и подходов к формированию траектории можно представить в виде упрощенной схемы, где входными данными для формирования траектории

являются путевые точки, а также положение и размер заданных областей пространства. При создании траектории оператором БЛА задаются путевые точки, которые затем соединяются линиями, которые, в свою очередь, соединяются с начальной и конечной точками и формируют одну или несколько траекторий для данной карты известных местоположений, учитывающих расположение обозначенных областей, которые могут быть местами для посещения или местами, которых следует избегать (препятствий, запретных зон и угроз). Однако это не единственный способ создания траектории [2, 3].

Среди различных методов формирования траектории, позволяющих облетать заданные области пространства следует выделить несколько наиболее известных и распространенных методов формирования траектории, основанных на различных критериях [3].

Метод диаграммы Вороного – это метод формирования траектории, представляющий собой формирование связанного графа, проходящего через вершины полигонов («заборов») вокруг заданных областей пространства. Каждое ребро полигонов определяется путем построения набора линий, соединяющих центры заданных областей пространства. Множество многоугольных полигонов («заборов») строится путем рисования набора линий, перпендикулярных линиям, соединяющим центры заданных областей пространства, а далее они корректируются так, чтобы количество вершин было минимальным. Пример диаграммы Вороного показан на рисунке 1 [3, с. 15].

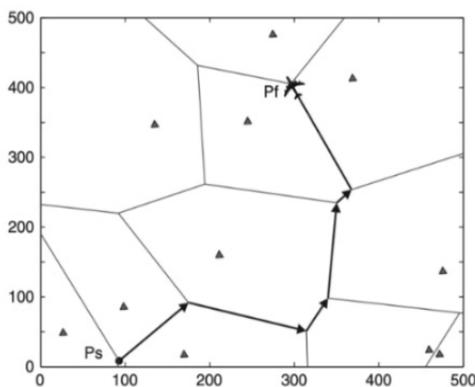


Рисунок 1. Метод диаграммы Вороного

Полученные полигональные «заборы» можно рассматривать как связный граф. Для поиска маршрута, соединяющего начальную и конечную вершины графа следует использовать известные алгоритмы поиска в графе. Диаграмма Вороного используется для создания траектории полета БЛА путем добавления скруглений в вершинах. Однако этот метод связан со сложностью решения обыкновенных дифференциальных уравнений и

с ограничениями кривизны. В некоторых случаях рассматривается способ, где траектория Вороного интерполируется серией кубических сплайнов, присваивая каждому местоположению препятствия стоимость [3, с. 15].

Метод клеточной декомпозиции – это метод формирования траектории, основанный на том, что заданная область делится на непересекающиеся ячейки. Затем генерируются возможные траектории, которые проходят через соседние свободные ячейки, не занятые препятствиями. Препятствия изолируются путем нахождения связи между свободными ячейками. Таким образом, создается дискретная версия заданной области с возможностью использовать известные алгоритмы поиска для соединения соседних свободных ячеек. Метод клеточной декомпозиции используется для создания траектории полета БЛА путем добавления скруглений в вершинах. В некоторых случаях рассматривается способ, где сформированная траектория интерполируется серией кубических сплайнов, присваивая каждому местоположению препятствия стоимость.

На рисунке 2 показана схема процесса формирования траектории методом клеточной декомпозиции. Заштрихованные ячейки исключаются, поскольку они заняты препятствиями (серые области) [3, с. 17].

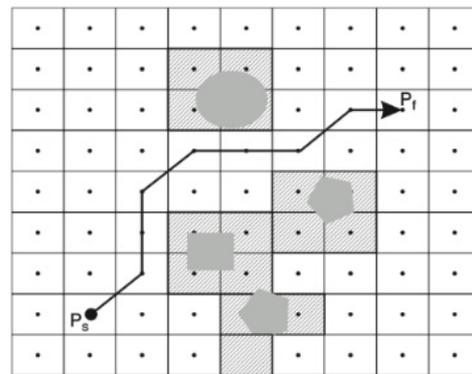


Рисунок 2. Метод клеточной декомпозиции

Метод Дабинса – это метод формирования траектории, при котором кратчайшая возможная траектория формируется путем замены частей отрезков, прилегающих к углу ломаной, дугой окружности, которая соответствует максимальной кривизне между двумя точками с определенной ориентацией на плоскости и является либо путем CLC (curve-line-curve), либо путем CCC (curve-curve-curve), либо их подмножеством, где С представляет собой округлую дугу, а L представляет прямую, касательную к С. Описанный метод формирования траекторий позволяет сформировать траекторию CLC, образованную путем соединения двух дуг окружности касательной к ним линией, и траекторию

ССС образованную тремя последовательными дугами окружности, касательными друг к другу. Подмножествами этих траекторий являются CL, LC и CC траектории. На рисунке 3 показаны траектории CLC и CCC [3, с. 31].

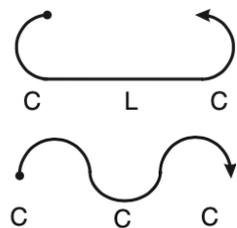


Рисунок 3. CLC и CCC вид траекторий Дабинса

Траектория Дабинса имеет простую геометрию и, следовательно, ее можно легко реализовать на борту БЛА. Однако изменения кривизны траектории носят прерывистый характер, когда траектория меняется с дуги на прямолинейный сегмент и наоборот. Этот разрыв может оказаться трудным для целей практической реализации, поскольку БЛА должен будет следовать по такой траектории и он не сможет мгновенно изменить свое поведение при пересечении границы сегмента [3, с. 31].

Метод клотоидной траектории – это метод формирования траектории, заключающийся в том, что при формировании траектории ее кривизна на заданных отрезках изменяется линейно по всей длине заданного отрезка (клотоиды) [3, с. 47]. Профиль кривизны такой траектории в сравнении с траекторией Дабинса показан на рисунке 4.

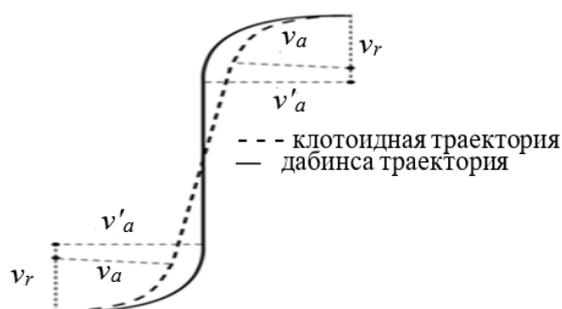


Рисунок 4. Профиль кривизны Дабинса и клотоидной траектории

В отличие от траектории Дабинса, где кривизна на отдельных участках траектории постоянна, в клотоидной траектории кривизна изменяется линейно по длине дуги от нуля на границах до максимума в середине дуги. Линейное изменение кривизны в зависимости от длины клотоиды обеспечивает плавный переход к отрезку с нулевой кривизной и обратно. Метод создания составной клотоидной траектории аналогичен траектории Дабинса [3, с. 31].

В работе [4] предложен метод формирования траектории беспилотного летательного аппарата при облете запретной зоны – как метод синтеза оптимального ускорения центра масс беспилотного летательного аппарата при облёте им запретных зон, учитывающий ограничения, наложенные на траекторию полета и динамические характеристики БЛА, позволяющий минимизацию затрат на управление БЛА [4, 5, 9]. В качестве запретной области в работе [4] рассматривается запретная зона № 181 Минского национального аэропорта «Минск 2» [10].

В работе [5] на основе известных результатов аналитического решения подобных задач [11] получено выражение для бокового ускорения в горизонтальной плоскости, обеспечивающего полет БЛА по оптимальной траектории. Предложенный в работе [5] метод основан на минимизации функционала качества (задача Больца), терминальные члены которого включают минимум промаха БЛА при пролете через заданную k -ю точку пространства и минимум отклонения вектора скорости БЛА от заданного значения в момент пролета через эту точку. Задание направления вектора скорости в момент прохождения БЛА через заданную k -ю точку задается как направление на следующую заданную $k+1$ точку пространства. Интегральное слагаемое минимизируемого функционала (квадратичный функционал Летова–Калмана) представляет собой минимизацию управляющего ускорения БЛА которое характеризует затраты на управление. Для всех слагаемых минимизирующего функционала назначаются нормировочные коэффициенты, значения которых определяются максимально допустимыми значениями переменных входящих в функционал качества.

В работе [4] путем математического моделирования проведено исследование формирования траектории полета беспилотного летательного аппарата при облете запретной зоны. На рисунке 5 представлена траектория полета БЛА с точками через которые должен пролететь БЛА.

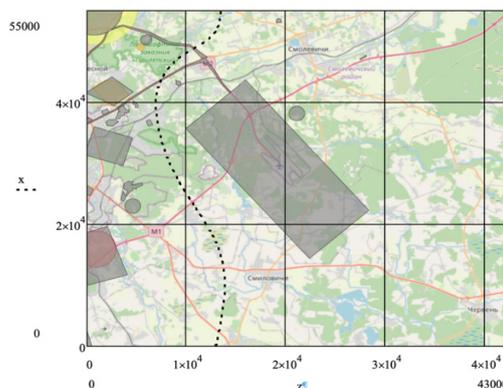


Рисунок 5. Траектория БЛА при облете запретной зоны

Координаты точек задаются с учетом безопасного расстояния до запретной зоны (Минского национального аэропорта «Минск 2»).

Заключение

Проведенный анализ методов формирования траектории при облете заданных областей пространства показал, что приведенные традиционные методы не учитывают динамику полета БЛА

по заданной траектории при облете заданных областей пространства и наложенные при этом ограничения. На основе приведенного исследования сделан вывод о необходимости учета динамические характеристики БЛА при формировании траектории облета заданной области пространства. Для решения поставленных задач целесообразно применять методы и алгоритмы формирования траектории беспилотных летательных аппаратов при облете запретных зон [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Моисеев, В.С.** Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами / В.С. Моисеев. – Казань: ГБУ РЦМКО, 2013. – 768 с.
2. **Об утверждении Авиационных правил полетов в воздушном пространстве Республики Беларусь** [Электронный ресурс]: постановление Гос. комитета по авиации Респ. Беларусь, М-ва обороны Республики Беларусь, 01 июня 2004 г., № 7/30 // Воен. информ. портал М-ва обороны Респ. Беларусь. – Режим доступа: <http://ais.mil.by/normativ/doc/7-30.pdf>. – Дата доступа: 15.05.2024.
3. **Tsourdos, A.** Cooperative path planning of unmanned aerial vehicles / A. Tsourdos, B.A. White, M. Shanmugavel. – Chichester: John Wiley & Sons, 2011. – 190 p.
4. **Бумай, А.Ю.** Формирование траектории беспилотного летательного аппарата при облете запретных зон / А.Ю. Бумай, А.А. Лобатый, А.М. Авсиевич // Систем. анализ и приклад. информатика. – 2021. – № 4. – С. 47–53.
5. **Лобатый А.А.** Формирование оптимальных параметров траектории пролета беспилотного летательного аппарата через заданные точки пространства / А.А. Лобатый, А.Ю. Бумай, Ду Цзюнь // Доклады БГУИР. – 2019. – № 7-8. – С. 50–57.
6. **Методы классической и современной теории автоматического управления:** в 5 т. / под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 5 Т. Методы современной теории автоматического управления. – 784 с.
7. **Лобатый, А.А., Икуас Ю.Ф.** Оптимальное программное управление беспилотным летательным аппаратом / А.А. Лобатый, Ю.Ф. Икуас // Наука и Техника, – 2012. – № 73. – С. 17–20.
8. **Красовский, А.А.** Системы автоматического управления летательных аппаратов / А.А. Красовский, Ю.А. Вавилов, А.И. Сучков. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1986. – 477 с.
9. **Лобатый А.А.** Аналитический синтез управляющего ускорения беспилотного летательного аппарата / А.А. Лобатый, А.Ю. Бумай, С.С. Прохорович // Наука и Техника, – 2021. – Т. 20. – № 4. – С. 338–344.
10. **Национальное кадастровое агентство** [Электронный ресурс]: Публичная кадастровая карта / Дополнительные слои: Зоны ограничений/запретные/опасные/запрещенные для использования авиамodelей. – Режим доступа: <https://map.nca.by/layers>. – Дата доступа: 15.05.2024.
11. **Брайсон А.** Прикладная теория оптимального управления / А. Брайсон, Хо Ю-ши. – М.: Мир, 1972. – 544 с.

REFERENCES

1. **Moiseev V.S.** Applied theory of control of unmanned aerial vehicles / V.S. Moiseev. – Kazan: GBU RCMKO, 2013. – 768 p.
2. **On approval of Aviation Rules for flights in the airspace of the Republic of Belarus** [Electronic resource]: State resolution Aviation Committee of the Republic Belarus, Ministry of Defense of the Republic of Belarus, 01 June 2004 г., № 7/30 // Military information portal of the Ministry of Defense of the Republic of Belarus. – Mode of access: <http://ais.mil.by/normativ/doc/7-30.pdf>. – Дата доступа: 15.05.2024.
3. **Tsourdos A.** Cooperative path planning of unmanned aerial vehicles / A. Tsourdos, B.A. White, M. Shanmugavel. – Chichester: John Wiley & Sons, 2011. – 190 p.
4. **Lobaty A.A., Avsievich A.M., Bumai A.Y.** Formation of the trajectory of an unmanned aerial vehicle when flying around prohibited areas. Sistemnyj i prikladnaya informatika. – 2021. – № 4. – Pp. 47–53.
5. **Lobaty A.A., Bumai A.Y., Du J.** Formation of optimal parameters of the flight path of an unmanned aerial vehicle through specified points in space. Doklady BGUIR. – 2019. – № 7-83. – Pp. 50–57.
6. **Methods of classical and modern theory of automatic control:** in 5 v. / ed. K.A. Pupkova and N.D. Egupova. – М.: Izdatelstvo MGTU im. N. E. Baumana, 2004. – 5 V. Methods of classical and modern theory of automatic control. – 784 p.

7. Lobaty A.A., Ikuas Y.F. Optimal software control of the unmanned aerial vehicle. *Nauka i Tehnika*. – 2012. – № 73. – Pp. 17–20.
8. Krasovskiy A.A. Automatic aircraft control systems / A. A. Krasovskij, Y. A. Vavilov, A. I. Suchkov. – M.: VVIA im. N.E. Zhukovskogo, 1986. – 477 p.
9. Lobaty A.A. Analytical synthesis of the control acceleration of an unmanned aerial vehicle / A. A. Lobaty, A. Y. Bumai, S. S. Prohorovich // *Nauka i Tehnika*. – 2021. – V. 20. – № 4. – PP. 338–344.
10. National Cadastral Agency [Electronic resource] : Public cadastral map / Addition layers : Zones restricted/forbidden/dangerous/prohibited for using UAV. – Mode of access: <https://map.nca.by/layers>. – Date of access: 15.05.2024.
11. Bryson A., Ho Yushi. Applied optimal control theory. – M. : Mir, 1972. – 544 p.

BUMAI A. Y.

METHODS FOR FORMATION TRAJECTORIES OF MOTION OF UNMANNED AIRCRAFT VEHICLES WHEN FLYING AROUND SPECIFIED AREAS OF SPACE

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

The article analyzes various methods for constructing motion trajectories of unmanned aerial vehicles (UAVs) when flying over specified areas of space. The analytical results of the studies are presented in the form of qualitative illustrations of the methods under consideration, as well as the proposed methodology for forming an optimal UAV flight trajectory along the boundaries of a given area of space, taking into account the corresponding processes of changing the control acceleration and speed of the UAV and allowing the formation of requirements for the UAV control system at the preliminary development stage. An analysis of methods for forming UAV trajectories is carried out, on the basis of which a conclusion is made about the operability of the proposed methodology for forming the optimal UAV trajectory when flying over a given area of space and the feasibility of its further use as the basis for the initial stage of synthesis of the UAV control system.

Keywords: *trajectory formation, specified area, unmanned aerial vehicle, optimal trajectory, mathematical modeling*



Бумай Андрей Юрьевич, ассистент кафедры «Информационные системы и технологии» Белорусского национального технического университета. Проводит исследования в области анализа и синтеза стохастических систем управления применительно к беспилотным летательным аппаратам.

Bumai A. Y., assistant of « Information Systems and Technologies» department of Belarusian National Technical University. Conducts research in the areas of analysis and synthesis of stochastic control systems applying to unmanned aerial vehicles.

E-mail: andrei.bumai@bntu.by