



Использование виртуальной целевой точки для планирования движения подвижного объекта в 3D

А.Е. Кульченко, В.С. Лазарев

Южный федеральный университет, Таганрог

Аннотация: В работе рассматривается метод неустойчивых режимов и виртуальной целевой точки применительно к беспилотным летательным аппаратам в трехмерных средах. Приводится описание метода неустойчивых режимов применительно к управлению подвижным объектом, а также метода виртуальной целевой точки для трехмерного случая. Представлена процедура, описывающая данный метод. В качестве примера подвижных объектов используются гексакоптеры. Приведены результаты моделирования для ряда случаев: полет из точки в точку с препятствиями и полет по траектории с препятствиями. Проанализирована эффективность метода при различных коэффициентах настройки. В выводах представлены ограничения, накладываемые на данный метод, и даны рекомендации по его использованию.

Ключевые слова: неустойчивый режим, гексакоптер, подвижный объект, виртуальная точка, БПЛА, препятствие, моделирование, полет, позиционно-траекторное управление.

Введение

Согласно открытым информационным источникам компании крупного и среднего бизнеса стабильно из года в год наращивают объемы применения беспилотной авиации для разведки и мониторинга объектов своей инфраструктуры. Среди этих компаний можно выделить предприятия нефтегазовой промышленности, которые тратят немало средств на развитие и модернизацию беспилотных аппаратов для наблюдения за месторождениями. В свою очередь увеличение количества беспилотных летательных аппаратов требует наличия эффективных алгоритмов планирования движений БПЛА в группе с препятствиями. В работе приводится метод планирования траекторий с использованием виртуальной точки. Предложенный в [1],[2] метод ограничен двухмерным случаем, для того, чтобы применить его к БПЛА метод был расширен.

Также в настоящий момент существует тенденция к развитию различных видов БПЛА. Например, достаточно часто объектом исследования зарубежных [3] и отечественных ученых выступают мультикоптеры.

Объект управления

В статье, в качестве объекта управления, рассматривается гексакоптер (одна из разновидностей мультикоптеров) Erle-НexаCopter. Внешний вид гексакоптера показан на рис. 1. Он имеет Х-схему. Конфигурация полезной нагрузки аппарата устанавливается под конкретные задачи. Параметры гексакоптера в базовой конфигурации приведены в таблице 1.



Рис. 1. – Внешний вид Erle-НexаCopter

Таблица № 1

Параметры Erle-НexаCopter

№ п/п	Параметр	Значение
1	Масса, кг	1.078
2	Диаметр гексакоптера, м	0.55
3	Масса полезной нагрузки, кг	до 2.5
4	Масса подвеса, кг	0.2
5	Максимальная скорость полета, м/с	3

Математическая модель объекта управления построена на базе известных уравнений движения и здесь не приводится.

При разработке математической модели гексакоптера приняты следующие допущения:

- масса гексакоптера в полете не изменяется, ввиду использования силовых аккумуляторных батарей;
- положение центра тяжести остается постоянным в течение всего полета гексакоптера;

- аэродинамическими силами сопротивления движению можно пренебречь в силу малых скоростей полета (до 3 м/с);
- деформации гексакоптера и присоединенных к нему конструкций пренебрежимо малы.

Система управления

Полет гексакоптера в среде с препятствиями может проходить в режимах, для которых характерно проявление многосвязности и нелинейности объекта. С учетом этого, для исследуемого гексакоптера синтезированы алгоритмы позиционно-траекторного управления [4], [5].

Структура интеллектуальной позиционно-траекторной системы управления гексакоптера представлена на рис. 2. На борту гексакоптера установлена навигационная система, позволяющая определить собственное положение во внешних координатах и скорость. Система технического зрения (например, локатор) позволяет определять координаты препятствий в зоне его действия. На основании данных от навигационной системы и локатора интеллектуальный планировщик выдает коэффициенты квадратичных форм в позиционно-траекторный регулятор, который осуществляет движением вдоль заданной траектории. В общем случае, в позиционно-траекторный регулятор также поступают данные от датчиков исполнительных механизмов. В настоящей работе при моделировании будет использоваться позиционное управление. В этом случае планировщик формирует целевую точку, в которую должен лететь гексакоптер, при этом не предъявляются требования по скорости или ускорению.

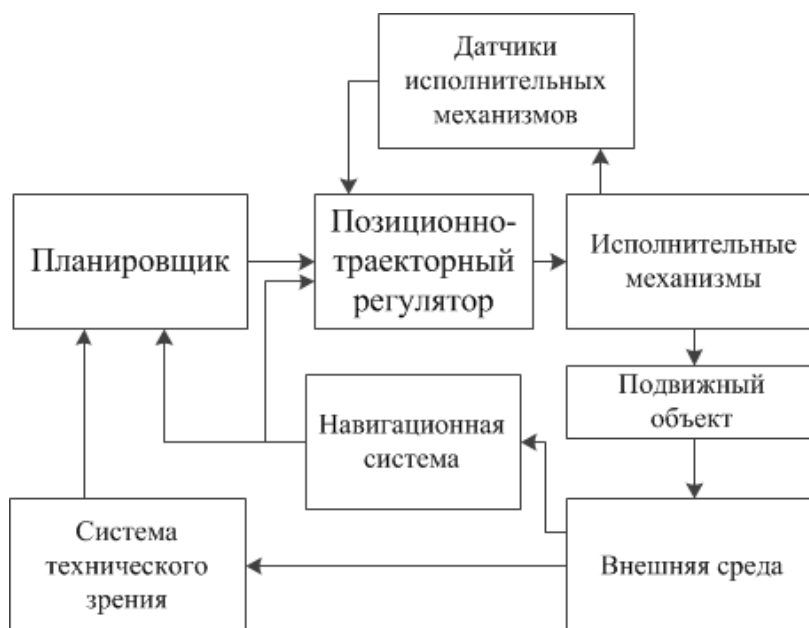


Рис. 2. – Структура системы управления гексакоптера

Обход препятствий при помощи неустойчивых режимов с виртуальной целевой точкой

Основная идея метода неустойчивых режимов состоит в применении третьей теоремы Ляпунова (теорема о неустойчивости) при нарушении неравенства (1), т.е. при нахождении гексакоптера в зоне стационарных или нестационарных препятствий на расстояниях r_c , меньших допустимого значения r .

$$r_c > r, \quad (1)$$

где r_c – расстояние до ближайшего препятствия; r – константа, задающая допустимое кратчайшее расстояние от гексакоптера до любого из препятствий P_j .

Иными словами, в зависимости от принадлежности текущего положения ПО зоне, свободной от препятствий, когда соблюдаются неравенства (1), или зоне, в которой, эти условия не выполняются, предлагается организовывать такие режимы движения гексакоптера, при

которых планируем траектории были бы устойчивыми в первом случае и неустойчивыми во втором.

В работах [6], [7] показано, что неравенства вида (1) могут быть представлены в следующем виде:

$$\beta = \sum_j |r_c - r| - \sum_j (r_c - r), \quad (2)$$

где j – количество ближайших точек, находящихся в зоне действия сенсорной системы ПО и принадлежащих одному или нескольким препятствиям.

Очевидно, что при соблюдении всех неравенств (1) значение параметра β (2) равно нулю и соответственно не равно нулю, если хотя бы одно из неравенств (2) нарушается. Причем во втором случае значение β всегда положительно.

В работе [6] показано, что устойчивый характер движения ПО вдоль траектории Ψ_r обеспечивается при положительной определенности матриц T и A . Соответственно при нарушении условий (2), одна или обе матрицы T и A должны быть отрицательно определенными. Без потери общности предположим, что $T = A = \text{diag } s_i, i = \overline{1, \nu}$, где s_i – некоторый функциональный параметр, задающий знакоопределенность матриц T и A .

С учетом вышеизложенного, элементы матриц T и A предлагается задавать в виде следующей функции:

$$s_i = \begin{cases} s_0 = \text{const}, \text{ при } \beta = 0 \\ -\frac{1}{\beta}, \text{ при } \beta \neq 0 \end{cases}, \quad (3)$$

здесь s_0 задает характер движения в свободной от препятствия зоне.

Таким образом, формируя элементы матриц T и A в соответствии с зависимостью вида (3), мы обеспечиваем устойчивый характер движения ПО

вдоль многообразия Ψ_{ir} , за исключением областей, в которых нарушаются неравенства (1).

Поскольку в предлагаемой организации движения предполагается переход из одного устойчивого состояния через неустойчивое движение в другое устойчивое состояние, то параметр β в соответствии с [6] называется бифуркационным.

Процедура генерации виртуальной точки имеет вид:

- На первом этапе вычисляется параметр β , который характеризует расстояние до препятствий (2).
- На следующем этапе вычисляется коэффициент γ . Он в свою очередь зависит от расстояния между гексакоптером и препятствием:

$$\gamma = k_\gamma \beta, \quad (4)$$

где k_γ – настраиваемый параметр.

- Затем рассчитываются координаты виртуальной точки:

$$\begin{bmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{bmatrix} = R_z(\gamma) \times R_y(\gamma) \times \begin{bmatrix} x_{ref} \\ y_{ref} \\ z_{ref} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где x_v, y_v, z_v – координаты виртуальной точки, $x_{ref}, y_{ref}, z_{ref}$ – координаты целевой точки, R_z, R_y – матрицы поворота относительно осей O_z и O_y .

В случае выполнения условия:

$$|\beta| > 0.01, \quad (6)$$

целевой точке присваиваются координаты виртуальной точки.

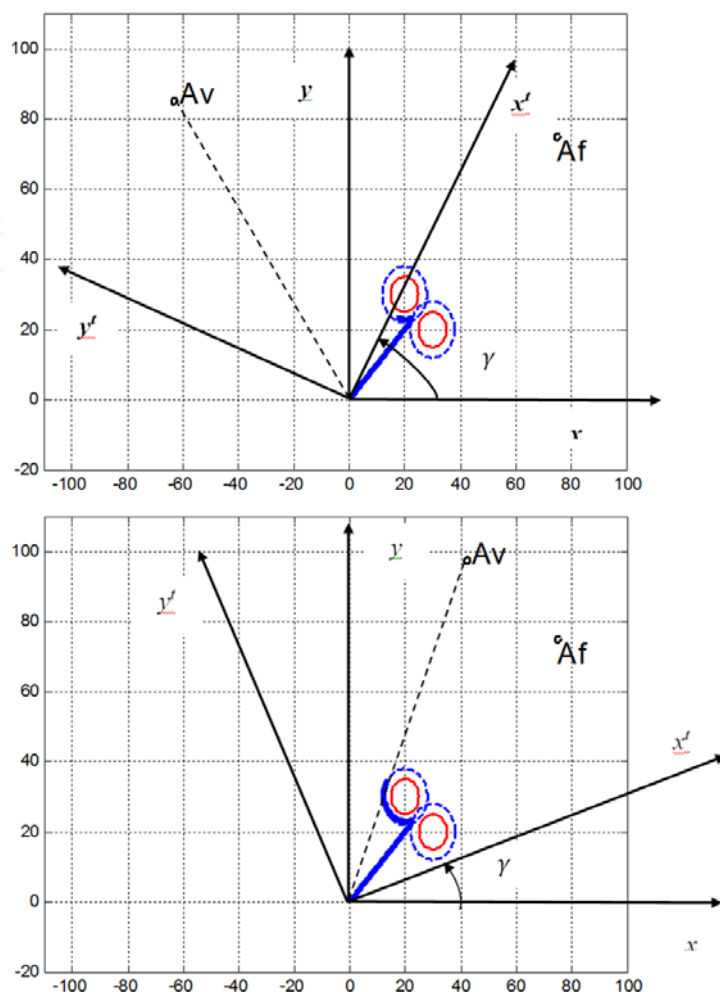


Рис. 3. – Преобразование целевой точки в виртуальную

В случае нарушения условий (1) гексакоптер переходит в режим неустойчивого движения до обнуления бифуркационного параметра β , т.е. выхода объекта в зону, свободную от препятствий.

Моделирование полета гексакоптера

Рассмотрим три случая: а) полет гексакоптера из точки в точку в среде с одним препятствием, б) с несколькими препятствиями, в) полет по траектории с несколькими препятствиями. Зададим начальные условия: начальное положение гексакоптера $x=1, z=1$, высота $y=3$, начальные скорости равны нулю. Ограничения: максимальная путевая скорость 0.2 м/с, $y=\text{const}$, $r=\text{const}$, угол курса не меняется, на борту установлена сенсорная система кругового обзора, ее радиус действия 2 м.

Одиночное препятствие

Параметры моделирования для случая с одним препятствием приведены в таблице 2. Результаты моделирования приведены на рис. 4.

В таблице 2 приведены соответствия заданных коэффициентов k_γ цветам полученных траекторий полета. Из рис. 4 видно, что по достижении допустимого кратчайшего расстояния r , выполняется условие (4), и гексакоптер пролетает под препятствием. С повышением коэффициента k_γ до 0.9 траектория обхода препятствия становится менее гладкой.

Таблица № 2

Одно препятствие. Параметры моделирования

№ п/п	Параметры	Значения			
1	Скорость, м/с	1			
2	r , м	1.7			
3	k_γ , (цвет линии)	0.3 (красн.)	0.5 (син.)	0.7 (зелен.)	0.9 (розовый)
4	Параметры препятствия, м	Высота куба $h=0,4$, Положение $x=5, z=5, y=3$,			

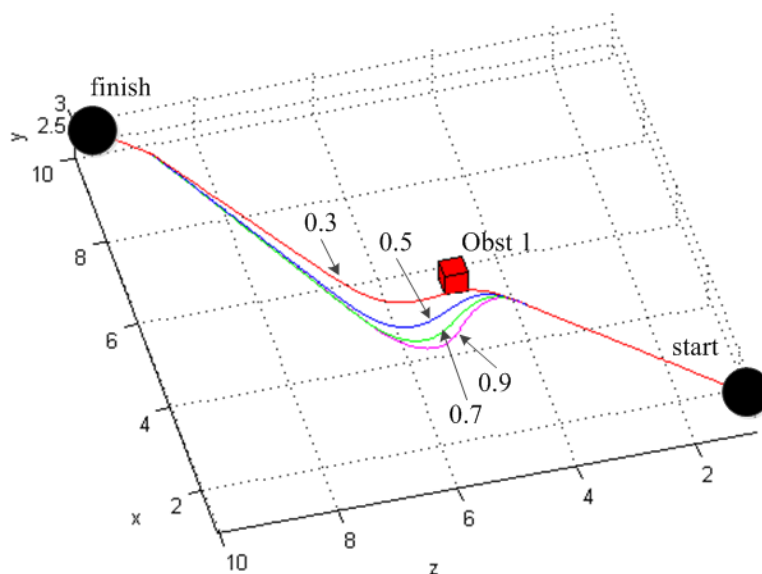


Рис. 4. – Траектории полета гексакоптера в среде с одним препятствием

Несколько препятствий

Приведем результаты моделирования для гексакоптера, действующего в однородной группе из 6 летательных аппаратов. В качестве допущения примем, что препятствия стационарны, т.е. остальные гексакоптеры в группе позиционируются в заданных точках пространства базовой системы координат. Параметры моделирования приведены в таблице 3. Параметры скорости и γ соответствуют таблице 2.

Результаты моделирования приведены на рис. 5. При $k = 0.3$ наблюдается опасное сближение гексакоптера с препятствием, что является недопустимым. Избежать этого можно рядом способов: повысить k , увеличить дальность сенсорной системы и γ , либо значительно снизить путевую скорость гексакоптера.

Таблица № 3

Несколько препятствий. Параметры моделирования

№ п/п	Параметры	Значения			
		0.3 (красн.)	0.5 (син.)	0.7 (зелен.)	0.9 (розовый)
1	k_γ , (цвет линии)				
2	Параметры неподвижных препятствий, м	Высота куба $h = 0,55$ $x_1=2.8, z_1=2.8, y_1=3.8; x_2=5, z_2=5, y_2=3;$ $x_3=6.5, z_3=6, y_3=2;$ $x_4=4, z_4=7, y_4=3; x_5=7, z_5=7, y_5=3;$			

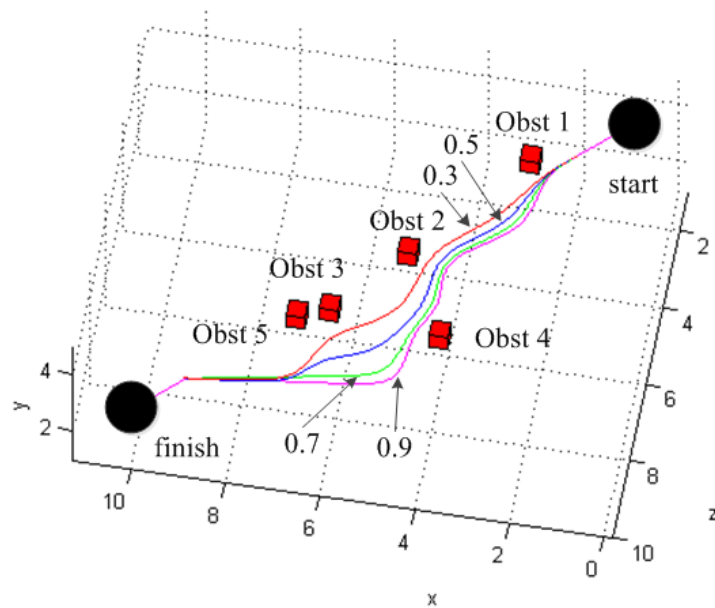


Рис. 5. – Траектории полета гексакоптера в среде с несколькими препятствиями

Полет по траектории в среде с препятствиями

Наиболее вероятным сценарием регулярного использования групп гексакоптеров является патрулирование и мониторинг интересующих объектов по заранее заданным траекториям. При этом на небольшой территории высока вероятность пересечения траекторий нескольких гексакоптеров. Пусть заданная траектория полета гексакоптера имеет форму меандра с амплитудой 8 метров. Максимальная скорость составляет 0.2 м/с, расстояние до препятствия 1.3 м, дальность сенсорной системы кругового обзора 2 м, параметры неподвижных препятствий соответствуют таблице 3. Согласно рис. 6, гексакоптер успешно пролетает по заданной траектории. При этом просадки по высоте при обходе препятствий, не значительны, что объясняется более малым значением γ и большим количеством промежуточных точек, используемых для задания желаемой траектории.

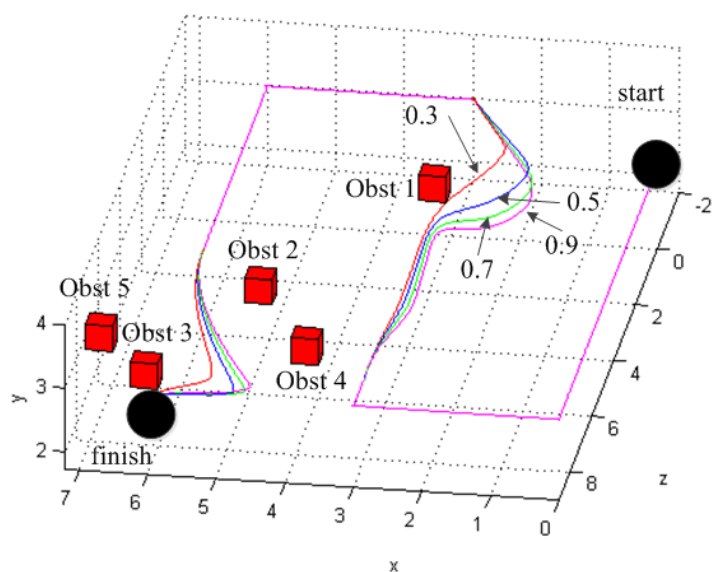


Рис. 5. – Полет гексакоптера по траектории в среде с препятствиями

Выводы

Приведенные результаты моделирования подтверждают работоспособность метода виртуальной точки в неформализованной трехмерной среде с препятствиями. При выборе допустимого расстояния и коэффициента k_γ следует учитывать скорость полета и высоту. В закрытом помещении так же следует учесть расстояние до перекрытий. Изменение курсового угла в промежуточных точках траектории приводит к циркуляции гексакоптера. Для эффективного использования данного метода в трехмерных средах требуется введение дополнительных условий, учитывающих параметры внешней среды. Метод виртуальной точки может быть использован для разнородных групп подвижных объектов, например, таких, которые описаны в [8]-[10].

Благодарности

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 16-08-00012 А.

Литература

1. Гузик В.Ф., Косенко Е.Ю., Крухмалев В.А., Медведев М.Ю., Переверзев В.А., Пшихопов, В.Х. Пьявченко О.А., Сапрыкин Р.В., Соловьев В., Финаев В.И., Чернухин Ю.В., Шаповалов И. Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями. М.: Физматлит. 2014. 350 с.

2. Али. А.С, Федоренко Р.В., Крухмалев В.А. Система управления автономным колесным роботом скиф-3 для априори неформализованных сред // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. №3. С.132-143.

3. Mellinger D., Michael N., Kumar V. Trajectory Generation and Control for Precise Aggressive Maneuvers with Quadrotors // International Journal of Robotics Research. 2012. № 31(5). pp. 664-674.

4. Пшихопов, В.Х. Проектирование роботов и робототехнических систем. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2014. 195 с.

5. Бойчук Л.М. Метод структурного синтеза нелинейных систем. автоматического управления. М.: Энергия, 1971. 112 с.

6. Пшихопов В.Х. Организация репеллеров при движении мобильных роботов в среде с препятствиями // «Мехатроника, автоматизация, управление», – 2008. – №2. – С. 34-41.

7. Пшихопов В.Х. Управление подвижными объектами в априори неформализованных средах // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. № 12 (89). С. 6-19.

8. LaValle S.M. Planning Algorithms. Cambridge University Press, 2006. 842 p.

9. Пшихопов В.Х., Федотов А.А., Медведев М.Ю., Медведева Т.Н., Гуренко Б.В. Позиционно-траекторная система прямого адаптивного управления морскими подвижными объектами // Инженерный вестник Дона, №3, 2014, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2496.



10. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Федоренко Р.В., Гуренко Б.В., Чуфистов В.М., Шевченко В.А. Алгоритмы многосвязного позиционно-траекторного управления подвижными объектами // Инженерный вестник Дона, №3, 2014, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2579.

References

1. Guzik V.F., Kosenko E.Ju., Kruhmalev V.A., Medvedev M.Ju., Pereverzev V.A., Pshihopov, V.H. Pjavchenko O.A., Saprykin R.V., Solovjev V., Finaev V.I., Chernuhin Ju.V., Shapovalov I. Intellectualnoe planirovanie traektorij podviznyh objektov v sredah s prepjatstvijami [Intellectual planning of vehicles trajectories in environments with obstacles]. M.: Fizmatlit, 2014. 350 p.
2. Ali. A.S, Fedorenko R.V., Kruhmalev V.A. Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki 2010. №3, pp.132-143.
3. Mellinger D., Michael N., Kumar V. International Journal of Robotics Research. 2012. № 31(5). pp. 664-674.
4. Pshihopov V.Kh. Proektirovanie robotov i robototekhnicheskikh sistem [Design of robotic systems]. Rostov-na-Donu: Izd-vo JuFU, 2014. 195 p.
5. Bojchuk L.M. Metod strukturnogo sinteza nelinejnyh sistem. avtomaticheskogo upravlenija[Method of structural synthesis of nonlinear automatic control systems.]. M.: Energija, 1971. 112 p.
6. Pshihopov V.Kh. Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie, 2008. №2. pp. 34-41.
7. Pshihopov V.Kh. Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki. 2008. № 12 (89). pp. 6-19.
8. LaValle S.M. Planning Algorithms. Cambridge University Press, 2006. 842 p.
9. Pshihopov V.Kh., Fedotov A.A., Medvedev M.Ju., Medvedeva T.N., Gurenko B.V Inženernyj vestnik Dona (Rus), №3, 2014. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2496.



10. Pshihopov V.Kh., Medvedev M.Ju., Fedorenko R.V., Gurenko B.V., Chufistov V.M., Shevchenko V.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), №3, 2014
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2579.