

СИНТЕЗ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫМ ПОСАДОЧНЫМ МАНЕВРОМ БПЛА МЕТОДОМ ГИБКИХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ТРАЕКТОРИЙ

Филимонов Н.Б., Сергеев А.А.

Ключевые слова: терминальное управление БПЛА, принцип гибких траекторий, кинематика и пространственная синхронизация управляемых движений.

Аннотация. Рассматривается постановка и решение задачи синтеза алгоритма управления терминальным вертикальным посадочным маневром БПЛА методом обратных задач динамики с использованием концепции гибких кинематических траекторий.

SYNTHESIS OF CONTROL ALGORITHM FOR THE UAV VERTICAL LANDING MANEUVER BY THE METHOD OF FLEXIBLE KINEMATIC TRAJECTORIES

Filimonov N.B., Sergeev A.A.

Key words: terminal control of the UAV, principle of flexible trajectories, kinematics and spatial synchronization of controlled movements.

Abstract. The setting up and solution of the synthesis control algorithm problem for the UAV terminal vertical landing maneuver by the method of inverse dynamics problems using the concept of flexible kinematic trajectories is considered.

Важное направление развития современной теории автоматического управления составляют задачи управления подвижными объектами, в частности беспилотными летательными аппаратами (БПЛА, Unmanned Aerial Vehicles, UAV). При этом критической задачей, обеспечивающей выполнение миссии, безопасность и коммерческий успех применения БПЛА, является автоматическая посадка.

Концепция гибких кинематических траекторий БПЛА. Принцип гибких траекторий заключается в отказе от привязки управляемого движения БПЛА к заранее запланированной (номинальной) траектории и предлагает формирование более выгодных траекторий движения исходя из фактического состояния аппарата. Данный принцип означает включение в контур управления БПЛА механизма планирования траекторий движения из произвольного текущего к фиксированному целевому состоянию [1].

Формализацию принципа гибких траекторий для класса задач управления летательными аппаратами естественно привязывать к кинематике их движения в физическом пространстве.

Будем рассматривать БПЛА как абсолютно твердое тело. В соответствии с правилами механики его движение разлагается на поступательное движение центра масс и вращательное движение относительно центра масс. Для определения положения аппарата в пространстве воспользуемся двумя системами координат: неподвижной, связанной с Землей, и подвижной, связанной с объектом $OXYZ$. Тогда движение его в физическом пространстве описывается уравнениями [2]:

$$\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{v}, \quad (1)$$

$$m(\dot{\mathbf{v}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}) = \mathbf{F}, \quad (2)$$

$$\dot{\mathbf{K}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{K} = \mathbf{M}, \quad (3)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{I}\boldsymbol{\omega}. \quad (4)$$

Здесь:

$\mathbf{r} = (x_g, y_g, z_g)$ – вектор пространственных координат;

$\mathbf{v} = (\dot{x}_g, \dot{y}_g, \dot{z}_g)$ – вектор скорости центра масс;

$\boldsymbol{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ – вектор угловой скорости вращения аппарата;

m, \mathbf{I} – масса и тензор инерции аппарата;

\mathbf{K} – кинетический момент аппарата относительно его центра масс;

\mathbf{F}, \mathbf{M} – результирующие вектора и моментов внешних сил.

При общем рассмотрении процессов управления БПЛА его векторы состояния и управляющих переменных имеют следующий вид:

$$\mathbf{x} = (x_g, y_g, z_g, \dot{x}_g, \dot{y}_g, \dot{z}_g, \psi, \vartheta, \gamma, \omega_x, \omega_y, \omega_z),$$

$$\mathbf{u} = (P, \delta_B, \delta_H, \delta_\Delta),$$

где ψ, ϑ, γ – углы рыскания, тангажа и крена, P – сила тяги двигателей, $\delta_B, \delta_H, \delta_\Delta$ – углы отклонения руля высоты, руля направления и элеронов.

Предметом исследования в терминальных задачах управления полетом БПЛА является перемещение центра масс аппарата:

$$\mathbf{r}(t), t = \overline{t_0, t_F}, \quad (5)$$

где t_0 и t_F – моменты начала и конца маневра.

Специфика задач управления летательными аппаратами обусловлена нелинейной структурой уравнений динамики (1)-(4) и целевыми требованиями, именно, к кинематике управляемых движений (5).

Обычно траектории движения БПЛА задаются в виде кинематического закона движения (5), который описывает зависимость координат аппарата от времени. В работах [1, 3, 4] предложен и получил развитие новый способ формализации траекторий движения аппарата, основанный на представлении их как пространственных кривых в системе координат $O_0 X_g Y_g Z_g$. В этом случае желаемую траекторию можно задавать либо системой уравнений:

$$\Phi_i(\mathbf{r}) = 0, i = \overline{1, 3}, \quad (6)$$

либо параметризованной функцией:

$$\mathbf{r}(\xi), \xi = \overline{0, \xi_F}, \quad (7)$$

где в качестве параметра ξ удобно использовать одну из пространственных координат системы $O_0 X_g Y_g Z_g$. При задании траектории движения БПЛА в виде (5) реализуется ее временная, а в виде (6), (7) ее пространственная синхронизация.

Синтез алгоритма управления посадочным маневром БПЛА. Одним из ключевых вертикальных маневров БПЛА является посадка. Математическая модель вертикального посадочного маневра аппарата описывается следующей системой дифференциальных уравнений [4]:

$$\dot{H} = V \sin \theta, \quad (8)$$

$$\dot{L} = V \cos \theta, \quad (9)$$

$$\dot{V} = (n_x(\alpha) - \sin \theta)g, \quad (10)$$

$$\dot{\theta} = \frac{(n_y(\alpha) - \cos \theta)g}{V}, \quad (11)$$

$$\dot{\vartheta} = \omega_z, \quad \vartheta = \alpha + \theta, \quad (12)$$

$$\dot{\omega}_z = \frac{q_B b_A S}{I_z} (m_z(\alpha) + m_z^{\bar{\omega}_z} b_A \omega_z / V + m_z^{\delta_B} \delta_B). \quad (13)$$

Здесь:

H, L – высота и дальность воздушного участка полета;

V – путевая скорость, воздушная скорость;

$\theta, \alpha, \vartheta$ – угол наклона траектории, угол атаки и угол тангажа;

n_x, n_y – продольная и нормальная перегрузки;

ω_z – угловая скорость изменения тангажа;

$m_z, m_z^{\bar{\omega}_z}, m_z^{\delta_B}$ – коэффициенты аэродинамического момента тангажа, продольного демпфирования и эффективности руля высоты;

q_B – скоростной напор: $q_B = \rho V^2 / 2$ (ρ – плотность воздуха);

I_z – момент инерции относительно поперечной оси;

S, b_A – площадь крыла и средняя аэродинамическая хорда крыла.

Вектора состояния и управления имеют следующий вид:

$$\mathbf{x} = (x_g, y_g, z_g, \dot{x}_g, \dot{y}_g, \dot{z}_g, \Psi, \vartheta, \gamma, \omega_x, \omega_y, \omega_z),$$

$$\mathbf{u} = (P, \delta_B).$$

Пространственная синхронизация в модели движения БПЛА в вертикальной плоскости реализуется делением каждого из уравнений (8), (10)-(13) на уравнение (9):

$$\frac{dH}{dL} = \operatorname{tg} \theta, \quad (14)$$

$$\frac{dV}{dL} = \frac{(n_x(\alpha) - \sin \theta)g}{V \cos \theta}, \quad (15)$$

$$\frac{d\theta}{dL} = \frac{(n_y(\alpha) - \cos \theta)g}{V^2 \cos \theta}, \quad (16)$$

$$\frac{d\vartheta}{dL} = \frac{\omega_z}{V \cos \theta}, \quad \vartheta = \alpha + \theta, \quad (17)$$

$$\frac{d\omega_z}{dL} = \frac{q_B b_A S}{I_z V \cos\theta} (m_z(\alpha) + m_z^{\sigma_z} b_A \omega_z / V + m_z^{\delta_B} \delta_B). \quad (18)$$

Рассмотрим задачу управления терминальным посадочным маневром БПЛА, обеспечивающего перевода аппарата из текущего в терминальное состояние по гибкой кинематической траектории. Как правило, желаемые траектории вертикального посадочного маневра конструируются в классе квазимногочленных функций, в виде зависимости высоты полета H от его текущего состояния и протяженности маневра $L \in [0, L_F]$:

$$H = H^*(\mathbf{x}, L).$$

Метод решения задачи базируется на аппарате обратных задач динамики и содержит следующие этапы:

1. Исходя из текущего фактического состояния \mathbf{x} и протяженности маневра L строится желаемая гибкая кинематическая траектория:

$$H^*(\mathbf{x}, L);$$

2. В результате подстановки $H^*(\mathbf{x}, L)$ в (14) находятся программные значения угла наклона траектории:

$$\theta = \theta^*(\mathbf{x}, L);$$

3. Из уравнений (15, 16) на основании H , θ и текущего состояния \mathbf{x} находятся программы изменения скорости и угла атаки:

$$V = V^*(\mathbf{x}, L), \quad \alpha = \alpha^*(\mathbf{x}, L);$$

4. Используя в (17) значения V , θ получается программа изменения угла тангажа и угловой скорости:

$$\vartheta = \vartheta^*(\mathbf{x}, L), \quad \omega_z = \omega_z^*(\mathbf{x}, L);$$

5. После подстановки всех найденных ранее значений в последнее уравнение (18) находится искомая управляющая программа рулем высоты:

$$\delta_B = \delta_B^*(\mathbf{x}, L).$$

Современные БЦВМ позволяют формировать гибкие траектории на каждом шаге квантования времени, в результате чего данный метод реализует механизм обратной связи – стратегию программно-позиционного управления, именуемую концепцией Open-Loop Optimal Feedback.

Синтезированный алгоритм управления реализован в системе MATLAB на примере посадочного терминального маневра – выравнивания БПЛА Aerosonde [6, 7]. Разработано соответствующее программное обеспечение [8], позволяющее проводить анализ выполнения аппаратом посадочного маневра с a priori заданными требованиями и ограничениями. На рис. 1, 2 приведены графики гибких траекторий и углов отклонений руля высоты для следующих начальных и терминальных значений высоты, дальности и скорости:

$$L_0 = 0\text{ м}, \quad H_{10} = 15\text{ м}, \quad H_{20} = 18\text{ м}, \quad V_F = 25\text{ м/с},$$

$$L_F = 300\text{ м}, \quad H_F = 2\text{ м}, \quad V_F = 20\text{ м/с}.$$

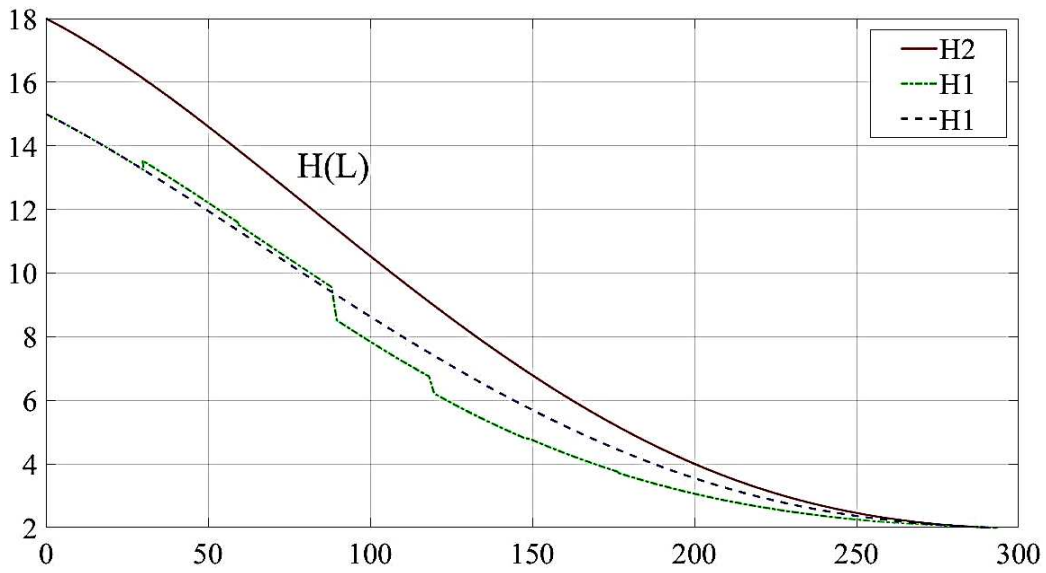


Рис. 1.

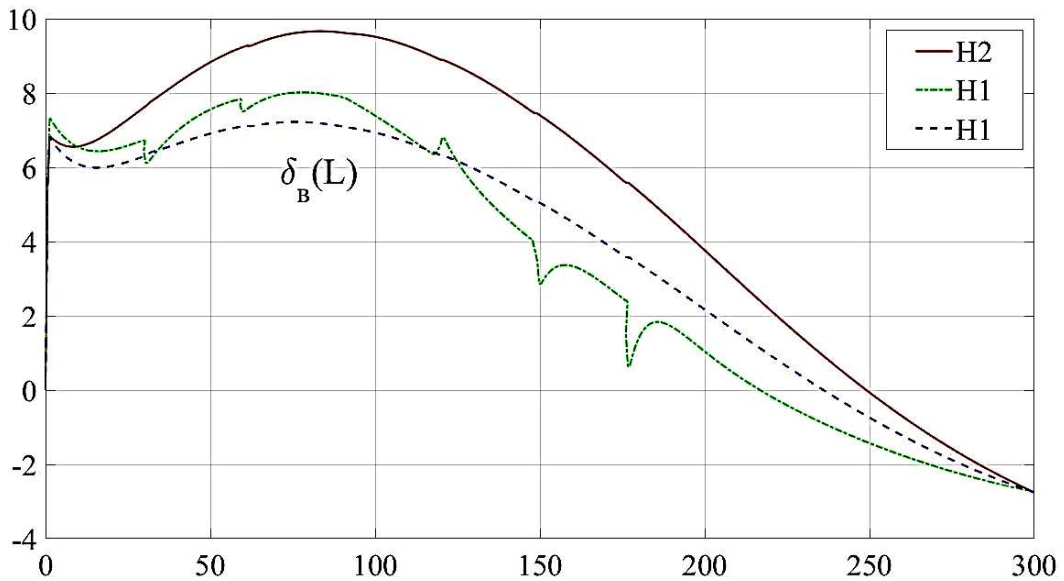


Рис. 2.

В работе была разработана математическая модель динамики продольного движения БПЛА на основе концепции гибких кинематических траекторий с пространственной синхронизацией движений.

Апробация синтезированного алгоритма автоматического управления посадкой БПЛА методом цифрового моделирования показала высокое качество посадочного маневра и выполнение всех необходимых требований и ограничений.

Список литературы

1. Теряев Е.Д., Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б., Петрин К.В. Концепция «гибких кинематических траекторий» в задачах терминального управления подвижными объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. №12. С. 7-15.
2. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Принцип гибких кинематических траекторий управления терминальными маневрами летательных аппаратов // Системы управления беспилотными космическими и атмосферными ЛА: тезисы докладов II Всероссийской научно-технической конференции. – М.: МОКБ «Марс», 2012. – С. 51-53.
3. Гуськов Ю.П., Загайнов Г.И. Управление полетом самолетов. – М.: Машиностроение, 1980. – 215с.
4. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Методы «гибких» траекторий в задачах терминального управления вертикальными маневрами летательных аппаратов / Гл. 2 в монографии «Проблемы управления сложными динамическими объектами авиационной и космической техники». – М.: Машиностроение, 2015. – С. 51-110.
5. Котик М.Г. Динамика взлета и посадки самолетов. – М.: Машиностроение, 1984. – 256с.
6. Burston M.T., Sabatini R., Clothier R., Gardi A. Reverse Engineering of a Fixed Wing Unmanned Aircraft 6-DoF Model for Navigation and Applications // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 629. P. 164-169,
7. Bateman F., Noura H., Ouladsine M Faultdiagnosis and fault-tolerant control strategy for theaerosonde UAV // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2011. 47(3). P. 2119-2137.
8. Сергеев А.А. Разработка и исследование алгоритма управления посадочным маневром БПЛА // Ломоносов-2018. Секция «Физика». Сб. тезисов докладов. – М.: Физический факультет МГУ, 2018. – С. 735.

References

1. Teryaev E.D., Filimonov A.B., Filimonov N.B., Petrin K.V. The conception of «flexible kinematic trajectories» in the problems of terminal control by moving objects // Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie. 2011. No. 12. P. 7-15.
2. Filimonov A.B., Filimonov N.B. The principle of flexible kinematic trajectories for controlling the terminal maneuvers of aircrafts // Control systems for unmanned space and atmospheric aircraft: abstracts of the report II Russian Scientific and Technical Conference. – М.: MEDB «Mars», 2012. – P. 51-53.
3. Guskov Yu.P., Zagainov G.I. Aircraft flight control. Textbook for aviation universities. – М.: Machinostroenie, 1980. – 215p.
4. Filimonov A.B., Filimonov N.B. Methods of «flexible» trajectories in the tasks of terminal control of aircraft vertical maneuvers / Ch. 2 in the monograph «Problems of control of complex dynamic objects of aviation and space technology». – Moscow: Machinostroenie, 2015. – P. 51-110.

5. Kotik M.G. Dynamics of take-off and landing of aircraft. – Moscow: Mashinostroenie, 1984. – 256p.
9. Burston M.T., Sabatini R., Clothier R., Gardi A. Reverse Engineering of a Fixed Wing Unmanned Aircraft 6-DoF Model for Navigation and Applications // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 629. P. 164-169,
6. Bateman F., Noura H., Ouladsine M Faultdiagnosis and fault-tolerant control strategy for theaerosonde UAV // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2011. 47(3). P. 2119-2137.
7. Sergeev A.A. Development and research of an UAV landing maneuver control algorithm // Lomonosov-2018. Section «Physics». Collection of Abstracts. – Moscow: Physical faculty MSU, 2018. – P. 735.

Филимонов Николай Борисович – доктор технических наук, профессор, nbfilimonov@mail.ru	Filimonov Nikolay Borisovich – doctor of technical sciences, professor, nbfilimonov@mail.ru
Сергеев Алексей Александрович – аспирант, alxsrg95@gmail.com	Sergeev Alexey Alexandrovich – PhD student, alxsrg95@gmail.com
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия	Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Received 08.11.2019