

Исследование технических средств обеспечения и математических алгоритмов управления автоматической посадкой БПЛА

И. Р. Гогорев¹, П. В. Соколов²

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹ilmirgogorev@yandex.ru, ²pvsokolov@etu.ru

Аннотация. Задача посадки БПЛА может быть решена разными методами. Каждый метод может быть использован только при определённом техническом оснащении, как места посадки, так и самого летательного аппарата. Также использование того или иного метода для его функционирования налагает определённые требования на динамику летательного аппарата. Работа посвящена исследованию технических средств обеспечения автоматической посадки и их преимуществ и недостатков. Проводится сравнение данных методов с точки зрения затрачиваемых средств и допущений о состоянии условий работы. В работе также представлен взгляд автора на решение проблемы.

Ключевые слова: БПЛА; посадка; система управления

I. ВВЕДЕНИЕ

Значительная доля аварийных ситуаций происходит именно на этапе посадки беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в ручном режиме, связано это с «человеческим фактором», когда оператор неверно оценивает местоположение БПЛА в пространстве. Для исключения подобных случаев в современных БПЛА этот этап максимально автоматизируется.

Беспилотное мобильное средство обычно функционирует не абсолютно самостоятельно, а в составе технического комплекса, куда могут входить еще различные оперативные пункты, средства навигации, связи и т. д. Одним из самых важных узлов такого комплекса для БПЛА является взлётно-посадочная система. Таким образом, задачу посадки можно декомпозировать на подзадачи, каждая из которых формируется своей подсистемой взлётно-посадочного комплекса в самостоятельный функциональный блок. Анализ работ по теме позволяет судить, что задача посадки может быть представлена структурной схемой на рис. 1.

Двумя важными аспектами посадки является навигация и управление. Задача навигации заключается в расчёте относительного положения БПЛА и места посадки, а также положение в земной системе координат. Аспект управления заключается в необходимости следования определённой траектории и манёвра при посадке.

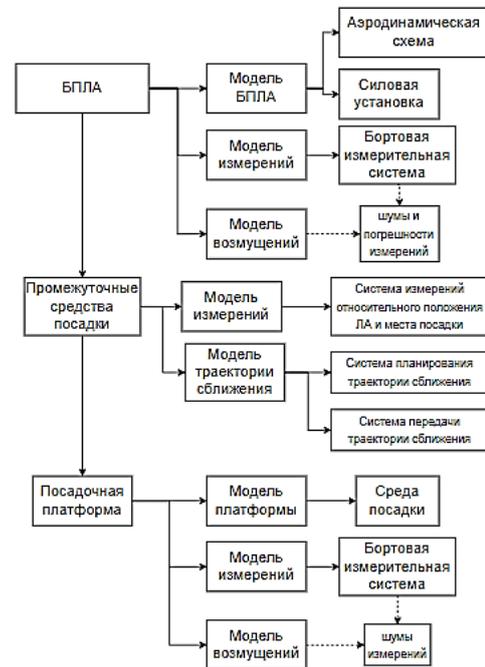


Рис. 1. Декомпозиция задачи посадки БПЛА

Обобщённая модель БПЛА представляет систему уравнений движения твёрдого тела, которое имеет шесть степеней свободы, три из которых относятся к поступательному движению центра масс, а три других к вращательному движению относительно центра масс. Модель движения центра масс БПЛА, представленная в скоростной системе координат, описывается следующим образом:

$$\begin{cases} m\dot{V} = \sum F_x \\ mV\dot{\theta} = \sum F_y \\ -mV\dot{\psi} \cos \theta = \sum F_z, \end{cases} \quad (1)$$

где V – скорость движения БПЛА, m – масса БПЛА, θ – угол наклона траектории к горизонту, ψ – угол поворота траектории (вокруг оси y), $\sum F_x$, $\sum F_y$, $\sum F_z$ – векторные суммы проекций всех сил, которые действуют на БПЛА относительно соответствующих осей скоростной системы координат.

Для описания вращения БПЛА относительно его центра масс в связанной системе координат в основном используется следующие уравнения:

$$\begin{cases} J_x \dot{\omega}_x + (J_z - J_y) \omega_y \omega_z = M_x \\ J_y \dot{\omega}_y + (J_x - J_z) \omega_x \omega_z = M_y \\ J_z \dot{\omega}_z + (J_y - J_x) \omega_y \omega_x = M_z \end{cases} \quad (2)$$

В вышеприведенных равенствах: J_x, J_y, J_z – главные центральные моменты инерции тела, действующие относительно осей системы координат, связанной с телом, M_x, M_y, M_z – суммы проекций моментов всех действующих сил на соответствующие оси.

Но в таком виде БПЛА описывается лишь как неуправляемое тело, поэтому для полного описания динамики БПЛА необходимы также уравнения описывающие уравнения сил и крутящих моментов, а также блок описывающий регулятор, который преобразует данные с датчиков в величину и закон сил и моментов. На формирование сил и моментов в основном влияет аэродинамическая схема, которая в основном подразделяется на вертолётную (коптерную) и самолётную [1]. В каждой из них по-разному формируется подъёмная сила: от винта и от крыла соответственно [2]. Также для каждой из них требуются свои условия и средства для посадки. Но вне зависимости от динамики манёвр посадки летательных аппаратов с указанными схемами содержит такие этапы как глиссада и сближение. На этапе глиссады летательный аппарат должен под определённым углом подлететь к посадочной полосе. На этапе сближения ЛА должен совершить манёвр торможения либо постепенно снижая скорость в воздухе, либо при пробеге по посадочной полосе палубы [3].

За расчёт положения палубы и БПЛА в пространстве отвечают такие устройства как построители вертикали. Они бывают разные: гироскопическая, микромеханическая, магнитометрическая и др., а также вертикаль на основе визуального отслеживания горизонта [4]. Чаще всего используются гировертикали из-за своей компактности и точности. Гировертикаль состоит из трёх гироскопов и трёх акселерометров и описывается выражением:

$$\frac{d\vec{g}}{dt} = \vec{g} \times \vec{\Omega} \quad (3)$$

или в дискретном виде:

$$\vec{g}_i = \tau \vec{g}_{i-1} \times \vec{\Omega}_{i-1} + \vec{g}_{i-1} \quad (4)$$

где \vec{g} – вектор проекций ВУСП, $\vec{\Omega}$ – показания блока датчиков.

Также интересным и перспективным является вариант использования видео систем, с помощью которых можно не только отследить горизонт, но и переложить задачу отслеживания углов качки палубы, линейное перемещение корабля и своё относительное положение относительно корабля, – на сам БПЛА. Подобие такой системы предложено в работе [5], а также, правда, с посадкой на наземную подвижную платформу, в [6]. В каждой работе демонстрируется, что для работы такой системы на палубе необходимы

наличие специальных ориентиров: инфракрасных огней в [5] и специального узора в [6].

Иначе задачу определение собственных углов качки и положения БПЛА относительно корабля можно возложить на бортовую систему палубы. Тогда ей необходима своя вертикаль, дальномерная или видео система для определения расстояния до БПЛА и курсоглиссадный указатель – специальное устройство, имеющее излучатели радио или видимого диапазона, например [7]. Соответственно на БПЛА должен быть приёмник излучения, и он должен вычислять частоту и интенсивность излучения, что куда более простая вычислительная задача, чем распознавание ориентиров.



Рис. 2. Расчёт горизонта по видеосъёмке

II. МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ

Обычно системы посадки используют инерциальные и высотмерные датчики или GPS, но, как было сказано, могут использовать и системы компьютерного зрения. Сигналы GPS не всегда доступны, поэтому посадка может быть невозможна во многих отдаленных регионах. В работе [8] выяснили, что GPS системы или системы, основанные на инерциальных датчиках, подходят для полетов на большие расстояния без требования высокой точности, но не подходят для точных и близких полетов. Там рассматривается решение данной проблемы использованием как раз подхода видео систем.

Обычно компьютерное зрение подразделяют на монокулярное, которое использует одну камеру, – и стереозрение, которое способно оценивать глубину объекта за счёт использования кадров с нескольких камер, снимающих под разным углом. В работе [9] использовали комбинацию монокулярного и стереозрения для оценки угла приближения и относительной высоты БПЛА с использованием преобразования Хафа и алгоритма RANSAC (Random Sample Consensus). В [10] разработали систему оценки глубины для контроля посадки с использованием одной камеры, которая используется для захвата двух последовательных наземных изображений для имитации пары стереоизображений.

Второй важной частью верхнего уровня системы управления, как уже было сказано во введении, является непосредственно управление. В связи со сложностью обеспечения безаварийной автоматической посадки и сложностью динамики самого ЛА упор в современных исследованиях делается на методы нелинейного управления. Одним из таких методов является бэкстеппинг. Данный метод позволяет начать с отдельной подсистемы и постепенно «отступать», включая внешние подсистемы и, таким образом, стабилизируя всю систему. Метод бэкстеппинга используется в основном для систем, описываемых системой или приводимых к системе:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} = f_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}) + g_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})x_n \\ \dot{x}_n = f_n(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n) + g_n(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n)u \end{cases} \quad (5)$$

где $[x_1, x_2, \dots, x_n] = x \in R^n$ – измеримые переменные состояния системы, $\{f_1, f_2, \dots, f_n : f_i(0,0,\dots,0) = 0\}$ – скалярные функции от переменных состояния, $\{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ – гладкие функции от переменных состояния, u – скалярный вход системы.

Сначала управление формируется для первого уравнения системы с помощью функции Ляпунова. Далее управление формируется последовательно для всех уравнений, используя функции Ляпунова вида $V_n(x_1, \dots, x_{n-1}, x_n) = V_{n-1} + 0.5(x_n - u_{n-1})^2$. В работе [11] в качестве подсистем были выбраны подсистема линейного перемещения и подсистема вращения. Бэкстеппинг также может использоваться для синтеза адаптивного управления. В работе [12] был предложен адаптивный бэкстеппинг регулятор, который нивелировал ошибки аэродинамических коэффициентов в модели с помощью адаптивной оценки параметров.

Другим современным классом методов управления нелинейными объектами является интеллектуальное управление, которое в основном делится на два подхода:

1) Нечеткая логика: Нечеткая логика – это форма многозначной логики. Она оперирует понятием частичной истины, и определяет эту истинность функцией $\mu(u): U \rightarrow [0,1]$, где U – множество значений величины, чью истинность мы оцениваем. Преобразование одних величин в другие тут осуществляется с учётом их истинности и заданного между ними логического отношения. Преимущество нечеткой логики в том, что мы можем работать в условиях неопределённости, когда нам известны лишь некоторые качественные данные о управляемом процессе. Также контроллеры нечеткой логики могут быть объединены с обычными контроллерами, такими как ПИД, для более качественного управления. В работе [13] разработали нечеткий логический контроллер типа ПД и протестировали его на симуляторах с использованием линейных и нелинейных моделей. В работе [14] разработали регулятор, объединяющий бэкстеппинг и нечёткий подход для траекторного управления БПЛА.

2) Нейронные сети: В отличие от подхода с нечёткой логикой, в котором факт неполноты информации о системе берётся как данность и его не пытаются устранить, в подходе с нейронными сетями наоборот пытаются нужную информацию восстановить, используя способность нейросетей к обучению. На основе набора наблюдений и набора входных данных, внутренняя структура или параметры самой нейросети изменяются так, чтобы её выходы при заданных входах соответствовали желаемым выходным с максимальной точностью. В [15] рассмотрена проблема разработки интеллектуального контроллера посадки в присутствии различных моделей ветра для расширения зоны

безопасности полета. Было предложено несколько типов регуляторов для различных целей.

Также в условиях неопределённости позволяют работать методы адаптивного управления. Данные методы позволяют не только работать в условиях неопределённости в объекте, но также работать в условиях воздействия возмущений, имеющих заранее неопределённые параметры. В работе [16] рассмотрена задача посадки БПЛА в условиях качки судна с зацепом за судовую кран-балку, которая вносит дополнительную связь в динамику посадочной системы.

В конце приведём пример моделирования системы захода на посадку. В качестве объекта был выбран БПЛА самолётного типа. Была использована линеаризованная модель, взятая из [17]. Был применен нечёткий регулятор с ПД структурой из [13], так как он позволяет формировать управление при неполном знании модели.

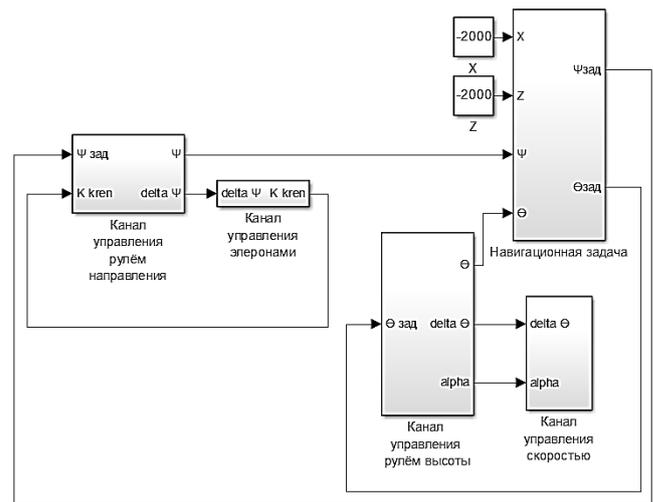


Рис. 3. Математическая модель БПЛА самолётного типа

На рис. 3 представлена структура модели БПЛА с выбранным регулятором. На рис. 4 и 5 – результат моделирования данной модели с выбранным регулятором в разных плоскостях.

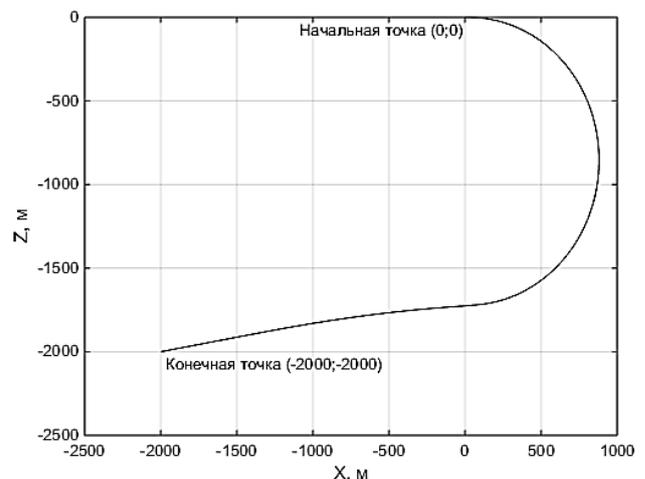


Рис. 4. Движение БПЛА в заданную точку в горизонтальной плоскости

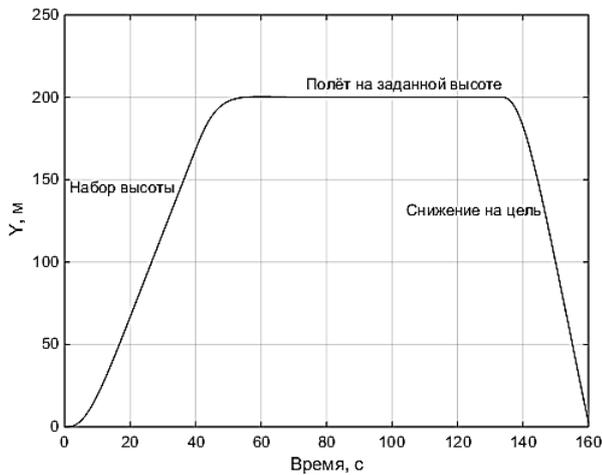


Рис. 5. Изменение высоты БПЛА при движении в заданную точку

Выбранный регулятор показывает хороший результат по точности, даже не смотря на то, что мы почти не использовали знания о самой модели, что также подтверждает перспективность подобных методов управления.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была описана общая структура задачи посадки БПЛА. Были описаны необходимые для решения задач технические средства и современные методы управления. Также было проведено моделирование одного из методов управления – с нечёткой логики. Данный метод был выбран, так как он видится автору наиболее перспективным, так как позволяет управлять сложными системами на достаточно качественном уровне при этом обладая весьма ограниченными знаниями о самой системе, к тому же сам метод по сравнению с другими, используемыми для решения того же рода задач, прост в синтезе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Austin R. Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment. John Wiley & Sons, 2011, pp. 34–50.
 [2] Моисеев В.С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами. Казань: ГБУ РЦМКО. 2013.
 [3] Подоплёкин Ю.Ф., Шаров С.Н. Ключевые вопросы теории и проектирования систем посадки беспилотных летательных

аппаратов на малоразмерные суда // Информационно-управляющие системы. 2013. №. 6 (67). С. 14-24.
 [4] Каликанов А.В. Аналитический обзор систем ориентации и навигации малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов. 2018. №. 17. С. 57-63.
 [5] Агеев А.М. и др. Системы автоматической посадки беспилотных летательных аппаратов: проблемы и пути решения // Военная мысль. 2020. №. 4. С. 130-136.
 [6] Kim J., Woo S., Kim J. Lidar-guided autonomous landing of an aerial vehicle on a ground vehicle //2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). IEEE, 2017. С. 228-231.
 [7] Луна-3Э. Оптическая система посадки: [Электронный ресурс] // АО «Концерн "ЦНИИ "Электроприбор». URL: <http://www.elektropribor.spb.ru/katalog/sistemy-predpoletnoy-podgotovki-bezopasnosti/luna-3e-opticheskaya-sistema-posadki/>. (Дата обращения: 11.03.2023).
 [8] Cesetti A. et al. A vision-based guidance system for UAV navigation and safe landing using natural landmarks // Journal of intelligent and robotic systems. 2010. Т. 57. С. 233-257.
 [9] Pan X. et al. Vision-based approach angle and height estimation for UAV landing // 2008 Congress on Image and Signal Processing. IEEE, 2008. Т. 3. С. 801-805.
 [10] Sereewattana M., Ruchanurucks M., Siddhichai S. Depth estimation of markers for UAV automatic landing control using stereo vision with a single camera // Int. Conf. Information and Communication Technology for Embedded System. 2014.
 [11] Bouabdallah S., Siegwart R. Backstepping and sliding-mode techniques applied to an indoor micro quadrotor //Proceedings of the 2005 IEEE international conference on robotics and automation. – IEEE, 2005. – С. 2247-2252.
 [12] Yoon S.H., Kim Y.D., Park S.H. Constrained adaptive backstepping controller design for aircraft landing in wind disturbance and actuator stuck // International Journal of Aeronautical and Space Sciences. 2012. Т. 13. №. 1. С. 74-89.
 [13] Nho K., Agarwal R.K. Automatic landing system design using fuzzy logic //Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2000. Т. 23. №. 2. С. 298-304.
 [14] Рогозин О.В., Пенской И.С. Метод траекторного управления мультироторным беспилотным летательным аппаратом в задаче следования за объектом // Образовательные технологии (Москва). 2019. №. 4. С. 92-110.
 [15] Malaek S.M. B. et al. Intelligent autoland controller design using neural networks and fuzzy logic //2004 5th Asian Control Conference (IEEE Cat. No. 04EX904). IEEE, 2004. Т. 1. С. 365-373.
 [16] Шаров С.Н., Андриевский Б.Р. Определение положения посадочного устройства беспилотного летательного аппарата в условиях качки судна // Морской вестник. 2012. №. 2. С. 75-77.
 [17] Копысов О.Э. Бортовые системы управления: Лекции / Кафедра "Системы управления летательными аппаратами". Национальный аэрокосмический Университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", 2011. 223 с.