

Электронный научный журнал "Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках" <http://mathmod.esrae.ru/>

URL статьи: mathmod.esrae.ru/32-120

Ссылка для цитирования этой статьи:

Ермаков Р.В., Львов А.А., Новиков А.Р., Лившиц Д.Ю. Использование нейронной сети для построения алгоритма стабилизации беспилотного летательного аппарата вертолётного типа // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2020. №4

УДК 615.035.4

DOI: 10.24411/2541-9269-2020-00002

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ АЛГОРИТМА СТАБИЛИЗАЦИИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ВЕРТОЛЁТНОГО ТИПА

Ермаков Р.В.¹, Львов А.А.², Новиков А.Р.³, Лившиц Д.Ю.⁴

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Россия, Саратов, roma-ermakov@yandex.ru

²Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Россия, Саратов, alvova@mail.ru

³Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Россия, Саратов, ralcta@mail.ru

⁴Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Россия, Саратов, d.livshits@kbpa.ru

USE OF A NEURAL NETWORK FOR CONSTRUCTING AN ALGORITHM FOR STABILIZING AN UNMANNED AIRCRAFT OF A HELICOPTER TYPE

Ermakov R.V.¹, L'vov A.A.², Novikov A.R.³, Livshits D.Yu.⁴

¹Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia,
Saratov, roma-ermakov@yandex.ru

²Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia,
Saratov, alvova@mail.ru

³Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia,
Saratov, ralcta@mail.ru

⁴Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia,
Saratov, d.livshits@kbpa.ru

Аннотация. В статье рассмотрены проблемы реализации систем управления для малых беспилотных летательных аппаратов. Отмечены недостатки существующих алгоритмов стабилизации вертолета в пространстве. Предложен новый алгоритм стабилизации вертикального канала беспилотного летательного аппарата вертолётного типа, основанный на использовании аппроксимации нейронной сетью нелинейной динамики вертолёта. Преимуществом предложенного подхода является отсутствие необходимости априорного

знания динамических свойств летательного аппарата, которые, как правило, в случае малых беспилотных летательных аппаратов вертолётного типа, достоверно неизвестны.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат вертолётного типа, нейронная сеть, система автоматического управления.

Abstract. The article deals with the problems of implementing control systems for small unmanned aerial vehicles. The disadvantages of existing algorithms for stabilizing the helicopter in space are noted. A new algorithm for stabilizing the vertical channel of an unmanned aerial vehicle of a helicopter type, based on the use of a neural network approximation of the nonlinear dynamics of a helicopter, is proposed. The advantage of the proposed approach is that there is no need for a priori knowledge of the dynamic properties of an aircraft, which, as a rule, are not reliably known in the case of small unmanned aerial vehicles of a helicopter type.

Keywords: unmanned aerial vehicle of helicopter type, neural network, automatic control system.

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) все чаще используются в самых разных отраслях промышленности [1,2]. Они востребованы в строительстве, экологических исследованиях, мониторинге различных процессов и т. д. Наибольшие трудности возникают при проектировании и разработке отечественных летно-навигационных систем для малых (до 100 кг) и сверхмалых (до 10 кг) БПЛА [2]. Малые габариты и масса данных летательных аппаратов влекут значительные ограничения по размеру, весу и потребляемой мощности наряду со высокими требованиями к надежности и отказоустойчивости. Кроме того, проблемы электромагнитной совместимости для небольших беспилотных летательных аппаратов являются особенно острыми из-за размещения большого количества радиосистем в ограниченном объеме.

Целью данной работы является разработка концепции универсальной летно-навигационной системы для небольших и сверхмалых БПЛА, которая могла бы быть установлена на любом его типе и иметь открытую архитектуру как в аппаратном, так и в программном плане. Кроме того, конфигурация системы должна быть легко обновлена в зависимости от целей и задач, поставленных для БПЛА.

На малых БПЛА весом до 100 кг перед разработчиками возникает ряд проблем [1,2]. Далее перечислим их кратко.

Определение пространственного положения летательного аппарата, определение его параметров движения. В настоящий момент для решения задачи используются платформенные интегрированные навигационные системы [3-6] и малогабаритные интегрированные инерциально-спутниковые навигационные системы [7]. Инерциальные системы навигационного класса точности не используются из-за их высокой стоимости и неудовлетворительных массогабаритных характеристик [1]. Альтернативой им всё чаще выступают системы ориентации, использующие оптическую информацию [8].

Электромагнитная совместимость. Расположенные в непосредственной близости друг от друга радиопередающие системы подвержены взаимному влиянию. Компактные размеры летательного аппарата ещё сильнее усугубляют данную проблему. Желательна разработка единой антенно-фидерной системы, что позволит сократить габариты и массу.

Автоматический взлёт и посадка. Малые БПЛА часто не имеют необходимых систем для определения высоты. Наиболее часто используемые на пилотируемых летательных аппаратах локационные системы не подходят для использования в малых БПЛА по массо-габаритным характеристикам, а также создают проблемы в вопросах электромагнитной совместимости ввиду слишком близкого расположения всех компонентов бортового радиоэлектронного оборудования. Система посадки с расположенными на земле маяками и малогабаритной бортовой частью, или системы технического зрения могут обеспечить получение необходимой информации для обеспечения автоматической посадки [8-10].

Автоматическое построение траектории. Траектория полета БПЛА должна строиться с учётом информации с камер, карт, высотомера, в случае если он есть, и других систем. Частным случаем является задача уклонения от столкновения с препятствием. Также существует проблема поиска и отслеживания объектов в потоке информации от видеокamer [11], управления ЛА для сопровождения объекта, находящегося в поле зрения фронтальной камеры.

Алгоритмы стабилизации

Перечисленные выше аспекты ужесточают требования к реализации алгоритмов системы управления вертолётom. Основное требование при проектировании системы управления вертолётom состоит в гарантировании его устойчивости. В литературе были предложены многие методы для управления движением систем вертолета, начиная от линеаризации обратной связью до адаптивного управления с моделью и инверсной динамики. Предложенные методы, как правило, требуют достаточно точного знания динамических моделей для того, чтобы достичь удовлетворительной работы. Важным фактором при проектировании автопилота для вертолетов является способ устранения неизвестных возмущений номинальной модели, как параметрических и функциональных неопределенностей, так и неучтенной динамики и помех от окружающей среды. Типичные практические приложения в данной области характеризуются нестационарными аэродинамическими возмущениями, которые, как правило, трудно моделировать точно. Наличие неопределенности и возмущений может нарушить функции автопилота и привести к снижению производительности.

Особенность разработки алгоритмов управления малыми беспилотными летательными аппаратами заключается в полном отсутствии адекватных математических моделей последних. Вследствие этого, автопилот должен быть

адаптивным, причём обладать способностью парировать параметрические возмущения в достаточно широких пределах. По этим причинам, значительные усилия исследователей были направлены на проектирование управления, которое гарантируют стабильность и надежность для беспилотных вертолетов. Большинство систем вертолетов по своей природе нелинейны и их динамика описывается нелинейными дифференциальными уравнениями. Тем не менее, для целей анализа, исследователи обычно получают линеаризованные модели систем вертолета. Более конкретно, линейная модель, которая приближается к конкретной нелинейной вертолетной системе может быть получена в окрестностях некоторой рабочей точки и незначительном уровне управляющих воздействий. Многие методы для проектирования автопилотов и методы анализа для линейных систем были предложены в литературе, например, линейная теория H_∞ управления была применена к линейной модели вертолета в [12, 13].

Тем не менее, законы управления на основе линеаризованной динамики вертолета не имеют глобальной применимости, поскольку они демонстрируют желаемое поведение только вокруг рабочей точки. Из-за этого, многие исследователи применяют нелинейные методы контроля для динамических моделей систем вертолета. Метод линеаризации обратной связью был использован для канала высоты в [14]. Динамический скользящий режим управления был предложен для регулирования высоты в работе [15]. В работе [16-20] для управления полетом беспилотного вертолета используются методы нечёткой логики.

Методы управления, предложенные в научно-исследовательских работах, упоминавшихся выше, требуют достаточно точного знания динамических моделей летательного аппарата для достижения удовлетворительного результата. Наличие неопределенности и возмущений могут нарушить функционирование автопилота и привести к снижению устойчивости и управляемости. Для того, чтобы иметь возможность управлять летательным аппаратом при наличии неопределенностей в модели, были предложены методы аппроксимации на основе использования нейронных сетей. Использование инверсной динамики с дополненной нейронной сетью было предложено, например, в [18, 21-25] для обработки неучтенной динамики.

Для простоты ограничимся рассмотрением вертикального канала управления вертолѐта, описываемого следующей нелинейной системой уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u) \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (1)$$

где $x \in R^n$ – вектор состояния системы, $u, y \in R$ – вход и выход системы соответственно f – неизвестная функция. Задача управления состоит в отслеживании выходом $y(t)$ желаемой траектории $y_d(t)$ так, чтобы удовлетворялось условие (2)

$$|y(t) - y_d(t)| \leq \delta, \quad \delta > 0. \quad (2)$$

Опорная траектория $y_d(t)$ описывается моделью (3):

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_{di} &= \xi_{d(i+1)}, \quad 1 \leq i \leq \rho - 1, \quad \rho \geq 2 \\ \dot{\xi}_{d\rho} &= f_d(\xi_d), \\ y_d &= \xi_{d1}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\xi_d = [\xi_{d1}, \xi_{d2}, \dots, \xi_{d\rho}]^T \in R^\rho$ – вектор состояния, а y_d – выход опорной системы. f_d – известная функция.

Представим управляющий сигнал в форме

$$\begin{aligned} u &= u_{nn} + u_b, \quad \text{где} \\ u_{nn} &= W^T S(V^T Z), \\ u_b &= -k_\rho z_\rho - z_{\rho-1} - k_b \left(\|ZW^T \hat{S}'\|_F^2 + \|\hat{S}' V^T Z\|^2 \right) z_\rho \end{aligned} \quad (4)$$

где слагаемое u_{nn} определяет аппроксимацию нейросетью неизвестной функции f , согласно (5):

$$f(Z) = W^T S(V^T Z) + \varepsilon(Z), \quad (5)$$

где $Z = \xi_d \in \Omega_Z \subset R^l$ – входные переменные нейронной сети, $W \in R^l$, $V \in R^{(\rho+1) \times l}$ – матрицы весовых коэффициентов нейросети, $S(\cdot) \in R^l$ – вектор известных непрерывных базисных функций, $\varepsilon(Z)$ – ошибка аппроксимации, такая, что $|\varepsilon(Z)| \leq \bar{\varepsilon}$, $\forall Z \in \Omega_Z$, $\hat{S}' = \text{diag}\{\hat{s}'_1, \hat{s}'_2, \dots, \hat{s}'_l\}$, $\hat{s}'_i = d[s(z_a)]/dz_a$;

а слагаемое u_b определяет робастные свойства системы.

Обозначим оптимальные значения весовых коэффициентов через W^*, V^* , а оценки этих значений через \hat{W}, \hat{V} . Тогда $\tilde{W} = \hat{W} - W^*$, $\tilde{V} = \hat{V} - V^*$ – матрицы ошибок оценивания. Будем использовать следующие законы адаптации:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{W}} &= -\Gamma_w \left[(\hat{S} - \hat{S}' V^T Z) z_\rho + \sigma_w \hat{W} \right], \\ \dot{\hat{V}} &= -\Gamma_v \left[Z \hat{W}^T \hat{S}' z_\rho + \sigma_v \hat{V} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

где $\Gamma_w = \Gamma_w^T > 0$, $\Gamma_v = \Gamma_v^T > 0$, $\sigma_w > 0$, $\sigma_v > 0$ – параметры алгоритма настройки.

Известно, что для начальных условий, принадлежащих некоторому компактному множеству Ω_0 , все сигналы рассматриваемой системы ограничены, а ошибка отслеживания желаемой траектории $z_1 = y - y_d$ сходится к компактному множеству

$$\Omega_{z_1} := \left\{ z_1 \in R \mid \|z_1\| \leq \sqrt{\frac{2c_2}{c_1}} \right\}, \quad (7)$$

где константы c_1, c_2 определяются параметрами алгоритма настройки нейросети.

Разработанные алгоритмы могут использоваться при создании эффективных высокоавтоматизированных пилотажных комплексов нового поколения для перспективных маневренных вертолётов.

Заключение

В статье показаны проблемы реализации систем управления для беспилотных летательных аппаратов. Отмечены недостатки существующих алгоритмов стабилизации вертолета в пространстве. Предложен новый алгоритм стабилизации вертикального канала беспилотного летательного аппарата вертолётного типа, основанный на использовании аппроксимации нейронной сетью нелинейной динамики вертолётного типа. Преимуществом предложенного подхода является отсутствие необходимости априорного знания динамических свойств летательного аппарата, которые, как правило, в случае малых беспилотных летательных аппаратов вертолётного типа, достоверно неизвестны.

Список литературы

1. Абакумов А.В., Гуцевич Д.Е., Ермаков Р.В., Лившиц Д.Ю., Ромадин С.Н., Серанова А.А., Сергушов И.В., Скрипаль Е.Н. Особенности конструирования пилотажно-навигационных комплексов для малых беспилотных летательных аппаратов различного типа // XXIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд - во ЦНИИ «Электроприбор», 2017. С. 142 – 152
2. Ермаков Р.В., Серанова А.А., Лившиц Д.Ю., Кузьменко И.К., Гуцевич Д.Е., Чеховская К.Д., Скрипаль Е.Н., Абакумов А.В., Львов А.А. Аспекты проектирования отказобезопасного пилотажно-навигационного комплекса для беспилотных летательных аппаратов // XXVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам Сборник материалов. 2019. С. 62-67.
3. Ермаков Р.В., Кондратов Д.В., Львов А.А., Скрипаль Е.Н. Особенности применения микромеханических инерциальных датчиков при эксплуатации на летательных аппаратах вертолётного типа // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2017. Т. 2. С. 122-124.
4. Гребенников В.И., Еремина Л.В., Мишин Б.А., Нахов С.Ф., Ермаков Р.В. Малогабаритный трёхкомпонентный волоконно-оптический измеритель угловой скорости средней точности // XIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2006. С.219-225
5. Пат. 2436047 Российская Федерация, МПК G 01 C 23 00. Способ обработки информации о перемещении летательного аппарата / А.И. Клименко, А.А. Клименко, А.В. Абакумов, Е.Н. Скрипаль, Р.В. Ермаков, Л.А. Филиппов; 17.09.2010; заявитель и патентообладатель Клименко А.И. ; опубл. 10.12.11, Бюл. № 34.

6. Ермаков Р.В., Попов А.Н., Скрипаль Е.Н., Калихман Д.М., Кондратов Д.В., Львов А.А. Методы и результаты испытаний инерциальных датчиков, предназначенных для эксплуатации на летательных аппаратах вертолётного типа // XXIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор». 2017. С. 244 – 248.
7. N. Barrera, Ed Unmanned Aerial Vehicles. / New York, NY, USA, Nova Science Publishers. 2020. 250 с.
8. José A. Paredes, Fernando J. Álvarez, Teodoro Aguilera, Fernando J. Aranda Precise drone location and tracking by adaptive matched filtering from a top-view ToF camera // Expert Systems with Applications. Volume 141. 2020. 112989. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.112989>.
9. Shaobao Li, Petar Durdevic, Zhenyu Yang overing Control for Automatic Landing Operation of An Inspection Drone to A Mobile Platform // IFAC-PapersOnLine. Volume 51. Issue 8. 2018. P. 245-250. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318307146>, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.384>.
10. Watkins S., Burry J., Mohamed A., Marino M., Prudden S., Fisher A., Kloet N., Jakobi T., Clothier R. Ten questions concerning the use of drones in urban environments // Building and Environment. Volume 167. 2020. 106458. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106458>.
11. Shuo Li, Michaël M.O.I. Ozo, Christophe De Wagter, Guido C.H.E. de Croon Autonomous drone race: A computationally efficient vision-based navigation and control strategy // Robotics and Autonomous Systems. Volume 133. 2020. 103621. URL: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103621>.
12. Prempain E., Postlethwaite I. Static H1 loop shaping control of a fly-by-wire helicopter // Automatica. 2005. № 41(9). pp1517–1528
13. Walker D.J. Multivariable control of the longitudinal and lateral dynamics of a fly-by-wire helicopter // Control Eng Pract. 2003. №11. pp781–795
14. Vilchis J.C.A., Brogliato B., Dzul A., Lozano R. Nonlinear modelling and control of helicopters // Automatica. 2003. №39. pp1583–1596
15. Sira-Ramirez H., Zribi M., Ahmad S. Dynamical sliding mode control approach for vertical flight regulation in helicopters // IEE Proc Control Theory Appl. 1994. №141. pp 19–24
16. Kadmiry B., Driankov D. fuzzy flight controller combining linguistic and modelbased fuzzy control // Fuzzy Sets Syst. 2004. №146. pp313–347
17. Edwar Yazid, Matthew Garratt, Fendy Santoso Position control of a quadcopter drone using evolutionary algorithms-based self-tuning for first-order Takagi–Sugeno–Kang fuzzy logic autopilots // Applied Soft Computing. Volume 78. 2019. P. 373-392. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.02.023>.

18. Kirshna Kumar, Sushil Kumar, Omprakash Kaiwartya, Pankaj Kumar Kashyap, Jaime Lloret, Houbing Song Drone assisted Flying Ad-Hoc Networks: Mobility and Service oriented modeling using Neuro-fuzzy // Ad Hoc Networks. Volume 106. 2020. 102242. URL: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102242>.
19. Zemalache K.M., Maaref H. Controlling a drone: Comparison between a based model method and a fuzzy inference system // Applied Soft Computing. Volume 9. Issue 2. 2009. P. 553-562. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2008.08.007>.
20. Bayrakdar M. E., Enhancing sensor network sustainability with fuzzy logic based node placement approach for agricultural monitoring // Computers and Electronics in Agriculture. Volume 174. 2020. 105461. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105461>.
21. Kim N., Calise A.J., Corban J.E., Prasad J.V.R. Adaptive output feedback for altitude control of an unmanned helicopter using rotor RPM // Proceedings of AIAA guidance, navigation and control conference. August 2004. P. 3635–3640
22. Wentao Liu, Tong Zhao An active disturbance rejection control for hysteresis compensation based on Neural Networks adaptive control // ISA Transactions, 2020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.10.019>.
23. Lin Cheng, Zhenbo Wang, Fanghua Jiang, Junfeng Li Adaptive neural network control of nonlinear systems with unknown dynamics // Advances in Space Research. 2020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.052>.
24. Jiazhe Lin, Rui Xu, Liangchen Li Spatio-temporal synchronization of reaction–diffusion BAM neural networks via impulsive pinning control // Neurocomputing. Volume 418. 2020. P. 300-313. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.08.039>.
25. Shu Yang, Wayne Bequette B. Optimization-based control using input convex neural networks // Computers & Chemical Engineering. Volume 144. 2021. 107143. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107143>.