



Проектирование системы сбора полётной информации для расчёта аэродинамических характеристик БПЛА

©2023, Хамза Мазин Абдулаали Хамза

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ,
Казань, Россия

Технологический университет, Багдад, Ирак

Аннотация

В статье описана разработка бортовой системы сбора информации для расчёта аэродинамических характеристик беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые возможно получить только в условиях свободного полёта. Представлена функциональная схема, описан алгоритм работы системы регистрации параметров полёта. Предложенные решения позволяют собрать большой объём информации и повысить эффективность системы за счёт отбора и сжатия информации. Собранные данные используются для определения аэродинамических характеристик, обеспечивая отказ от испытаний моделей БПЛА в аэродинамических трубах, за счёт чего может быть достигнута экономия средств и времени на разработку новых БПЛА. Рассмотрены особенности информационного обмена между элементами системы, позволяющие ускорить передачу данных и повысить точность измерений за счёт увеличения частоты опроса измерительных устройств. Полученные результаты могут представлять интерес для разработчиков автономных измерительных систем. Особое значение для расчёта аэродинамических характеристик БПЛА по предлагаемому методу имеет высокая точность измерения параметров траектории летательного аппарата, включая возникающие в процессе движения линейные ускорения и угловые скорости. В статье рассматривается вариант аппаратной реализации предложенной системы для БПЛА.

Ключевые слова: аэродинамические характеристики, параметры полёта, программно-аппаратный комплекс, сбор информации, передача данных, БПЛА.

Цитирование: Хамза Мазин Абдулаали Хамза. Проектирование системы сбора полётной информации для расчёта аэродинамических характеристик БПЛА // Онтология проектирования. 2023. Т.13, №1(47). С.90-98. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-1-90-98.

Благодарности: автор выражает признательность членам редколлегии журнала «Онтология проектирования» за замечания и рекомендации по усовершенствованию данной статьи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Достижения в аэродинамике, навигационных системах, электронике, робототехнике, компьютерных технологиях и др. позволили выйти на новый уровень в разработке беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1]. В числе приоритетных направлений применения БПЛА: военные, спасательные, правоохранительные и природоохранительные операции [2-4], академические исследования [5-8].

При разработке крупногабаритных БПЛА (взлётная масса более 100 кг) исследования в аэродинамических трубах можно производить на небольших масштабных моделях, а полученные на них результаты можно экстраполировать на полноразмерный аппарат с помощью теории подобия.

Целью исследования является разработка системы сбора полётной информации высокой точности для получения аэродинамических характеристик летательного аппарата (ЛА) в

условиях свободного полёта. Большинство аэродинамических характеристик при разработке БПЛА определяется путём продувок в аэродинамической трубе. Некоторые аэродинамические характеристики могут быть определены только в полёте. Разрабатываемая система предназначена для определения аэродинамических характеристик БПЛА в полёте.

По совокупности регистрируемых системой данных путём вычислений можно получить направление осей ЛА и направление вектора скорости. Например, есть возможность получить угол наклона траектории θ - угол между направлением земной скорости $\vec{V}_k$ и горизонтальной плоскостью OX_gZ_g нормальной системы координат. Это позволит в дальнейшем рассчитать зависимости аэродинамических коэффициентов ($c_x, c_y, c_z, m_x, m_y, m_z$) от углов атаки и скольжения, а также от скорости полёта и от скоростей вращения вокруг осей.

Система сбора информации должна регистрировать проекции вектора истинной скорости по осям траекторной системы координат. В большинстве случаев бортовой самописец БПЛА регистрирует данные об угловых скоростях в системе координат ЛА, но не имеет возможности регистрировать истинную скорость.

Для получения данных о положении ЛА в траекторной системе координат используется приёмник аппаратуры *RTK* (*Real Time Kinematic* – «кинематика реального времени») [10] работающий с навигационными спутниковыми системами (*GPS*, США; *ГЛОНАСС*, Россия; *Бэйдоу*, Китай) по протоколу Национальной ассоциации морской электроники (*National Marine Electronics Association - NMEA*), формирующий пакет с информацией о положении БПЛА и векторе его скорости.

1 Структура системы сбора полётной информации

Система сбора информации для расчёта аэродинамических характеристик имеет следующую структуру (см. рисунок 1) и включает:

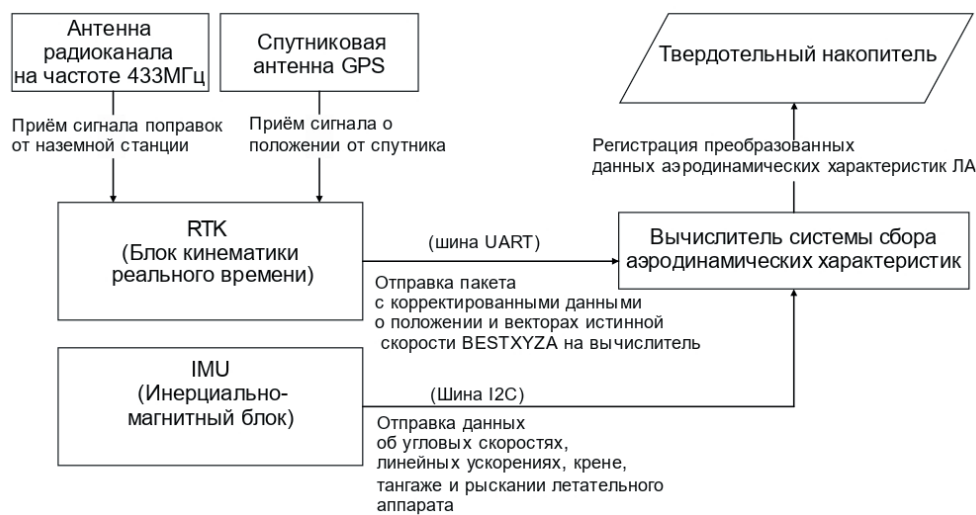


Рисунок 1 – Структура системы сбора информации для расчёта аэродинамических характеристик БПЛА

- инерциально-магнитный (измерительный) блок (*Inertial Measurement Unit - IMU*) для определения ориентации ЛА в земной системе координат;
- приёмник сигнала *RTK* для определения положения ЛА в земной системе координат, в том числе для получения проекций векторов истинной скорости;
- вычислительный блок для реализации алгоритма регистрации получаемых данных от блоков *IMU* и *RTK* и для преобразования этих данных в формат, удобный для последующей обработки записи на накопитель.

В БПЛА в качестве бортовой электроники часто используются микроконтроллеры и межмашинные интерфейсы встраиваемых систем, такие как универсальный асинхронный приёмопередатчик (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter - UART*) или последовательный асимметричный интерфейс для соединения низкоскоростных периферийных компонентов с микроконтроллерами (*Inter-Integrated Circuit - I2C*). *IMU* блок представляет собой микроэлектромеханический датчик (*Microelectromechanical systems - MEMS*), с встроенными трёхосевым акселерометром, магнитометром, барометром и вычислителем, способным возвращать данные в цифровом виде [11-13]. *IMU* передаёт следующий набор данных:

- ускорения ЛА по соответствующим трём осям системы координат БПЛА (в испытуемой модели оси направлены согласно обозначениям на датчике);
- угловые скорости ЛА относительно трёх осей системы координат БПЛА;
- три угловых параметра положения ЛА: тангаж ϑ , крен γ , рыскание ψ .

Для записи данных в память устройства используется программная структура из девяти указанных параметров согласно документации на микросхему, используемую в нём. В случае выполнения задачи расчёта аэродинамических характеристик из блока *RTK* считывается пакет *BESTXYZA* (*Best available cartesian position and velocity* - наилучшее доступное декартово положение и скорость) [14].

- Пакет *BESTXYZA* содержит полный набор данных, содержащих позицию (в метрах), скорость (в м/с) и время (в секундах) регистрации (*position, velocity, time - PVT*): статус пакета решения по точке; тип позиционирования: координата позиции X - $P-X$; координата позиции Y - $P-Y$; координата позиции Z - $P-Z$; стандартное отклонение от точки $P-X$ - $P-X\sigma$; стандартное отклонение от точки $P-Y$ - $P-Y\sigma$; стандартное отклонение от точки $P-Z$ - $P-Z\sigma$.
- Пакет *BESTXYZA* содержит информацию об истинных скоростях по осям OX , OY и OZ земной системы координат, а также статус считываемого сообщения для коррекции и соответствующие среднеквадратические отклонения от наземной станции: статус пакета решения по скорости; тип скорости; вектор скорости по оси $O-X$ - $V-X$; вектор скорости по оси $O-Y$ - $V-Y$; вектор скорости по оси $O-Z$ - $V-Z$; стандартное отклонение $V-X$ - $V-X\sigma$; стандартное отклонение $V-Y$ - $V-Y\sigma$; стандартное отклонение $V-Z$ - $V-Z\sigma$; измерение задержки получаемого значения скорости по временной метке, его следует вычесть из текущего времени, чтобы получить улучшенные результаты; разность времени полученного пакета; время решения.
- Пакет *BESTXYZA* отправляется от корректирующей станции бортовой системе и содержит: идентификатор соответствующей станции; общее количество отслеживаемых спутников; количество спутников, используемых в решении; количество спутников первого уровня, используемых при генерации в решении; количество спутников первого и второго уровней, используемых при генерации в решении [15].

Изначально пакет представляет собой сборку данных для определения лучших значений по скоростям (в текущем случае - скорость БПЛА). При формировании пакета для записи на накопитель из получаемого пакета берутся значения $P-X$, $P-Y$, $P-Z$, а так же значения среднеквадратических отклонений $P-X\sigma$, $P-Y\sigma$ и $P-Z\sigma$ для получения информации об угловых скоростях БПЛА на момент регистрации состояния объекта.

2 Алгоритм сбора и регистрации полётной информации БПЛА

Алгоритм сбора и регистрации полётной информации о пространственном положении и движении БПЛА для расчёта его аэродинамических характеристик реализован в виде программы на языке *C* для микроконтроллера, являющегося вычислителем системы сбора полётной информации (см. рисунок 2). Программа разделяется на две части. В первой части создаются три структуры с полями, соответствующими принимаемым данным от *IMU* и *RTK* блоков и полям выходного пакета для формирования записи переработанных данных на внешний накопитель. Эти структуры являются буферами для чтения и записи данных. Вторая часть программы представляет из себя бесконечный цикл, в каждом проходе по циклу производится опрос шин, на которых находятся *IMU* и *RTK* блоки. Так как время регистра-

ции данных от блоков не детерминировано, то принятые данные записываются в буферы, объявленные в первой части программы.

В структуре буферов во избежание наложения записей прописаны дополнительные поля для временной метки. Когда оба буфера принимаемой информации заполнены, программа переходит к считыванию необходимых полей для записи на внешний накопитель и формирует запись буфера выходного пакета. После формирования выходного пакета буферы, принимающие информацию, очищаются для следующей записи, а функция записи считывает данные из буфера отправки и записывает данные на внешний накопитель.

В бесконечном цикле последовательно считываются данные из шин *I2C* и *UART* (см. рисунок 1) с помощью функций *cbfuncrtk* и *cbfuncimu* (см. рисунок 2). Результатом является запись в буферные структуры. Если обе структуры были успешно записаны, то данные передаются функции *rec_proc* для преобразования в выходной формат, после чего производится запись на внешний носитель.

В результате получена схема, состоящая из двух структур, описывающих блок данных, полученных от инерциальной системы, и блок данных, полученный от *RTK* на борту ЛА. Из полученных структур формируется пакет для регистрации, выгрузки и последующего изучения полученных параметров. Пакет формируется в текстовом формате. Универсальная текстовая форма позволяет конвертировать полученные данные в форматы, удобные для машинной обработки или чтения их в текстовом редакторе (см. рисунок 3). На способ определения аэродинамических характеристик летательного аппарата по результатам лётного эксперимента получен патент на изобретение (см. рисунок 4).

Аппаратный блок (см. рисунок 5) выполнен в виде микроконтроллера, который выполняет функцию вычислителя разрабатываемой системы, и группы дополнительного периферийного оборудования для сопряжения с блоками *RTK* и *IMU*.

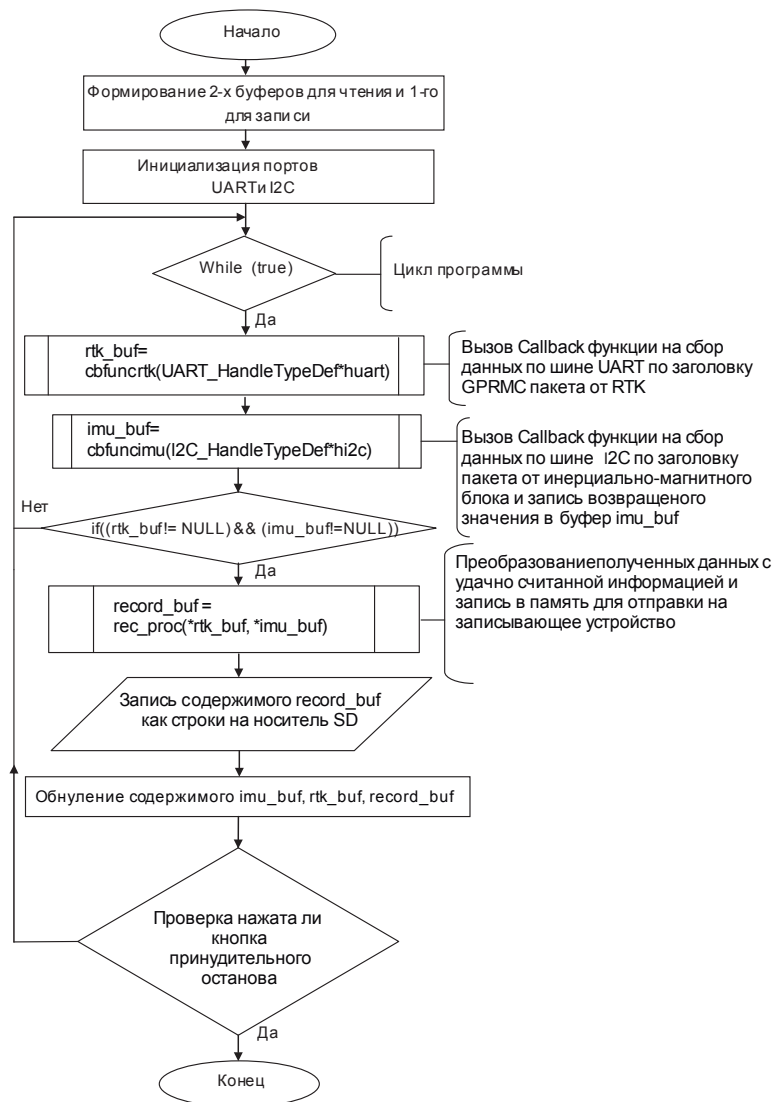


Рисунок 2 – Алгоритм сбора и регистрации полётной информации для расчёта аэродинамических характеристик БПЛА

Аппаратный блок устанавливается на платформу в корпус испытательного БПЛА (см. рисунок 6), где он сопрягается с информационной сетью (*UART*) устройства автоматического пилотирования.

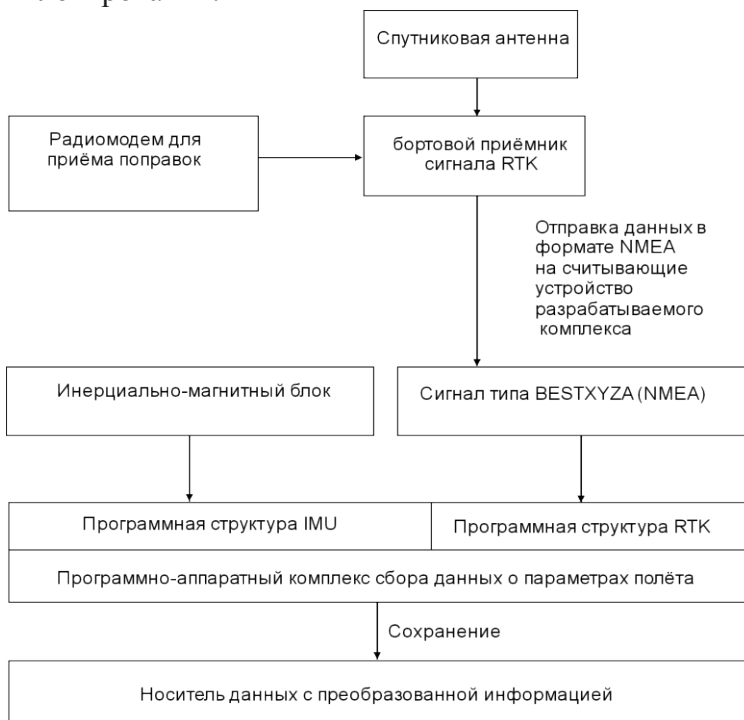


Рисунок 3 – Структурная схема получения и сохранения полётных данных



Рисунок 4 – Патент на изобретение № 2790358 от 17.02.2023

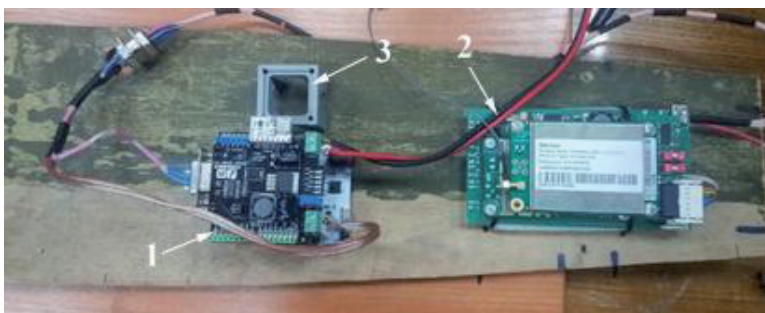


Рисунок 5 – Общий вид аппаратного блока: контроллер (1), блоки *RTK* (2) и *IMU* (3)



Рисунок 6 – Аппаратный блок, установленный в корпус перед монтажом основной системы управления БПЛА

3 Использование накопленной информации для определения характеристик БПЛА

По накопленным данным можно определить параметры движения БПЛА, необходимые для вычисления аэродинамических характеристик:

$$\Psi = \arctg \frac{V_N}{V_E}, \quad \Theta = \arctg \frac{V_H}{\sqrt{V_N^2 + V_E^2}}, \quad (1)$$

где θ – угол наклона траектории, Ψ – угол направления горизонтального движения, V_N – проекция истинной скорости на северное направление, V_E – проекция истинной скорости на восточное направление, V_H – вертикальная проекция истинной скорости.

Чтобы определить аэродинамические характеристики, необходимо построить модель пространственного движения БПЛА, которая имеет вид [16]:

$$m\ddot{X} = mg + M_\gamma^{-1}M_\vartheta^{-1}M_\psi^{-1}P + M_\gamma^{-1}M_\Theta^{-1}M_\Psi^{-1}R_A, \quad (2)$$

где $\ddot{X}$ – вектор вторых производных от перемещений в неподвижной системе координат, g – вектор ускорения силы тяжести, P – вектор силы тяги двигателя и других сил, связанных с планером БПЛА, R_A – вектор аэродинамических сил, m – масса БПЛА, M^{-1} – обратные матрицы поворота, необходимые для определения проекций сил, заданных в системе координат БПЛА или скоростной системе координат, на земную систему координат для углов поворота: γ – угол крена, ϑ – угол тангажа, ψ – угол курса БПЛА, Θ – угол наклона траектории, Ψ – угол направления горизонтального движения.

Зная уравнение движения, можно построить систему линейных уравнений [16]:

$$F = A^{-1}B, \quad (3)$$

где A – матрица коэффициентов, B – вектор правых частей, содержащий результаты измерений. Матрицы A и B имеют следующий вид:

$$A = M_\gamma M_\vartheta M_\psi M_\gamma^{-1} M_\Theta^{-1} M_\Psi^{-1},$$

$$B = m\ddot{X}_{\text{ст}} - M_\gamma M_\vartheta M_\psi mg - M_\gamma M_\vartheta M_\psi M_\gamma^{-1} M_\Theta^{-1} M_\Psi^{-1} P. \quad (4)$$

Прямые и обратные матрицы поворотов не являются перестановочными, поэтому заменить присутствующие в произведениях пары прямых и обратных матриц поворота вокруг одной и той же оси на единичную матрицу не получится. В системе уравнений не присутствуют в явном виде углы атаки и скольжения, что с одной стороны требует дополнительно их вычисления при обработке данных, с другой стороны облегчает использование в процессе лётного эксперимента высокоточных навигационных систем *РТК*. В процессе штатной работы определяются только проекции истинной скорости на земную систему координат, что позволяет легко определять углы наклона траектории и горизонтального направления движения, а не углы атаки и скольжения [16].

После определения аэродинамических сил можно вычислить их коэффициенты.

Пример результата вычислительного эксперимента показан на рисунке 7. Этап первый –

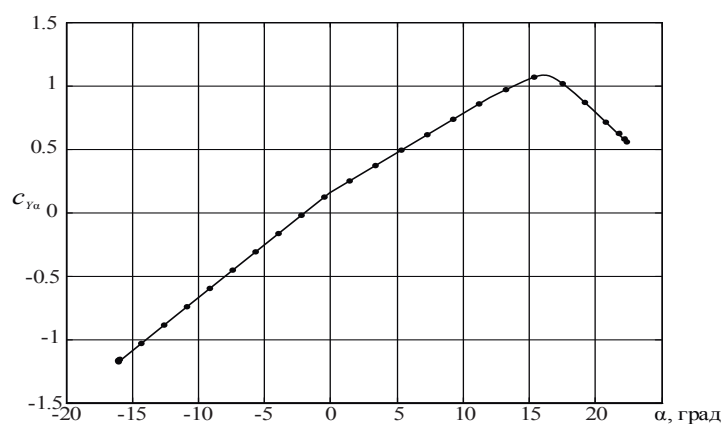


Рисунок 7 – Пример определения аэродинамического коэффициента подъемной силы по результатам эксперимента

имитация движения с помощью динамической модели движения ЛА с заданными аэродинамическими коэффициентами (линия на рисунке 7). Этап второй – решение обратной задачи согласно предложенному алгоритму для получения аэродинамических коэффициентов ЛА (точки на рисунке 7), движение которого моделировалось на первом этапе. Высокая точность совпадения в данном случае объясняется тем, что исследовались результаты численного эксперимента, в котором все случайные факторы были заранее известны. Для проведения

реального, лётного эксперимента необходима специальная измерительная система, проектированию которой и посвящена данная статья.

Заключение

Разработана программа, решающая две задачи - измерения и регистрации параметров полёта БПЛА. Задача записи на внешний носитель решается сразу после считывания, пошаговое преобразование внутри задач не вызывает задержек во время выполнения.

Разработанная система и программное обеспечение позволяют собирать информацию, необходимую для определения аэродинамических характеристик БПЛА с помощью метода, предложенного в статье [16].

Список источников

- [1] **Просвирина Н.В.** Анализ и перспективы развития беспилотных летательных аппаратов // Московский экономический журнал. 2021. №10. С.560-575. DOI: 10.24412/2413-046X-2021-10619.
- [2] **Маммадов А.З.** Модель инерциальной навигации для беспилотных летательных аппаратов // Universum: технические науки : электрон.научн. журн. 2021. 5(86) С.5-9. DOI:10.32743/UniTech.2021.86.5.11683: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11683>.
- [3] **Кузнецов Г.А., Кудрявцев И.В., Крылов Е.Д.** Ретроспективный анализ, современное состояние и тенденции развития отечественных беспилотных летательных аппаратов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. № 9. С.1-22. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-9-1801.
- [4] **Guo Hongtao, Yu Yan, Hongya Xia, Li Yu, Binbin Lv.** The Prediction and Correction Method of Aircraft Static Aeroelastic Effects: A Review of Recent Progress. *Actuators* 2022, no. 11: 309. P.1-20 DOI:10.3390/act11110309.
- [5] **Mazin Abdulaali Hamzah, Mikhaylov S., Makhanko A.** Algorithm for Determining Aerodynamic Characteristics based on the Results of a Flight Experiment. *Design Engineering*, 2022, 14547-14559. <http://thedesigengineering.com/index.php/DE/article/view/8638>.
- [6] **Солдаткин В.В., Солдаткин В.М.** Построение модели и обработка сигналов многофункционального приемника в аэротрических системах самолета // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. т. 64, № 7. С. 551–558 DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-551-558.
- [7] **Рендал У. Биард, Тимоти У.Маклэйн.** Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика: ТЕХНОСФЕРА, 2015. 312 с. ISBN 978-5-94836-393-6.
- [8] **Lukyanov O.E., Barcenas O.U.E., Zolotov D.V.** Experimental Model of an Electric Power Plant for Small UAV's Automatic Control Systems. *2021 International Scientific and Technical Engine Conference (EC)*, Samara, Russian Federation, 2021. P.1-4, DOI: 10.1109/EC52789.2021.10016802.
- [9] **Лукьянов О.Е., Золотов Д.В.** Методологическое обеспечение подготовки проектантов и операторов беспилотных летательных аппаратов // Вестник Самарского университета. Т.20, №1, 2021, С.14-28, DOI:10.18287/2541-7533-2021-20-1-14-28.
- [10] **Mohsan S.A.H., Khan M.A., Noor F., Ullah, I., Alsharif M.H.** Towards the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Comprehensive Review. *Drones* 2022, 6, 147. (1-27). DOI:10.3390/drones6060147.
- [11] **Pflüger J, Von Langsdorff M., Breitsamter C.** Efficacy of an elasto-flexible morphing wing at high lift using fluid-structure-interaction simulations. *Front. Aerosp. Eng.* 2022 1:975600. (1-14). DOI:10.3389/fpace.2022.9756004.
- [12] **Stöcker C., Bennett R., Nex F., Gerke M., Zevenbergen J.** Review of the current state of UAV regulations. In: *RemoteSensing* 9.5. 2017. P.33–35. DOI:10.3390/rs9050459.
- [13] **Михайловский К.В., Барановски С.В.** Учёт обледенения поверхности крыла из полимерных композиционных материалов при проектных расчётах. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 3. С.61–70, DOI:10.18698/0536-1044-2019-3-61-70.
- [14] LIS331DLH. MEMS digital output motion sensor ultra low-power high performance 3-axes “nano” accelerometer. July 2009 Doc ID 15094 Rev 3. 38 p. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lis331dlh.pdf>.
- [15] BESTXYZ. Best available cartesian position and velocity <https://docs.novatel.com/OEM7/Content/Logs/BESTXYZ.htm>.
- [16] **Михайлов С.А., Маханько А.А., Хамза М.А.Х.** Алгоритм определения аэродинамических характеристик по результатам лётного эксперимента // Изв. вузов. Авиационная техника. 2022. № 1. С.123–130.

Сведения об авторе

Хамза Мазин Абдулаали Хамза, 1981 г.рождения. Окончил Технологический университет Багдада (UOT), Ирак (2004), магистратуру Тамбовского государственного технического университета (2014), аспирант 4-го курса кафедры аэрогидродинамики Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева - КАИ. ORCID:0000-0003-2782-7000, ResearcherID (WoS): HKO-3541-2023, (SPIN-код): 8990-0688, AuthorID (РИНЦ) 1178112. mazinhamza641@gmail.com.



Поступила в редакцию 09.12.2022, после рецензирования 20.02.2023. Принята к публикации 28.02.2023.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-1-90-98

Designing a flight information collection system for calculating the aerodynamic characteristics of a UAV

© 2023, Hamzah Mazin Abdulaali Hamzah

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia
University of Technology (UOT), Baghdad, Iraq

Abstract

The article describes the development of an onboard information collection system for calculating the aerodynamic characteristics of unmanned aerial vehicles (UAVs), which can only be obtained under free flight conditions. A functional diagram is presented, a flight parameters registration system operation algorithm is described. The proposed solutions make it possible to collect a large amount of information and improve system efficiency through the selection and compression of information. The collected information is used to determine the aerodynamic characteristics, eliminating the need to test UAVs models in wind tunnels, which can save money and time on the development of new UAVs. The features of the information exchange between the system elements are considered, which make it possible to speed up the data transfer, and therefore improve the accuracy of measurements by increasing the frequency of polling measuring devices. The results obtained may be of interest to developers of autonomous measuring systems. Of particular importance for calculating the aerodynamic characteristics of an UAV using the proposed method is the high accuracy of measuring the parameters of the aircraft trajectory, including the linear accelerations and angular velocities that occur in the course of motion. In addition, the article considers a variant of the hardware implementation of the proposed system for UAVs.

Key words: aerodynamic characteristics, flight parameters, software and hardware complex, collection of information, data transfer, UAV.

For citation: Hamzah Mazin Abdulaali Hamzah. Designing a flight information collection system for calculating the aerodynamic characteristics of a UAV [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(1): 90-98. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-1-90-98.

Acknowledgment: The author is grateful to the members of the editorial board of the journal «*Ontology of designing*» for their comments and recommendations for improving this article.

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

List of figures

Figure 1 - The structure of the information collection system for determining flight parameters

Figure 2 - Algorithm for collecting and registering flight information to determine flight parameters

Figure 3 - Block diagram of receiving and saving flight data

Figure 4 - Invention Patent No. 2790358 of 02/17/2023

Figure 5 - General view of the hardware unit: controller (1), RTK (2) and IMU (3) units

Figure 6 - The hardware unit installed in the aircraft body before mounting the main UAV control system

Figure 7 - An example of determining the aerodynamic lift coefficient based on the results of the experiment

References

- [1] **Prosvirina HV.** Analysis and prospects for the development of unmanned aerial vehicles [In Russian]. *Moscow Economic Journal*. 2021; 10: 560-575. DOI: 10.24412/2413-046X-2021-10619.
- [2] **Mammadov AZ.** Model of inertial navigation for unmanned aerial vehicles [In Russian]. *Universum: technical sciences: electron. scientific magazine* 2021; 5(86): 5-9. DOI:10.32743/UniTech.2021.86.5.11683.
- [3] **Kuznetsov GA, Kudryavtsev IV, Krylov ED.** Retrospective analysis, current state and development trends of domestic unmanned aerial vehicles [In Russian]. *Engineering Journal: Science and Innovations*. 2018; 9: 1-22. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-9-1801.
- [4] **Guo Hongtao, Yu Yan, Hongya Xia, Li Yu, Binbin Lv.** The Prediction and Correction Method of Aircraft Static Aeroelastic Effects: A Review of Recent Progress. *Actuators* 2022 11, no.11: 309. (1-20) DOI:10.3390/act11110309.
- [5] **Hamzah MA, Mikhaylov S, Makhanko A.** Algorithm for Determining Aerodynamic Characteristics based on the Results of a Flight Experiment. *Design Engineering*, 202214547-14559. <http://thedesigengineering.com/index.php/DE/article/view/8638>.
- [6] **Soldatkin VV, Soldatkin VM.** Building a model and signal processing of a multifunctional receiver in aircraft aerometric systems [In Russian]. *Izv. universities.instrumentation*. 2021; 64(7): 551–558. DOI:10.17586/0021-3454-2021-64-7-551-558.
- [7] **Rendal W. Beard and Timothy W. McLain.** Small unmanned aerial vehicles: theory and practice. TECHNO-SPHERE, 2014. 312 p. ISBN 978-5-94836-393-6.
- [8] **Lukyanov OE, Barcenas OUE, Zolotov DV.** Experimental Model of an Electric Power Plant for Small UAV's Automatic Control Systems, 2021 International Scientific and Technical Engine Conference (EC), Samara, Russian Federation, 2021, pp.1-4, DOI:10.1109/EC52789.2021.10016802.
- [9] **Lukyanov OE, Zolotov DV.** Methodological support for the training of designers and operators of unmanned aerial vehicles [In Russian]. *Bulletin of the Samara University*. 2021; 20(1): 14-28, DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-1-14-28.
- [10] **Mohsan SAH, Khan MA, Noor F, Ullah I, Alsharif MH.** Towards the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Comprehensive Review. *Drones* 2022; 6, 147(1-27). DOI:10.3390/drones6060147.
- [11] **Pflüger J, Von Langsdorff M, Breitsamter C.** Efficacy of an elasto-flexible morphing wing at high lift using fluid-structure-interaction simulations. *Front. Aerosp. Eng.* 2022. 1:975600. P.1-14. DOI:10.3389/fpace.2022.9756004.
- [12] **Stöcker C, Bennett R, NexF, Gerke M, Zevenbergen J.** Review of the current state of UAV regulations. In: *Remote Sensing* 9.5 (2017). P.33–35. DOI:10.3390/rs9050459.
- [13] **Mikhailovsky KV, Baranovsky SV.** Accounting for icing of the wing surface made of polymer composite materials in design calculations [In Russian]. *News of higher educational institutions. Engineering*. 2019; 3: 61–70. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-3-61-70.
- [14] LIS331DLH.MEMS digital output motion sensor ultra low-power high performance 3-axes “nano” accelerometer. July 2009 Doc ID 15094 Rev 3. 38 p. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lis331dlh.pdf>.
- [15] BESTXYZ. Best available cartesian position and velocity <https://docs.novatel.com/OEM7/Content/Logs/BESTXYZ.htm>.
- [16] **Mikhailov SA, Makhanko AA, Hamza MAH.** Algorithm for determining aerodynamic characteristics based on the results of a flight experiment [In Russian]. *Izv. universities. Aviation technology*. 2022; 1: 123–130.

About the author

Hamzah Mazin Abdulaali Hamzah (b.1981) Graduated from the University of Technology (UOT), Baghdad, Iraq (2004), received Master's degree in Tambov State Technical University (2014), 4th year postgraduate student at the Department of Aerohydrodynamics in Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI. ORCID:0000-0003-2782-7000, Researcher ID (WoS): HKO-3541-2023, (SPIN-код): 8990-0688, Author ID (RSCI) 1178112. mazinhamza641@gmail.com

Received December 9, 2022.Revised February 20, 2023.Accepted February 28, 2023.