#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и НПУА. Сер. ТН. 2021. Т. LXXIV, N4

## УДК 681.865.8

### АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

**DOI** 10.53297/0002306X-2021.v74.4-489

#### О.Н. ГАСПАРЯН, А.А. АСАТРЯН

## СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ С БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ОТСУТСТВИИ СИГНАЛОВ GPS

Многороторные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) широко используются в различных военных и гражданских областях. Полет БПЛА по заданным траекториям при этом осуществляется с использованием сигналов GPS, которые определяют координаты аппарата с точностью от десятков сантиметров до нескольких метров. Однако на практике возможны ситуации, когда сигналы GPS искажены или отсутствуют. В таких случаях важной задачей является определение как координат самого БПЛА, так и координат наземных объектов, за которыми осуществляется наблюдение с БПЛА.

В работе предлагается подход к определению геодезических координат БПЛА и наземных целей в случае, когда сигналы GPS отсутствуют, но известны координаты двух наземных, так называемых "опорных" объектов. В качестве опорных выбираются объекты, которые выделяются на фоне местности и могут быть легко идентифицированы, например, отдельные строения, опоры линий электропередач, радиорелейные мачты и т.д. Разработан графический интерфейс пользователя в среде пакета MATLAB, позволяющий автоматизировать процедуру расчета координат БПЛА и цели при отсутствии сигналов GPS.

*Ключевые слова*: беспилотный летательный аппарат, геодезические координаты, кардановый подвес, лазерный дальномер, сигналы GPS, графический интерфейс пользователя, ПИД-регулятор.

Введение. Многороторные беспилотные летательные аппараты в настоящее время широко используются в различных военных и гражданских областях, в частности, при проведении спасательных и сельскохозяйственных работ, определении очагов пожаров в лесах, контроле технического состояния зданий, дорог и железнодорожных путей и др. [1-3]. Полет БПЛА по заданным траекториям при этом осуществляется с использованием сигналов GPS (Global Positioning System) (или ГЛОНАСС), которые определяют координаты аппарата с достаточно высокой точностью (от десятков сантиметров до нескольких метров). Вместе с тем на практике возможны ситуации, когда в силу разных причин сигналы GPS искажены или отсутствуют. В таких случаях весьма важной задачей является определение как координат самого БПЛА, так и координат наземных объектов, за которыми осуществляется наблюдение. В настоящей работе предлагается подход к определению геодезических координат БПЛА и наземных объектов в случае, когда сигналы GPS отсутствуют, но известны координаты двух наземных, так называемых "опорных" объектов. На практике в качестве опорных выбираются объекты, которые выделяются на фоне местности и могут быть легко идентифицированы. Например, это могут быть отдельно расположенные строения, опоры линий электропередач, радиорелейные мачты и т.д.

Описание системы. Пусть {*I*} обозначает правостороннюю инерциальную систему координат (СК) с осями  $x_I, y_I, z_I$ , а {*B*} - жестко связанную с БПЛА СК с осями  $x_B, y_B, z_B$ , направленными вдоль главных осей инерции (рис. 1). Положение центра масс БПЛА в инерциальной СК {*I*} задается вектором  $\xi = (x, y, z)^T \in \{I\}$ , а ориентация СК {*B*} по отношению к {*I*} описывается в общем случае ортогональной матрицей вращения [1]:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta - \sin\phi\sin\psi\sin\theta & -\cos\phi\sin\psi & \cos\psi\sin\theta + \cos\theta\sin\phi\sin\psi \\ \cos\theta\sin\psi + \cos\psi\sin\phi\sin\theta & \cos\phi\cos\psi & \sin\psi\sin\theta - \cos\psi\cos\theta\sin\phi \\ -\cos\phi\sin\theta & \sin\phi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix}.$$
 (1)

Переход от {*I*} к {*B*} осуществляется последовательными вращениями на углы Эйлера, обозначенные, соответственно,  $\psi$  (рыскание),  $\phi$  (крен) и  $\theta$  (тангаж), которые можно объединить в псевдовектор  $\eta = [\phi, \theta, \psi]^T$ .



Рис. 1. Схематическое представление БПЛА

Стандартные нелинейные уравнения движения БПЛА имеют вид [1, 2]

$$m\frac{d^2\xi}{dt^2} = -mgz_I + RF, \qquad (2)$$

$$J\frac{d\omega}{dt} + \omega \times (J\omega + \Upsilon_R \Omega) = \tau, \qquad (3)$$

$$\frac{d\eta}{dt} = P(\eta)\omega, \qquad (4)$$

где *m* - масса БПЛА; *g* - гравитационная постоянная; *J* - постоянный тензор инерции БПЛА;  $\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T \in \{B\}$  - вектор угловой скорости СК  $\{B\}$  по отношению к инерциальной СК  $\{I\}$ ; *J<sub>R</sub>* - идентичные моменты инерции роторов;  $\Omega$  - суммарная угловая скорость вращения роторов.

Матрица  $P(\eta)$  в кинематических уравнениях Эйлера (strapdown equation) (4) имеет вид

$$P(\eta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ \sin\theta \, \mathrm{tg}\phi & 1 & -\cos\theta \, \mathrm{tg}\phi \\ -\sin\theta / \cos\phi & 0 & \cos\theta / \cos\phi \end{bmatrix}.$$
 (5)

На БПЛА имеются три комплекта видеокамер с лазерными дальномерами, которые установлены на корпусе аппарата в двухосных кардановых подвесах. Подобное сочетание видеокамер с лазерными дальномерами (в дальнейшем для краткости будем называть их просто камерами) в кардановых подвесах широко используется на практике [4-7]. На рис. 2 в качестве примера показаны два варианта таких систем, представленных на рынке.



Рис. 2. Камеры с лазерными дальномерами в кардановых повесах

Свяжем с каждой из камер ортогональную СК  $z_i x_i y_i$  (i = 1, 2, 3). Аналогично свяжем с каждым кардановым подвесом ортогональную СК  $z_i^G x_i^G y_i^G$  (i = 1, 2, 3), где оси  $z_i^G$  и  $y_i^G$  являются осями вращения (рис. 3).



Рис. 3. Оси координат, связанные с камерами

Первые две камеры предназначены для наведения на опорные объекты с известными координатами. В исходном положении СК  $z_i x_i y_i$  и  $z_i^G x_i^G y_i^G$ (i = 1, 2, 3) всех трех камер совпадают с жестко связанной с БПЛА СК  $x_B y_B z_B$ (рис. 4).



Рис. 4. Оси координат, связанные с БПЛА

Наведение камер на опорные объекты осуществляется последовательными вращениями на углы  $\psi_i, \theta_i$  вокруг осей кардановых подвесов  $z_i^G$  и  $y_i^G$  (i = 1, 2) первых двух камер. Когда оба опорных объекта оказываются в центральной области поля зрения соответствующих камер, оси подвесов фиксируются, и СК  $z_i x_i y_i$  (i = 1, 2) оказываются жестко фиксированными по отношению к корпусу БПЛА. Третья камера предназначена для непрерывного отслеживания цели, геодезические координаты которой необходимо определить. Отметим, что по отношению к вектору  $\varepsilon(t)$  "малых" углов поворота корпуса БПЛА оси  $x_i$  каждой камеры могут быть рассмотрены как "оптические оси", а оси  $z_i$  и  $y_i$  - как "оси чувствительности" или "измерительные оси". Первые две камеры дают нам четыре оси чувствительности. Для образования трехосной "измерительной" СК выберем ось  $y_1$  первой камеры и оси  $z_2$  и  $y_2$ второй камеры. Если  $\theta_1 = 0^\circ$ ,  $\psi_1 = -90^\circ$  и  $\theta_2 = \psi_2 = 0^\circ$ , то измерительная СК  $y_1y_2z_2$  является ортогональной и совпадает с жестко связанной с главными осями инерции БПЛА СК  $x_By_Bz_B$ . Нумеруя камеры индексами 1, 2, 3, получим следующие выражения для соответствующих матриц вращения  $R_i$  (i = 1, 2, 3), описывающих повороты ортогональных СК, жестко связанных с камерами, по отношению к базовой СК  $x_By_Bz_B$ :

$$R_{i} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{i} \cos\psi_{i} & -\sin\psi_{i} & \cos\psi_{i} \sin\theta_{i} \\ \cos\theta_{i} \sin\psi_{i} & \cos\psi_{i} & \sin\psi_{i} \sin\theta_{i} \\ -\sin\theta_{i} & 0 & \cos\theta_{i} \end{bmatrix}.$$
 (6)

Каждый столбец  $R_i$  в (6) определяет направляющие косинусы координатных осей  $z_i x_i y_i$ , жестко связанных с камерами, по отношению к СК  $x_B y_B z_B$ .

Считая, что углы поворотов корпуса БПЛА по отношению к инерциальной СК в режиме свободного парения (hovering mode) являются малыми, эти углы можно рассматривать как компоненты вектора ошибок  $\varepsilon(t)$ . Переходы от этого вектора к СК  $z_i x_i y_i$  даются выражениями

$$\varepsilon_i(t) = R_i^T \varepsilon(t) \quad (i = 1, 2, 3), \tag{7}$$

где

$$R_i^T = \begin{bmatrix} \cos\theta_i \cos\psi_i & \cos\theta_i \sin\psi_i & -\sin\theta_i \\ -\sin\psi_i & \cos\psi_i & 0 \\ \cos\psi_i \sin\theta_i & \sin\psi_i \sin\theta_i & \cos\theta_i \end{bmatrix}.$$
 (8)

Комбинируя вторую и третью строки матрицы  $R_2^T$  со второй строкой матрицы  $R_1^T$ , взятой как первая строка результирующей матрицы, получим следующую матрицу  $R_s$ :

$$R_{s} = \begin{bmatrix} -\sin\psi_{1} & \cos\psi_{1} & 0\\ -\sin\psi_{2} & \cos\psi_{2} & 0\\ \sin\theta_{2}\cos\psi_{2} & \sin\theta_{2}\sin\psi_{2} & \cos\theta_{2} \end{bmatrix},$$
(9)

строки которой являются направляющими косинусами осей измерительной СК  $y_1y_2z_2$  по отношению к СК  $x_By_Bz_B$ . Физически эта матрица связывает выходные сигналы камер с вектором ошибок  $\varepsilon(t)$ . Следует подчеркнуть, что матрица  $R_s$  (9) не является ортогональной, а её детерминант равен

$$DR_s = \det(R_s) = \cos\theta_2 \sin(\psi_2 - \psi_1). \tag{10}$$

Матрицу  $R_s$  (9) можно представить в следующей факторизованной форме:

$$R_{S} = R_{N} R_{2}^{T} , \qquad (11)$$

т.е. как произведение ортогональной матрицы  $R_1^T$  и матрицы  $R_N$ , которая характеризует *степень неортогональности* измерительной СК  $y_2y_1z_1$ . Непосредственный подсчет показывает, что матрица  $R_N$  в (11) равна

$$R_{N} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{2}\sin(\psi_{2} - \psi_{1}) & \cos(\psi_{2} - \psi_{1}) & \sin\theta_{2}\sin(\psi_{2} - \psi_{1}) \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

а её детерминант совпадает с детерминантом (10) матрицы  $R_{\rm S}$  (9).

Целесообразность представления матрицы  $R_s$  (9) в факторизованной форме (11) состоит в том, что это позволяет упростить процедуру определения геодезических координат наземной цели, основываясь на известных координатах опорных объектов. Кроме того, представление  $R_s$  в форме (11) дает возможность судить о точности стабилизации БПЛА.

Поскольку матрица  $R_2^T$  в (11) является ортогональной, то нетрудно показать, что положительно-определенная симметричная матрица  $R_S R_S^T$  равна матрице  $R_N R_N^T$ . Это означает, что спектральная норма матрицы  $R_S$  (9) равна спектральной норме матрицы  $R_N$  (12):

$$||R_{S}|| = ||R_{N}|| = \frac{\sqrt{2}}{2}\sqrt{2 + \sqrt{3 + \cos(2\theta_{2})\cos 2(\psi_{1} - \psi_{2}) + \cos 2(\psi_{1} - \psi_{2}) - \cos 2\theta_{2}}} . (13)$$

При  $\psi_1 = \psi_2 - \pi$  выражение (13) упрощается и принимает вид

$$||R_{s}|| = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{2 + \sqrt{2(1 - \cos 2\theta_{2})}} .$$
(14)

Если к тому же  $\theta_2 = 0$ , то  $||R_s|| = 1$ .

Наведение третьей камеры на наземную цель с неизвестными координатами и последующее слежение за целью осуществляются при помощи специальной автоматической системы с двумя степенями свободы, которая сканирует территорию, обнаруживает и идентифицирует цель, а также осуществляет последующее слежение за ней. Матрица  $R_3^T$ , связывающая вектор ошибок  $\varepsilon(t)$  с угловыми отклонениями третьей камеры по отношению к СК  $x_B y_B z_B$ , имеет вид

$$R_3^T(t) = \begin{bmatrix} \cos\theta_3(t)\cos\psi_3(t) & \cos\theta_3(t)\sin\psi_3(t) & -\sin\theta_3(t) \\ -\sin\psi_3(t) & \cos\psi_3(t) & 0 \\ \cos\psi_3(t)\sin\theta_3(t) & \sin\psi_3(t)\sin\theta_3(t) & \cos\theta_3(t) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где подчеркивается, что углы  $\theta_3(t)$  и  $\psi_3(t)$  являются функциями времени, в отличие от углов  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  и  $\theta_1$  в  $R_s$  (9), которые являются постоянными.

Отметим, что первые строки матриц  $R_1^T$ ,  $R_2^T$  в (8) и  $R_3^T$  в (15) являются направляющими косинусами оптических осей соответствующих камер, которые совпадают по направлению с линией визирования лазерных дальномеров.

Выражения (6)-(15) используются в разработанном алгоритме определения координат БПЛА и наземных объектов по известным координатам опорных объектов в случае отсутствия сигналов GPS.

Определение координат БПЛА и наземных объектов. На основе описанного многороторного БПЛА с комплектом трех видеокамер с лазерными дальномерами разработан алгоритм определения неизвестных геодезических координат наземного объекта (цели) при имеющейся информации о координатах двух опорных объектов на поверхности Земли, а также о высоте БПЛА над уровнем моря. При этом определение координат цели при отсутствии сигналов GPS состоит из двух этапов. На первом этапе определяются неизвестные координаты самого БПЛА. На втором этапе, исходя из информации о координатах опорных объектах и БПЛА, находятся геодезические координаты цели, на которую наведена третья камера. Отметим, что под координатами здесь и далее понимаются геодезические координаты (широта и долгота) на поверхности Земли, при определении которых Земля принимается не за эллипсоид вращения, а за шар, а также высота на уровнем моря, отсчитываемая от уровня "сглаженной" поверхности (так называемого геоида) [8].

Схематически предложенный алгоритм вычисления координат наземной цели по известным координатам опорных объектов при отсутствии сигналов GPS можно описать следующим образом. Исходными данными алгоритма являются координаты  $x_1$ ,  $y_1$ ,  $h_1$  и  $x_2$ ,  $y_2$ ,  $h_2$  первого и второго опорных объектов, которые находятся в базе данных бортового компьютера, измеренные расстояния  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  от БПЛА до опорных объектов и цели, т.е. сигналы с лазерных дальномеров, а также высота  $h_{UAV}$  БПЛА над уровнем моря или над поверхностью Земли. Величина  $h_{UAV}$  определяется соответствующими датчиками, например, датчиком давления, ультразвуковым сонаром или их комбинацией и т.д., входящими в стандартный набор измерительных устройств любого БПЛА. По этим данным определяются геодезические координаты самого БПЛА, что дает возможность вычислить текущие координаты цели, на которую наведена третья камера.

Описанный алгоритм реализован на языке программирования МАТLAB. Разработан соответствующий графический интерфейс пользователя (ГИП) UAV\_GUI. Помимо автоматизации расчета координат БПЛА и наземного объекта, ГИП позволяет произвести выбор параметров пропорционально-интегрально-дифференцирующих (ПИД) регуляторов систем наведения камер на опорные объекты и наземную цель. Кроме того, ГИП обеспечивает возможность выбора параметров ПИД-регуляторов квадрокоптера с произвольной схемой установки моторов (пропеллеров), а также осуществления исследования динамики полета квадрокоптера при выбранных параметрах регуляторов.



Рис.5. Результаты расчета координат цели (трехмерный вид) 496

В качестве иллюстрации на рис. 5 и 6 показаны результаты расчетов при помощи ГИП UAV\_GUI координат наземной цели по указанным выше исходным данным.



Рис.6. Результаты расчета координат цели (вид сверху)

Заключение. В статье описана система определения геодезических координат (широты и долготы) наземных объектов с БПЛА при отсутствии сигналов GPS. Предлагаемый подход основан на использовании трех оптических камер и лазерных дальномеров, установленных на корпусе БПЛА в двухосных кардановых подвесах, где первые две камеры наводятся на наземные опорные объекты с известными координатами, а третья камера отслеживает цель, координаты которой необходимо определить. Предложенный алгоритм определения координат цели реализован на языке программирования MATLAB. Разработан соответствующий графический интерфейс пользователя, который позволяет автоматически вычислять координаты цели по заданным исходным данным, а также осуществлять выбор параметров ПИД регуляторов систем наведения камер на требуемые объекты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Mahony R., Kumar V., and Corke P. Multirotor aerial vehicles: Modeling, estimation, and control of quadrotor//Robotics and Automation Magazine.-2012.-19(3).- P. 20–32.
- Bresciani T. Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter.-Department of Automatic Control.-Lund University, 2008.- 184 p.
- Gasparyan O.N. On Application of Feedback Linearization in Control Systems of Multicopters, Advanced Technologies in Robotics and Intelligent Systems// Proceedings of ITR 2019.- Springer, Switzerland, 2020.-P. 343-351.

- Dobrokhodov V.N., Kaminer I.I., Jones K.D., and Ghabcheloo R. Vision-based tracking and motion estimation for moving targets using small UAVs//Proceedings of the 2006 American Control Conference.-Minneapolis, MN, USA, June 2006.-P. 907-917.
- Kim Z.W. and Sengupta R. Target detection and position likelihood using an aerial image sensor//Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation.- Pasadena, CA, USA, May 2008.- P. 59-64.
- Abdessameud A., Janabi-Sharifi F. Image-based tracking control of VTOL unmanned aerial vehicles//Automatica.-2015.-53-P. 111–119.
- Shirzadeh M., Amirkhani A., Jalali A., Mosavi M.R. An indirect adaptive neural control of a visual-based quadrotor robot for pursuing a moving target//ISA Trans.-2015.-59.-P. 290–302.
- 8. Поклад Г.Г. Практикум по геодезии: Учебное пособие для вузов.- М.: Акад. Проект, 2011. 470 с.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 31.08.2021.

### Օ.Ն. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ, Ա.Ա. ԱՍԱՏՐՅԱՆ

# ԱՆՕԴԱՉՈՒ ԹՌՉՈՂ ՍԱՐՔԵՐԻՑ ՎԵՐԳԵՏՆՅԱ ՕԲՅԵԿՏՆԵՐԻ ԿՈՈՐԴԻՆԱՏՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳ GPS ԱՉԴԱՆՇԱՆՆԵՐԻ ԲԱՑԱԿԱՅՈՒԹՅԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

Բազմառոտորային անօդաչու թռչող սարքերը (ԱԹՍ) ներկայումս լայնորեն կիրառվում են ռազմական և քաղաքացիական տարբեր ոլորտներում։ Առաջադրված հետագծերով ԱԹՍ -ի թռիչքն իրականացվում է GPS ազդանշանների միջոցով, որոնք որոշում են սարքի կոորդինատները տասնյակ սանտիմետրից մինչև մի քանի մետր ձշգրտությամբ։ Սակայն գործնականում կարող են լինել իրավիձակներ, երբ GPS ազդանշանները աղավաղված են կամ բացակայում են։ Նման դեպքերում կարևոր է ինչպես ԱԹՍ –երի կոորդինատների, այնպես էլ ԱԹՍ -ից վերահսկվող վերգետնյա օբյեկտների կոորդինատների որոշումը։

Աշխատանքում առաջարկվում է ԱԹՍ-երի և վերգետնյա թիրախների գեոդեզիական կոորդինատների որոշման մոտեցում, երբ GPS ազդանշանները բացակայում են, սակայն հայտնի են երկու վերգետնյա, այսպես կոչված, «նեցուկային» օբյեկտների կոորդինատները։ Որպես նեցուկային ընտրվում են այնպիսի օբյեկտներ, որոնք առանձնանում են տեղանքի ֆոնի վրա և կարող են հեշտությամբ նույնականացվել, օրինակ՝ առանձին շինություն, էլեկտրահաղորդագծերի հենարաններ, ռադիոռելեային կայմեր և այլն։ Մշակվել է օգտագործողի գրաֆիկական ինտերֆեյսը MATLAB փաթեթի միջավայրում, որը թույլ է տալիս ավտոմատացնել ԱԹՍ-ի և թիրախի կոորդինատների հաշվարկման ընթացակարգը ՝ GPS ազդանշանների բացակայության դեպքում։

**Առանցքային բառեր.** անօդաչու թռչող սարք, գեոդեզիական կոորդինատներ, կարդանային կախոց, լազերային հեռաչափ, GPS ազդանշաններ, գրաֆիկական ինտերֆեյս, ՀԻԴ կարգավորիչ։

#### O.N. GASPARYAN, A.A. ASATRYAN

# A SYSTEM FOR DETERMINING THE COORDINATES OF GROUND-BASED OBJECTS FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES IN THE ABSENCE OF GPS SIGNALS

Nowadays multirotor unmanned aerial vehicles (UAVs) are widely used in various military and civil areas. The UAV's flight along the required trajectories is performed using the GPS signals which determine the vehicle's position with the accuracy from tens of centimeters to a few meters. However, in practice, some situations may occur when the GPS signals are absent or corrupted. In such cases, very important is the task of determining the coordinates of the UAV itself as well as the coordinates of the ground-based objects which are being tracked from the UAV.

In the paper, an approach to determining the geodetic coordinates of the UAV and ground-based objects is proposed in cases when the GPS signals are absent, but the coordinates of two ground-based, the so-called reference objects, are known. As reference objects, the ones that are distinguished within the local terrain and can be easily identified, for example, separate buildings, power transmission line supports, relay broadcasting pillars, etc should be selected. A Graphical User Interface is developed which works in the MATLAB environment and allows one to automatize the procedure of calculation of coordinates of the UAV and ground-based objects in the absence of GPS signals.

*Keywords:* unmanned aerial vehicle, geodetic coordinates, cardan gimbal, laser range-finder, GPS signals, graphical user interface, PID-regulator.