

УДК 629.7.015.7

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771422021268463>М. М. Шеремет¹, аспірант

АЛГОРИТМ ПОЛЬОТУ МУЛЬТИКОПТЕРА В УМОВАХ ВІДСУТНОСТІ *GPS* СИГНАЛІВ

Ua

Розглядається задача розробки алгоритму автоматичного повернення мультикоптера до місця зльоту при відсутності *GPS* сигналів.

Розроблено алгоритм керування польотом мультикоптера за інформацією магнітометра, датчика повітряної швидкості, барометричного висотоміра, що дозволяє виконати поставлену задачу в умовах відсутності зовнішніх збурень.

Працездатність та ефективність алгоритму підтверджені результатами моделювання із використанням програмного забезпечення Mission Planner та результатами експериментальних випробувань.

En

The problem of developing an algorithm for automatic return of the multicopter to the place of takeoff in the absence of *GPS* signals is considered.

An algorithm for controlling the flight of a multicopter based on the information of a magnetometer, air velocity sensor, barometric altimeter, which allows to perform the task in the absence of external perturbations.

The efficiency and effectiveness of the algorithm are confirmed by the results of modeling using Mission Planner software and the results of experimental tests.

Вступ

Задачі, які вирішуються на даний час за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), вимагають їх повноцінного приладового оснащення та реалізації сучасних алгоритмів керування [1]. Ці алгоритми можуть допомогти зберегти цілісність літального апарату (ЛА) та повернути його до місця зльоту неушкодженим в умовах відсутності *GPS* сигналу, як система керування із відкритим кодом *ArduPilot* [1], стандартний алгоритм якого використовує інформацію акселерометра, барометра та *GPS* і допомагає мультикоптеру повернутися до місця зльоту із певною точністю [2]. Більшість інших систем керування та їх алгоритми знаходяться у закритому доступі, дослідження яких не є можливим [1]. Однак сучасний БПЛА має високий рівень бортового обладнання, що створює можливість логувати курс із початку його польоту. Це дозволяє визначити напрямок до місця зльоту та покинути зону з відсутнім *GPS* зв'язком [3].

¹ КПІ імені Ігоря Сікорського

Постановка задачі

Квадрокоптер без системи автоматичного повернення до місця зльоту є непрактичним пристроєм. Тому необхідно обрати принцип та створити алгоритм, за яким літальний апарат буде повертатися до місця зльоту. Найбільш дієвим методом для цього є використанням *GPS* для визначення координат літального апарату. Але можуть бути умови польоту, коли сигнали *GPS* відсутні.

Метою статті є розробка алгоритму автоматичного повернення мультикоптера до місця зльоту при відсутності *GPS* сигналів.

Алгоритм роботи системи

Розглянемо алгоритм польоту БПЛА із фіксацією курсу (рис. 1).



Рис. 1. Алгоритм польоту БПЛА із фіксацією курсу

Такий алгоритм роботи дозволяє пілоту керувати рухом коптера незалежно від напрямку руху [3]. Точність повернення мультикоптера до місця зльоту залежить від точності визначення курсу БПЛА [4].

Нехай літальний апарат злетів із точки A (рис. 2), географічна широта якої φ_A та географічна довгота λ_A приймаються відомими, і перемістився у точку B із координатами φ_B , λ_B . Останні координати також відомі із інформації від *GPS*, яка приймається функціонуючою у штатному режимі на траєкторії AB .

Припустимо, що у момент часу, коли БПЛА досяг точки B , *GPS* втратила функціональність. Якщо система керування БПЛА побудована лише на інформації із *GPS*, вона стає непрацездатною і БПЛА зазнає аварії. Для уникнення цього передбачимо наявність на борту БПЛА магнітометричного сенсора, який визначає магнітний курс БПЛА. Тоді визначимо необхідний курс руху БПЛА із точки B у точку A . Для цього розглянемо (для загального випадку сферичної поверхні земної кулі, над якою відбувається рух ЛА) сферичний трикутник ABN (рис. 2), на якому N

$(90^\circ, 0)$ – магнітний полюс із координатами географічної широти та довготи, сторони трикутника (дуги великого кола на поверхні земної сфери радіусом R_3) визначені центральними кутами $\alpha=90^\circ - \varphi_B$, $\beta=90^\circ - \varphi_A$ та невідомим кутом γ . Останній знайдемо, використовуючи основну формулу сферичної тригонометрії:

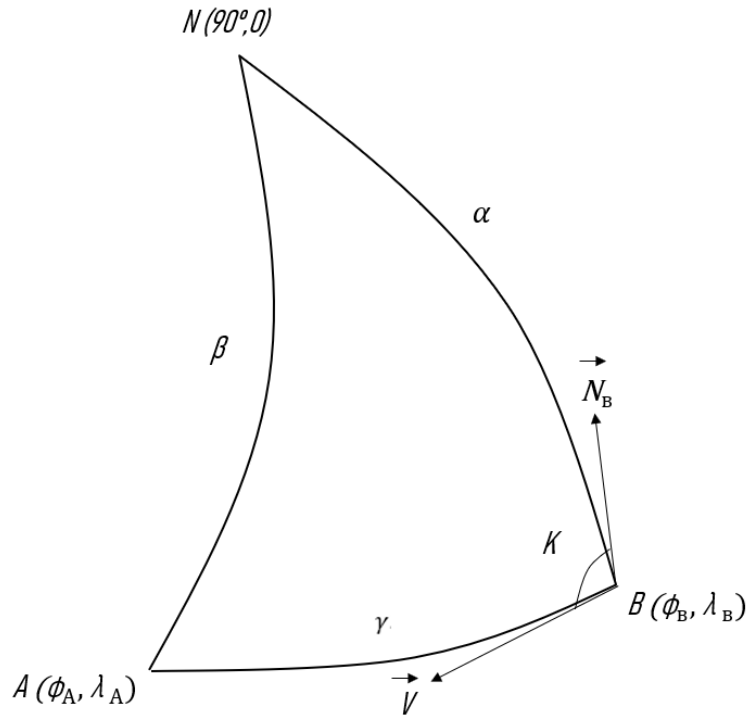


Рис. 2. Визначення курсу на сфері: φ_A – географічна широта; λ_A – географічна довгота; K – двогранний кут, який відповідає куту $N_B V$; \vec{N}_B – напрямок на магнітний полюс Землі; \vec{V} – швидкість БПЛА у напрямку руху у точку A

$$\cos \gamma = \cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta \cos N \Rightarrow \gamma, \quad (1)$$

де N – двогранний кут трикутника ABN у точці N , $N = \lambda_B - \lambda_A$.

Із формули сферичної тригонометрії знаходимо

$$\cos \beta = \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \cos K. \quad (2)$$

Із (1) та (2) отримаємо вираз для знаходження курсу K

$$\cos K = \frac{\cos \beta - \cos \alpha \cos \gamma}{\sin \alpha \sin \gamma} \quad (3)$$

як кут між напрямком \vec{N}_B на магнітний полюс N Землі та вектором швидкості \vec{V} БПЛА у разі руху у точку A . Для того, щоб рух ЛА відбувався по дузі великого кола із радіусом, який приймаємо рівним радіусу земної сфери (рух по ортодромії), необхідно у кожній точці траєкторії визначати

Системи та процеси керування

курс відповідно за виразом (3) для поточних значень кутів $\gamma_i, \alpha_i, \beta_i$. Вони можуть бути легко визначені за відомою швидкістю БПЛА V та часу t_i руху БПЛА від попередньої точки у поточну точку. У припущенні постійної швидкості отримаємо

$$\gamma_i = \gamma(t_i) = \gamma_{i-1} - \frac{V \cdot t_i}{R_3}; \quad \alpha_i = \alpha(t_i) = \alpha_{i-1} + V t_i \operatorname{tg} \frac{\varphi_{i-1} - \varphi_i}{\lambda_{i-1} - \lambda_i};$$

$$\varphi_i = \varphi_{i-1} - V t_i \operatorname{tg} \frac{\varphi_{i-1} - \varphi_i}{\lambda_{i-1} - \lambda_i}; \quad \lambda_i = \lambda_{i-1} - V t_i \operatorname{tg} \frac{\lambda_{i-1} - \lambda_i}{\varphi_{i-1} - \varphi_i}.$$

Тоді визначення кута курсу K між кутом NBV , що зображено на (рис. 3).

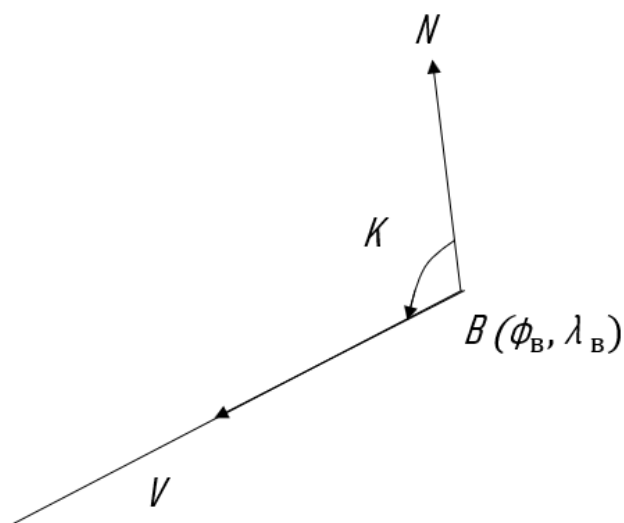


Рис. 3. Визначення курсу K на площині

Якщо відстань між точками A та B невелика, можна знехтувати сферичністю Землі, прийнявши рух БПЛА у площині (рис. 3) по прямолінійній траєкторії. Тоді постійний курс ЛА буде визначатись із виразу

$$\operatorname{tg} K = -\operatorname{tg} \frac{\lambda_B - \lambda_A}{\varphi_B - \varphi_A}, \quad (4)$$

або

$$K = 180^\circ - \operatorname{arctg} \frac{\lambda_B - \lambda_A}{\varphi_B - \varphi_A}. \quad (5)$$

Неважко побачити, що вираз (4) є частинним випадком формули (3). Так, у разі $\lambda_B > \lambda_A$ маємо:

$$y > 0, \quad \alpha > \beta, \quad N > 0 \quad \text{і} \quad K \Rightarrow 90^\circ, \quad (\cos K = 0).$$

Тоді із (1) отримуємо тотожність

$$1 = \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha,$$

то із (2) маємо

$$\lim_{\substack{\gamma > 0 \\ K > 0 \\ \alpha > 0}} \cos K = \lim_{\gamma > 0} \frac{\cos \alpha \sin \gamma}{\sin \alpha \cos \gamma} = 0.$$

Структурна схема системи керування рухом із визначеним курсом зображена на (рис. 4), де ГМГ – гвинтомоторна група, ПК – польотний контролер.

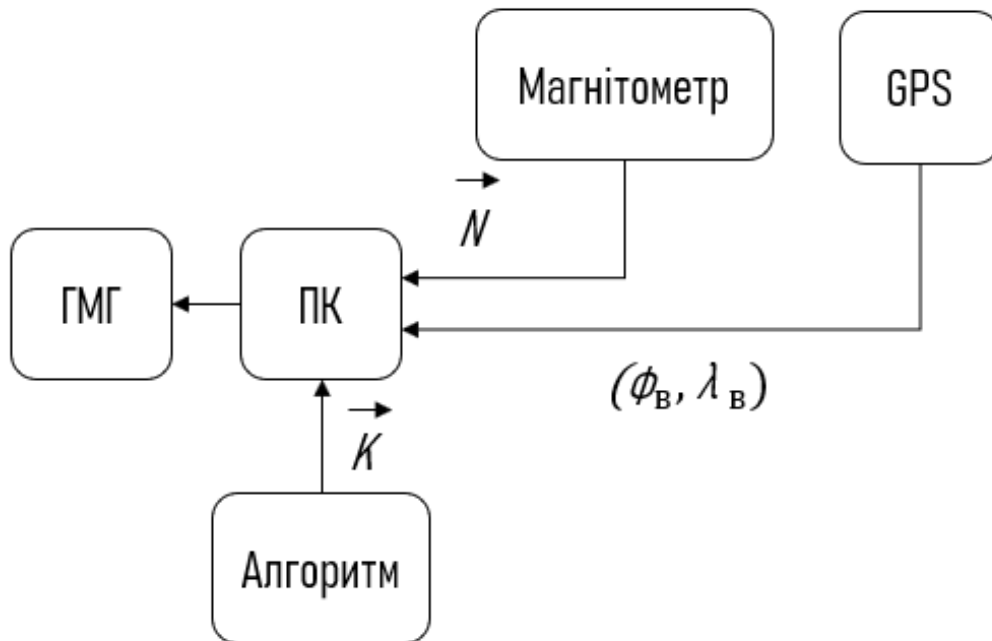


Рис. 4. Структурна схема системи керування

Алгоритм використовує положення мультикоптера щодо початкового курсу, коли він був поставлений у режим *ARMED* [2]. Це означає, що незалежно від того, де знаходиться коптер, зменшення тангажу назад при постійному курсі приведе до його повернення в точку зльоту незалежно від фактичного напрямку [5]. Якщо задається повний крен вправо, апарат буде літати по спіралі (радіус може збільшуватися із кожним витком через «запізнювання») [6].

Результати експериментальних досліджень алгоритму за умов відсутності *GPS* сигналів

Отримані у ході льотних випробувань дані записуються у польотний контролер, після чого виконується другий політ із вимкненим *GPS* модулем на етапі 4 - 5 (профіль польоту № 1, рис. 5).



Рис. 5. Профіль польоту

Вимикання *GPS* модуля реалізований шляхом додаткового радіо каналу для відновлення роботи в екстреній ситуації.

Після досягнення віддалення (у межах 500 м) повернення БПЛА до точки зльоту здійснювалось автоматично (профіль польоту 8-9). За результатами виконання завдання проведено фото фіксацію даних із ноутбука (рис. 6).



Рис. 6. Маршрут польоту мультикоптера

На рис. 7 суцільною лінією показано заданий маршрут польоту.



Рис. 7. Політ із використанням розробленого алгоритму

Маршрут, що зображений широкою пунктирною лінією, відповідає польоту по координатах із використанням *GPS* модуля (ділянка 1-8). Далі відбувається примусове відключення *GPS* модуля та намагання БПЛА повернутися до місця зльоту, ділянка 8-9 – завершення місії у ручному режимі.

Маршрут короткою пунктирною лінією показує загальну роботу системи із використанням алгоритму повернення до місця зльоту. На логах польоту видно, що на ділянці 8-9, на відміну від звичайного польоту, коптер чітко обрав напрям до місця зльоту та виконав завершення місії із відсутнім *GPS* приймачем, здійснивши посадку із точністю 20 м від місця зльоту.

Висновки

Результати випробувань показують ефективність і стабільність розробленого алгоритму, який дозволяє повернути мультикоптер до місця зльоту на основі аналізу початкового курсу БПЛА в умовах відсутності інформації від *GPS*.

Алгоритм забезпечує також повернення БПЛА до місця зльоту у випадку втраті керування оператором.

Алгоритм можна також використовувати для випадків, коли БПЛА знаходиться на далекій відстані від оператора поза зоною видимості (у режимі ручного керування), та у поєднанні практично із усіма режимами

автоматичного польоту, крім *Acro* і *Drift* (у цих режимах польоту налаштування ігнорується).

Список використаної літератури

1. Ardupilot.org URL: <https://ardupilot.org/copter/docs/rtl-mode.html> (дата звернення 18.03.2021).
2. UAV Chanel. Honeywell MAV. відео-хостинг. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=94lVDFauOLO> (дата звернення 01.05.2012).
3. Spherical flight vehicle with single rotor using 4 control surfaces. Young Bae Lee: відео-хостинг. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=55d5ppwQBQ4> (дата звернення 21.02.2021).
4. Mavlink.io URL: <https://mavlink.io/en/> (дата звернення 21.02.2022).
5. *Cobano J. N.* Efficient local path planning for UAVs in unknown environments / J. N. Cobano, A. S. Ollero, L. P. Rodriguez. // XV workshop of physical agents. – 2016. – № 1. – С. 125.
6. *Madgwick S.* An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays/ Madgwick. // University of Bristol. – 2015. – № 7. – С. 60 - 95.