

УДК 629.735, 054.03:629.735.33-519 (045)

АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДОВИХ КУТОВИХ ШВИДКОСТЕЙ ЗВ'ЯЗАНОЇ СИСТЕМИ КООРДИНАТ ОБ'ЄКТА, ЩО ВІЛЬНО ОБЕРТАЄТЬСЯ

I. О. Коврижкін, фахівець першої категорії

Національний авіаційний університет

IgorKovr@gmail.com

Розглянуто спосіб визначення кутів просторової орієнтації літального апарата при використанні сигналів системи супутникової навігації і магнітометричних датчиків. Запропоновано метод для використання в системах з мікромеханічними гіроскопічними датчиками в безпілотних літальних апаратах малих класів.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, датчик кутової швидкості, система супутникової навігації, магнітометр; гіроскоп; швидкість; вітер.

The method of determination of corners of spatial orientation of aircraft is examined at the use of signals of the system of satellite navigation and magnetometer sensors. A method is proposed for use in systems with micromechanical gyroscopic sensors for small classes drones.

Keywords: UAV; gyro; GPS; magnetometer; velocity; wind.

Проблематика наведення безпілотного літального апарата

Одним з найважливіших елементів функціонування безпілотного літального апарата (БПЛА) є забезпечення інформаційного поля системи положення відносно земної системи координат. Для БПЛА малих класів актуальним є отримання інформації від мікроелектронних та мікромеханічних компонентів. Зазначимо, що традиційний гіроскопічний датчик кутової швидкості (ДКШ) на основі двоступеневого механічного гіроскопа при задовільній точності має неприйнятні характеристики для БПЛА класів мікро і міні.

Недоліками твердотілих ДКШ і, відповідно, мікромеханічних гіроскопів на їх основі, є невисока точність і температурна нестабільність, що неприйнятно при автономному вирішенні завдань навігації в БПЛА.

Швидкість відходу мікромеханічних гіроскопів (рис. 1) становить порядку 10 год і більше. Тому вони призначені для вживання в тих пристроях, де інтервали автономної роботи гіроскопа досить малі, тобто корекція виробляється досить часто або безупинно.

Системи періодичної корекції кутів просторової орієнтації БПЛА

Пропонується підхід до побудови системи періодичної корекції кутів просторової орієнтації БПЛА на основі обробки даних виміру земного магнітного поля. Розв'язок цієї задачі, у свою чергу, дасть змогу формувати склад системи автоматичного управління при мінімальному використанні інших датчиків.

Найбільш актуальним таке завдання є для БПЛА класів мікро і міні, де вартість і вага устаткування має принципове значення.

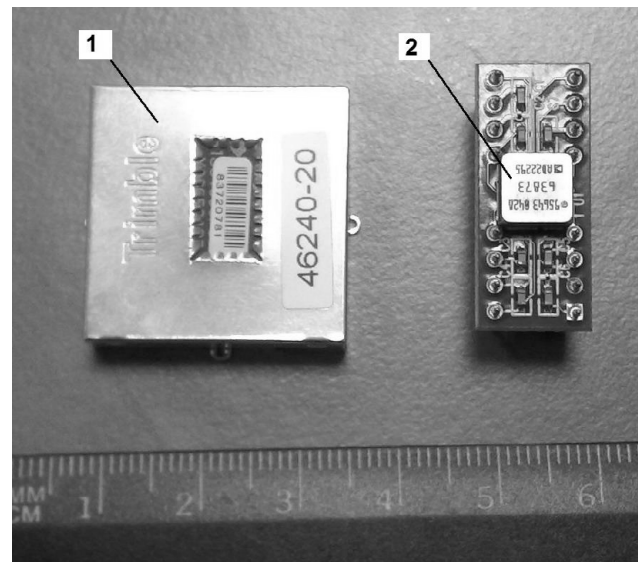


Рис. 1. Мікромеханічні гіроскопи

Слід зазначити, що даний метод свідомо не передбачає високу точність визначення кутової орієнтації. Це зумовлено тим, що кут курсу (азимут) вважається відомим і наявний у сигналах, вимірюваних системою супутникової навігації.

Отже, використовується допущення про збіг швидкісної і зв'язаної систем координат (СК), тобто передбачаємо, що кути атаки і ковзання дорівнюють нулю.

Звідси випливає, що похибка визначення шуканих кутів тангажу і крену співвимірна з середніми значеннями кутів атаки і ковзання і становить величини порядку одиниць градусів. Також зазначимо, що похибка може бути істотно меншою (до 1°) на прямолінійних ділянках польоту, а саме такі ділянки і передбачаються основними для здійснення корекції.

Принцип вимірювання кутів показано на рис. 2.

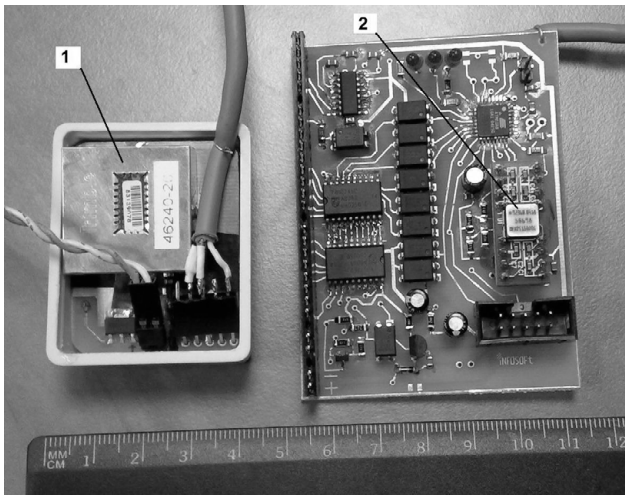


Рис. 2. PGS приймач (1) та плата з магнітонасиченого магнітометра (2)

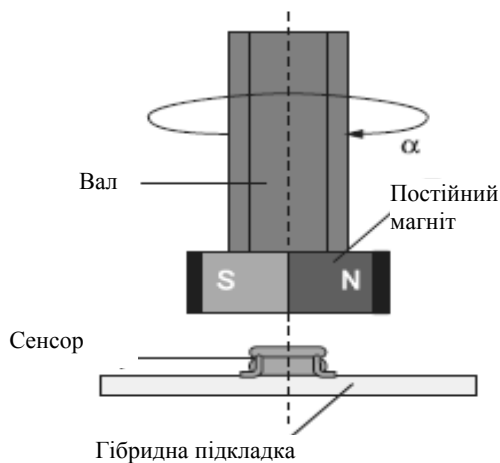


Рис. 3. Вимірювання кутової координати

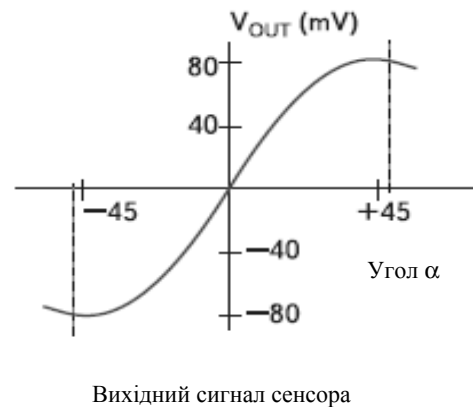
На торці вала кріпиться дипольний магніт. При повороті магнітного вектора на кут α змінюється опір і вихідна напруга датчика, за зміною якого можна визначити кут повороту вала і напрямок (у межах $\pm 45^\circ$).

Для того щоб вимірювати кут повороту в межах $\pm 90^\circ$, об'єднують два датчики, зміщені один до одного на 45° .

Даний принцип пояснюється на рис. 3.

Обладнання, що використовується для вимірювань

Для використання даних про напрямок вектора напруженості магнітного поля Землі в автоматичних системах управління з 40-х років XX ст. широко використовуються феромагнітні зонди (магнітонасичені магнітометри) [1].



Вихідний сигнал сенсора

Низький поріг чутливості, малі розміри (датчик Ktz-10 фірми Philips має розміри $5 \times 5 \times 2$ мм — див. поз. 2 на рис. 2), відсутність рухомих частин зумовили широке вживання феромагнітних зондів у курсових системах.

Три взаємно перпендикулярних ферозонди (рис. 4) дозволяють вимірювати повний вектор напруженості магнітного поля.

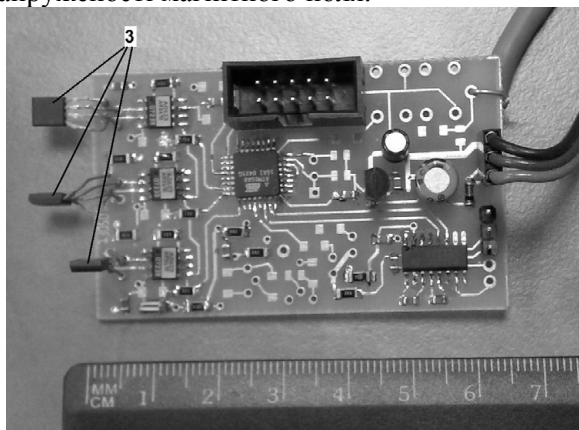


Рис. 4. Взаємно перпендикулярні ферозонди

Без порушення спільності викладу вважати- мемо результати виміру нормованими, тобто модуль повного виміряного вектора вважатимемо одиничної довжини. Крім того, через обмеженість об'єму, не розглядатимемо тут важливі питання, що стосуються змін магнітного поля Землі, які носять як регулярний, так і випадковий характер (магнітна відміна, аномалії, річні і добові варіації, магнітні бурі). Також відомими і вирішуваними рахуватимемо завдання обліку впливу власних магнітних полів планера і устаткування БПЛА (девіація). Це звичайна практика експлуатації літальних апаратів [2].

Математичне обґрунтування запропонованого методу

При ідеальному вимірюванні магнітного поля векторним вимірником (три магнітометри), зв'язаним з осями зв'язаної системи координат БПЛА, вимірюваний вектор може бути поданий у вигляді:

$$H = A(\psi, \theta, \gamma)H_3, \quad (1)$$

де H — вимірний вектор магнітного поля Землі в зв'язаній СК; A — матриця переходу від земної до зв'язаної СК; ψ , θ , γ — кути курсу, тангажа і крену; H_z — повний (одичний) вектор магнітного поля в земній СК.

Відомо, що рівняння (1) нерозв'язне однозначно відносно кутів орієнтації. Зазначимо, що терміни «курс», «тангаж» і «крен» далі використовуватимемо лише при збігу осей магнітометрів зі зв'язаною СК. Тριάду магнітометрів загалом

$$A(\psi, \sigma, \gamma) = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \theta & \sin \theta & -\sin \psi \cos \theta \\ \sin \psi \sin \gamma - \cos \psi \sin \theta \cos \gamma & \cos \theta \cos \gamma & \cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin \theta \cos \gamma \\ \sin \psi \cos \gamma + \cos \psi \sin \theta \sin \gamma & -\cos \theta \sin \gamma & \cos \psi \cos \gamma - \sin \psi \sin \theta \sin \gamma \end{pmatrix}$$

Розглянемо можливість визначення кутів тангажа θ і крену γ при відомому куті курсу ψ , який надходить від GPS-приймача. Тоді, враховуючи зазначене вище вимірний вектор H буде дорівнювати:

$$\begin{aligned} H_x &= \cos \psi \cos \theta; \\ H_y &= \sin \psi \sin \gamma - \cos \psi \sin \theta \cos \gamma; \\ H_z &= \sin \psi \cos \gamma + \cos \psi \sin \theta \sin \gamma. \end{aligned}$$

Із першого рівняння можна визначити

$$\cos \theta = H_x / \cos \psi. \quad (2)$$

Помножимо друге рівняння на $\cos \gamma$, третє — на $\sin \gamma$ і віднімемо одне від одного:

$$H_z \sin \gamma - H_y \cos \gamma = \cos \psi \sin \theta. \quad (3)$$

Помножимо друге рівняння на $\cos \gamma$, третє — на $\sin \gamma$ і додамо одне до одного:

$$H_y \sin \gamma + H_z \cos \gamma = \sin \psi. \quad (4)$$

Рівняння (3), (4) можна розглядати як систему двох лінійних рівнянь відносно невідомих $\sin \gamma$ і $\cos \gamma$. Розв'яжемо цю систему за методом Крамера. Головний визначник системи:

$$\Delta = \begin{vmatrix} H_z & -H_y \\ H_y & H_z \end{vmatrix} = H_z^2 + H_y^2.$$

Часткові визначники відповідно:

$$\begin{aligned} \Delta \sin \gamma &= \\ &= \begin{vmatrix} \cos \psi & H_z \\ \sin \psi & -H_y \end{vmatrix} = -(H_y \cos \psi \sin \theta + H_z \sin \psi); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \cos \gamma &= \\ &= \begin{vmatrix} H_y & \cos \psi \sin \theta \\ H_z & \sin \psi \end{vmatrix} = H_y \sin \psi - H_z \cos \psi \sin \theta. \end{aligned}$$

Визначивши ($\Delta \neq 0$), $\sin \gamma = \Delta \sin \gamma / \Delta$ і $\cos \gamma = \Delta \cos \gamma / \Delta$, знайдемо:

можна орієнтувати довільно, але під час обчислення шуканих кутів орієнтації БПЛА, слід коректно врахувати їх настановні кути.

При відомому магнітному нахилі, без обмеження спільності, можна покласти $H_{3z} = 0$. Отже, $H_{3y} = 0$. Вважатимемо, що повний вектор напруженості магнітного поля Землі H горизонтальний і спрямований на північний полюс, тобто $H_3 = (1, 0, 0)^T$.

Матриця A має вигляд [3]:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{H_y \cos \psi \sin \theta + H_z \sin \psi}{H_z \cos \psi \sin \theta - H_y \sin \psi}. \quad (5)$$

Проблеми запропонованого методу та їх усунення

Викладений метод непрацездатний у таких зонах невизначеності:

1. Орієнтація осі магнітометра X близька до положення «горизонтально на північ або на південь». Оскільки вектор H одичний, головний визначник перетворюється на нуль $H_y^2 + H_z^2 = 0$ при $H_x = \pm 1$. Це саме підтверджує рівняння (5), де знаменник прагне до нуля при одночасному наближенні до нуля (або 180°) кутів тангажа і курсу.

2. Орієнтація осі магнітометра X з курсом $\psi = \pm 90^\circ$, оскільки при цьому $\cos \psi = 0$ і не має розв'язку рівняння (2).

3. Вертикальна орієнтація осі магнітометра X (невизначений курс).

Неважко зрозуміти, що через ортогональності датчиків, досить було згадати лише п. 1, замінивши «вісь магнітометра X » на «вісь будь-якого з магнітометрів».

Для визначення $\operatorname{tg} \gamma$ (5) необхідно знати значення $\sin \theta$, яке можна знайти за відомого $\cos \theta$ — рівняння (2). Неоднозначність значення кута тангажа (на рівні знака), викликана парністю косинуса, можна визначити будь-якими непрямыми методами, що зважають на специфіку завдання. Також слід зауважити, що типовий політ БПЛА, як правило, відбувається з кутами крену і тангажа, що не перевищують за модулем кутів порядку 20...30 градусів.

Також зазначимо, що питання необхідної точності визначення кутів орієнтації БПЛА при вирішенні завдань навігації за відсутності необхідності числення координат (надходять від GPS) — є самостійним завданням, тісно пов'язаним з конкретною реалізацією (аеродинамічна схема

БПЛА, стійкість, використовувані закони управління тощо).

Для уникнення станів невизначеності можна запропонувати декілька варіантів, простими з яких, є:

– заборона вживання методу при $\theta = \psi = 0 \pm 180^\circ$ і $\psi = \pm 90^\circ$;

– установка двох (або більше) тріад магнітометричних датчиків під відомими фіксованими кутами відносно один одного з почерговим або одночасним їх використанням тріад датчиків (вартість їх невелика).

Висновок

Принципова працездатність запропонованого підходу була випробувана при тестових натурних випробуваннях.

На рис. 1 показані: приймач GPS (використовувався Lassen — поз. 1) і гіроблок (використовувався ДУС ADXRS-150 — поз. 2).

Для реалізації викладеного підходу використовувалася тріада магнітометрів KMZ-10 (рис. 3, поз. 2).

Даний метод пропонується для використання в БПЛА малих класів а також систем наведення вільнопадаючих об'єктів.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Берг А. И.* Аоматизация производства и промышленная электроника / А. И Берг, В. А. Трапезников. — М. : Державне наукове видавництво «Советская энциклопедия», 1963. — Т. 2. — 72 с.

2. *Калашников В. А.* Инструкция по выполнению девиационных и радиодевиационных работ на самолётах и вертолётах / В. А. Калашников. — М. : Військвидав, 1972. — 87 с.

3. *Горелин И. С.* Авиационные прицельно-навигационные системы / И. С. Горелин. О. Г. Коврижкин, В. В. Королев. — К. : Видавництво КИ ВВС, 1996.

Стаття надійшла до редакції 26.11.2014.