

ВИКОРИСТАННЯ МАГНІТОМЕТРІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВОЇ ОРІЄНТАЦІЇ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

Коврижкін О. Г., Мельникович В. Б., Горін І. Я.

Національний авіаційний університет

kovr@direx.ua

Розглянуто спосіб визначення кутів просторової орієнтації літального апарата при використанні сигналів системи супутникової навігації і магнітометричних датчиків.

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.

Вступ

Зростання (в кінці ХХ, початку ХХІ ст.) ряду випускаючих у світі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) пов'язане, переважно, з мініатюризацією і здешевленням бортового устаткування управління і корисного навантаження. Прогрес у цій області в основному зумовлений такими чинниками:

- появою системи глобальної навігації GPS і поширенням малогабаритних приймачів GPS;
- мікромініатюризацією і здешевленням елементів обчислювальної техніки;
- появою акумуляторів високої питомої ємності, використовуваних як бортові джерела живлення і навіть енергоносії силових установок.

За наявності у складі устаткування GPS-приймача, вимір координат не становить проблеми. І, отже, завдання траєкторного управління (вихід у задану точку, заняття ешелону, повернення на аеродром тощо), вирішується відомими методами. Принципову складність продовжує становити завдання управління кутовим положенням безпілотного літального апарата, без якого завдання траєкторного управління вирішити неможливо. Передусім проблема полягає в інформаційному забезпеченні цього завдання, визначенні кутів просторової орієнтації — курсу, тангажа і крену впродовж усього польоту.

Майже всі системи управління орієнтацією БПЛА як основний елемент мають гіроскопічну вертикаль, яка дає інформацію про положення місцевої вертикалі. Гіровертикаль, як правило, є найдорожчим і складним пристроєм бортового устаткування БПЛА. Так, наприклад, гіровертикалі виробництва Арзамаського ВАТ «Темп-авіа» МГВ-5 і МГВ-6 (найлегша з гіровертикалей виробництва РФ) важать 1,3 і 1 кг, і коштують \$12000 і \$6000 відповідно.

Вартість сучасної електронно-обчислювальної техніки на порядки нижча за вартість гіровертикалей. Наприклад, GPS-приймач «Lassen»

фірми *Trimble Navigation* коштує приблизно \$100. Несумірні і масогабаритні характеристики: «Lassen» являє собою паралелепіпед розмірами 27x27x11 мм, його маса 5,7 г (див. позицію 1 на рис. 1).

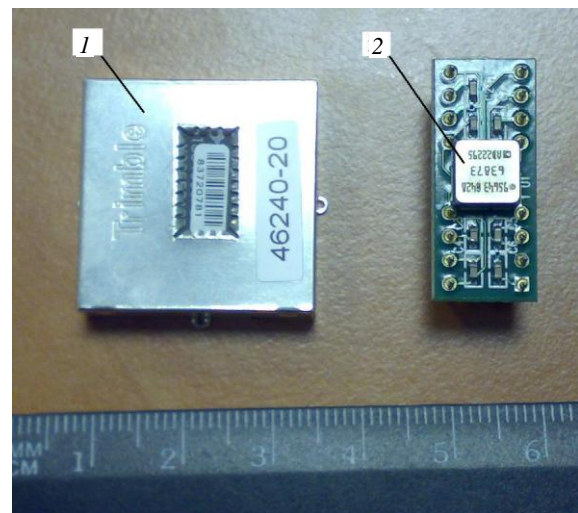


Рис. 1. GPS-приймач «Lassen»

Природно виникає прагнення виключити гіровертикаль зі складу системи. Відомі системи управління орієнтацією БПЛА, що не містять гіровертикалей. Основним чутливим елементом таких систем є датчик кутової швидкості, що є основою побудови безплатформних інерціальних систем. Відзначимо, що традиційний гіроскопічний датчик кутової швидкості (ДКШ) на основі двоступеневого механічного гіроскопа при задовільній точності (рис. 2) володіє неприйнятними характеристиками для БПЛА класів мікро- і міні- (порівняно великі маса, габарити, вартість).

На сьогодні твердотілі п'єзоелектричні датчики кутової швидкості, наприклад, ДКШ виробництва фірми *Analog Devices* типа Adxrs150, Adxrs300 (до 150 або 300 °/с) випускаються в мініатюрних корпусах розміром 7 x 7 x 3 мм, вага такого приладу не перевищує 0,5 г (на рис. 3, 4, позиція 2).



Рис. 2. Класифікатор гіроскопів

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 становить близько $10^\circ/\text{год}$ і більше (рис. 2). Тому вони призначені для вживання в тих пристроях, де інтервали автономної роботи гіроскопа досить малі, тобто корекція виробляється досить часто або безупинно.

Основне завдання

Пропонується підхід до побудови системи періодичної корекції кутів просторової орієнтації БПЛА на основі обробки даних виміру магнітного поля Землі.

Розв'язання цієї задачі, своєю чергою, дасть змогу сформувати склад системи автоматичного управління за мінімального використання інших датчиків. Найбільш актуальним таке завдання є для БПЛА класів мікро- і міні-, де вартість і вага устаткування має принципове значення. Слід зауважити, що цей метод не передбачає високої точності визначення кутової орієнтації. Це зумовлено тим, що кут курсу (азимут) вважається відомим і наявний у сигналах, вимірюваних системою супутникової навігації. Отже, припускається збіг швидкісної і зв'язаної систем координат (СК) — тобто передбачаємо, що кути атаки і ковзання дорівнюють нулю. Звідси випливає, що похибка визначення шуканих кутів тангажа і крену співвимірна з середніми значеннями кутів атаки і ковзання і становить величини порядку одиниць градусів. Отже, похибка може бути істотно меншою (до 1°) на прямолінійних ділянках

польоту, а саме такі ділянки і передбачаються основними для здійснення корекції.

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

Низький поріг чутливості, малі розміри (датчик Kmz-10 фірми *Philips* має розміри $5 \times 5 \times 2$ мм на рис. 3 позиція 3), відсутність рухомих частин зумовили широке вживання феромагнітних зондів у курсових системах. Три взаємно перпендикулярних ферозонди (рис. 3) дають змогу вимірювати повний вектор напруженості магнітного поля.

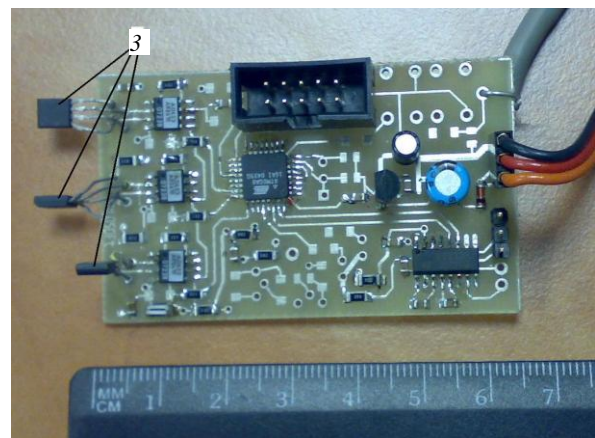


Рис. 3. Датчик кутової швидкості фірми Analog Devices

Без порушення спільності викладу вважати- мемо результати виміру нормованими, тобто модуль повного вимірюного вектора буде одиничної довжини. Крім того, через обмеженість об'єму, не розглядатимемо важливих питань, що стосу-

ються 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 і устаткування БПЛА (девіація) [2].

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

$$\mathbf{H} = \mathbf{A}(\psi, \theta, \gamma) \times \mathbf{H}_z \quad (1)$$

де \mathbf{H} — вимірний вектор магнітного поля Землі у зв'язаній СК; \mathbf{A} — матриця переходу від земної до зв'язаної СК; ψ, θ, γ — кути курсу, тангажа і

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

Результати дослідження

Розглянемо можливість визначення кутів тангажа θ і крену γ при відомому куті курсу ψ , який надходить від GPS-приймача. Тоді, за припущення вимірний вектор \mathbf{H} буде дорівнювати:

$$H_x = \cos \psi \cos \theta;$$

$$H_y = \sin \psi \sin \gamma - \cos \psi \sin \theta \cos \gamma;$$

$$H_z = \sin \psi \cos \gamma + \cos \psi \sin \theta \sin \gamma.$$

З рівняння вектора можна визначити

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

Помножимо рівняння на $\cos \psi$, та на $\sin \psi$ і віднімемо один від одного:

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

Помножимо рівняння (2) на $\cos \psi$, (3) — на $\sin \psi$ і додамо один до одного:

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

Рівняння (3), (4) можна розглядати як систему двох лінійних рівнянь відносно невідомих $\sin \psi$ і $\cos \psi$. Розв'яжемо цю систему 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:

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

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

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

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

крену; \mathbf{H}_z — повний (одичинний) вектор магнітного поля в земній СК.

Рівняння (1) не можна розв'язати однозначно відносно кутів орієнтації. Зауважимо, що використання термінів «курс», «тангаж» і «крен» умовно і прийнятно лише при збігу осей магнітометрів із зв'язаною СК. Тріаду магнітометрів зазвичай можна орієнтувати довільно, при цьому, під час обчислення шуканих кутів орієнтації БПЛА слід коректно врахувати їх настановні кути.

При відомому магнітному нахилі, без обмеження спільності, можна покласти $\mathbf{H}_z z = 0$. Таким чином, $\mathbf{H}_z u = 0$.

Отже, вважатимемо, що повний вектор напруженості магнітного поля Землі \mathbf{H} горизонтальний і напрямний на північний полюс, тобто $\mathbf{H}_z = (1, 0, 0)^T$. Матриця \mathbf{A} має вигляд [3]:

Викладений метод непрацездатний у таких зонах невизначеності:

1. Орієнтація осі магнітометра X близька до положення «горизонтально на північ або на південь».

Оскільки вектор \mathbf{H} одичинний, головний визначник перетворюється на нуль $H_y^2 + H_z^2 = 0$ при $H_x = \pm 1$.

Це ж 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 рішення 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 $\operatorname{tg} \psi$ (5) необхідно знати значення $\sin \theta$, яке можна визначити при відомому $\cos \theta$ — рівняння (2).

Неоднозначність значення кута тангажа (на рівні знака), викликана парністю косинуса, можна визначити будь-якими непрямими 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 близько $20 \dots 30^\circ$.

Також зауважимо, що необхідна точність визначення кутів орієнтації БПЛА при вирішенні завдань навігації за відсутності необхідності числення координат (надходять від GPS) — є самос-

тійним завданням, тісно пов'язаним з конкретною реалізацією (аеродинамічна схема БПЛА, стійкість, використовувані закони управління та ін.).

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

- заборона вживання методу при $\theta = \psi = 0 \pm \pm 180^\circ$ і $\psi = \pm 90^\circ$;
- установлення двох (або більше) тріад магнітометричних датчиків під відомими фіксованими кутами відносно один одного з почерговим або одночасним їх використанням тріад датчиків (вартість їх невелика).

На рис. 4 показано: приймач GPS (використовувався *Lassen* — позиція 1) і гіроблок (використовувався ДУС ADXRS-150 — позиція 2).

Принципову працездатність запропонованого підходу було випробувано при тестових натурних випробувань.

Для реалізації викладеного підходу використовувалася тріада магнітометрів KMZ-10 (рис. 3 позиція 3).

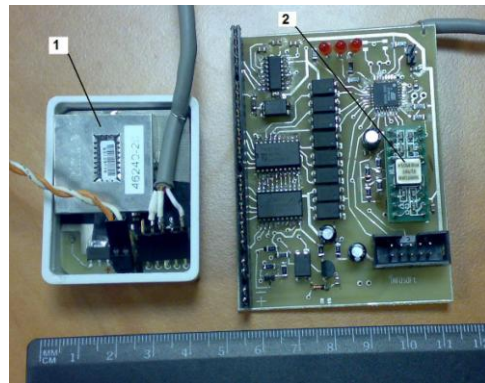


Рис. 4. Датчик кутової швидкості фірми Philips

ЛІТЕРАТУРА

1. *Автоматизация* производства и промышленная электроника: гол. ред. А. И. Берг и В. А. Трапезников. — М. : Державне наукове видавництво «Советская энциклопедия», 1963. — Т. 2. — 346 с.
2. *Инструкция* по выполнению девиационных и радиодевиационных работ на самолётах и вертолётах. — М. : Військвидав, 1972. — 40 с.
3. *Горелин И. С.* Авиационные прицельно-навигационные системы / И. С. Горелин, Г. О. Коврижкин, В. В. Королев. — К. : КИВВС, 1996. — 260 с.

Стаття надійшла до редакції 14.12.09.