

УДК 629.783

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771432022275284>Л. М. Рижков¹, *д.т.н., професор*, Р. А. Голембіовський², *бакалавр*

АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ОРІЄНТАЦІЇ СУПУТНИКА НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ДАТЧИКА ЗЕМЛІ ТА МАГНІТОМЕТРА

Ua

Розглядається алгоритм визначення орієнтації супутника на основі інформації з датчика Землі та магнітометра. Аналізується вплив інструментальних похибок магнітометра на точність визначення орієнтації. Порівнюються алгоритм TRIAD та алгоритм, в якому обчислюється тільки кут рискання

En

An algorithm for determining the orientation of a satellite based on information from an Earth sensor and a magnetometer is considered. The effect of instrumental errors of the magnetometer on the accuracy of orientation determination is analyzed. The TRIAD algorithm is compared with an algorithm in which only the heading angle is calculated.

Вступ

Визначення орієнтації супутників виконується, як правило, на основі використання двовекторних методів [1, 2]. У якості вимірювачів використовуються датчики Сонця, датчики Землі, магнітометри. Система, в якій використовуються датчики Землі та магнітометри є конструктивно найбільш простою і функціонально найбільш надійною. Найважливіше питання – це алгоритм обробки інформації, тобто, алгоритм визначення орієнтації [1]. Найбільш поширений – це алгоритм TRIAD, за яким одночасно обчислюються три кути орієнтації. У даному випадку його використання не є оптимальним, так як датчик Землі вже визначає два кути, тобто, невідомим є лише кут рискання. Тобто, має місце надлишкова інформація. Крім того, слід врахувати, що магнітометри є менш точними вимірювачами, ніж датчики Землі, тому одним із варіантів вирішення задачі є використання датчика Землі для визначення кутів тангажу та крену, а з алгоритму TRIAD використовувати тільки кут рискання. У роботі [3] запропоновано алгоритм визначення орієнтації, у якому алгоритм TRIAD не використовується,

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

² КПІ ім. Ігоря Сікорського

а магнітометр використовується тільки для обчислення кута курсу, тобто, надлишковість відсутня.

Постановка задачі

Розглянемо алгоритм визначення орієнтації супутника, на основі використання датчика Землі та магнітометра. Будемо вважати відомими кути тангажу та крену (вимірюються датчиком Землі) та три проекції вектора напруженості магнітного поля Землі на осі зв'язаної системи координат (вимірюються магнітометрами). Виконаємо аналіз точності обчислення кута рискання за допомогою цього алгоритму та порівняємо її із точністю відомого алгоритму TRIAD.

Алгоритм обчислення кута рискання

Положення супутника будемо розглядати в орбітальній системі координат $Ox_0y_0z_0$ (рис. 1). Взаємне положення орбітальної системи координат та системи координат $OXYZ$, зв'язаної зі супутником, задамо кутами ψ , θ , φ .

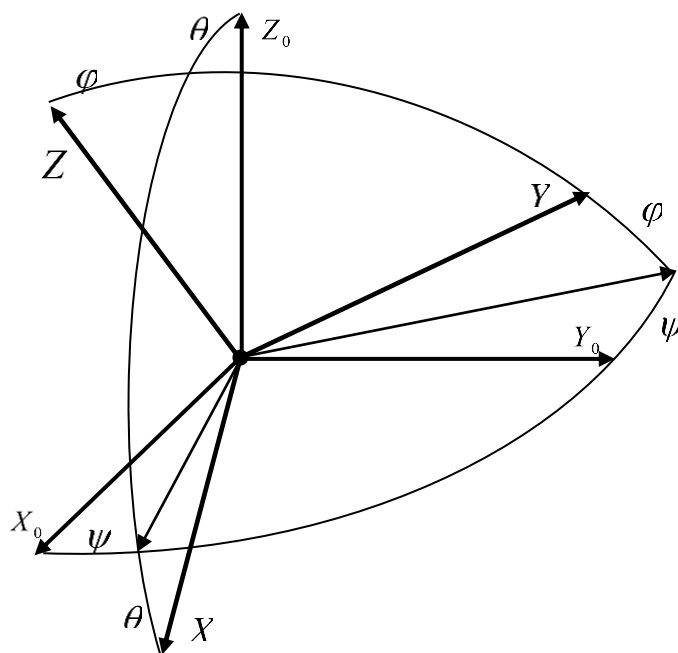


Рис. 1. Кути Ейлера

Будемо вважати відомими (обчисленими) проекції a_{x0}, a_{y0}, a_{z0} вектора індукції магнітного поля Землі на осі орбітальної системи координат, та відомими (вимірними) проекції a_x, a_y, a_z вектора індукції магнітного поля

Землі на осі зв'язаної системи координат [3]. Відомими будемо також вважати кути θ та φ , виміряні датчиком Землі.

Використовуючи рис. 1, отримаємо наступні співвідношення:

$$\begin{aligned} a_x &= a_{x0} \cos \psi \cos \theta + a_{y0} \sin \psi \cos \theta - a_{z0} \sin \theta; \\ a_y &= a_{x0} (-\sin \psi \cos \varphi + \cos \psi \sin \varphi \sin \theta) + a_{y0} (\cos \psi \cos \varphi + \\ &\quad + \sin \psi \sin \varphi \sin \theta) + a_{z0} \cos \theta \sin \varphi; \\ a_z &= a_{x0} (\sin \psi \sin \varphi + \cos \psi \cos \varphi \sin \theta) + a_{y0} (-\cos \psi \sin \varphi + \\ &\quad + \sin \psi \cos \varphi \sin \theta) + a_{z0} \cos \theta \cos \varphi. \end{aligned} \quad (1)$$

Для дипольної моделі магнітного поля Землі маємо [4]

$$\begin{bmatrix} a_{x0} \\ a_{y0} \\ a_{z0} \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} \tilde{a}_{x0} \\ \tilde{a}_{y0} \\ \tilde{a}_{z0} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де

$$\lambda = \frac{M_3}{r^3}; \quad \begin{bmatrix} \tilde{a}_{x0} \\ \tilde{a}_{y0} \\ \tilde{a}_{z0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos u \sin i \\ \cos i \\ -2 \sin u \sin i \end{bmatrix}.$$

M_3 – магнітний момент Землі;

r – відстань від центра Землі до супутника;

i – кут нахилу орбіти;

u – аргумент широти.

Із системи (1) знайдемо

$$\sin \psi = \frac{\mu_2 a_{x0} \cos \theta + \mu_1 a_{y0}}{\cos \theta (a_{x0}^2 + a_{y0}^2)} = \frac{\mu_2 \tilde{a}_{x0} \cos \theta + \mu_1 \tilde{a}_{y0}}{\cos \theta (\tilde{a}_{x0}^2 + \tilde{a}_{y0}^2)}, \quad (3)$$

де

$$\mu_1 = \tilde{a}_x + \tilde{a}_{z0} \sin \theta; \quad \mu_2 = \tilde{a}_z \sin \varphi - \tilde{a}_y \cos \varphi;$$

$$\tilde{a}_x = \frac{a_x}{\lambda}; \quad \tilde{a}_y = \frac{a_y}{\lambda}; \quad \tilde{a}_z = \frac{a_z}{\lambda}.$$

На основі виразу (3) будується обчислювач кута ψ .

Бачимо, що внаслідок зміни аргументу широти протягом одного витку орбіти вираз $\tilde{a}_{x0}^2 + \tilde{a}_{y0}^2 = \cos^2 u \sin^2 i + \cos^2 i$ суттєво зменшується, коли орбіта близька до полярної. Це зменшує точність обчислень. Зауважимо, що у цьому випадку мають місце складнощі і під час використання алгоритму TRIAD. Це пояснюється тим, що у цьому разі за значеннях $u = 90^\circ$ та $u = 270^\circ$ два вектори (вектор напруженості магнітного поля Землі і вектор

місцевої вертикалі) стають близькими за напрямом, тобто двовекторна система оцінювання наближається до одновекторної.

Розглянемо вплив похибок магнітометра на точність визначення курсу алгоритмами, що розглядаються. Похибку будемо задавати введенням похибки масштабного коефіцієнта магнітометра 1,05, тобто, 5% .

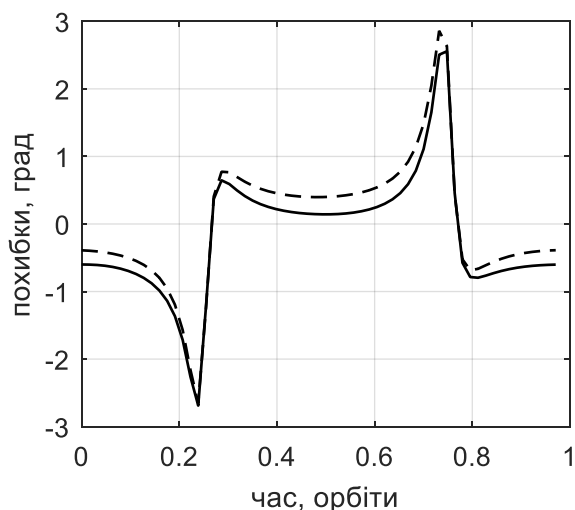


Рис. 2. Похибки

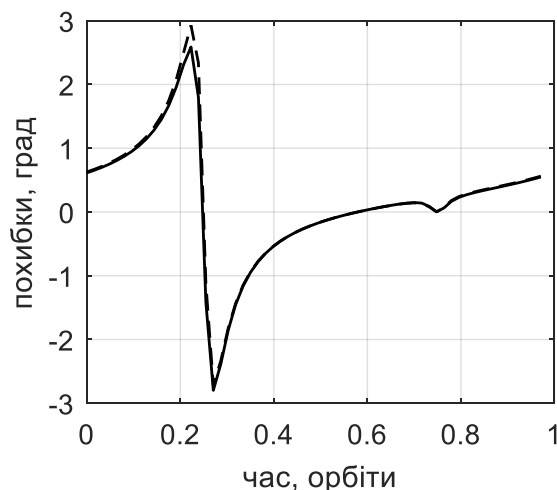


Рис. 3. Похибки

Для розрахунків приймемо $\psi = 5^\circ$; $\theta = 3^\circ$; $\varphi = 4^\circ$. На рис. 2 показано похибку алгоритму TRIAD (суцільна крива) і похибку алгоритму (3) (штрихова крива) при введенні цього коефіцієнту для магнітометра a_x .

На рис. 3 показано аналогічні похибки у разі введення цього коефіцієнту для магнітометра a_y .

Бачимо, що похибки алгоритмів є близькими.

Проведене моделювання підтвердило ефективність використання запропонованого алгоритму визначення орієнтації супутника.

Висновки

Алгоритм окремого обчислення кута рискання забезпечує належну точність визначення орієнтації супутника і є більш простим у реалізації ніж алгоритм TRIAD. Точності алгоритму, що розглядається, та алгоритму TRIAD є близькими.

Список використаної літератури

1. Збруцький О. В., Мелащенко О. М., Рижков Л. М. Алгоритми прецизійної системи визначення орієнтації та керування мікросупутника // Космічні дослідження в Україні/ Звіт до COSPAR, 2011. – с. 125-129.

2. *Krogh K., Shreder E.* Attitude determination for AAU CuberSat // Aalborg University: Department of Control Engineering. – 2002. – p. 133.
3. *Рижков Л. М., Шилко І. С.* Алгоритм оцінювання фазового вектора супутника на основі використання датчика Землі та магнітометра//Інформаційні системи, механіка та керування. 2008. Випуск 1. – С. 148-152.
4. *Овчинников М. Ю., Пеньков В. И., Ролдугин Д. С., Иванов Д. С.* Магнитные системы ориентации малых спутников. М.: ИПМ им. М. В. Келдыша, 2016. 366 с.