

## ВПЛИВ ПОХИБКИ ВІД ПЕРЕНОСНОЇ (ВІДНОСНО ПРИЛАДУ) КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ЗЕМЛІ НА ТОЧНІСТЬ НИЗЬКОЧАСТОТНОГО ГРАВИМЕТРА АВТОМАТИЗОВАНОЇ АВІАЦІЙНОЇ ГРАВИМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ

Точні знання гравітаційного прискорення  $g$  та його аномалій  $\Delta g$  необхідні в авіаційній і космічній техніці (корекція систем інерціальної навігації ракет, літаків, орбіт космічних літальних апаратів), у геології, геодезії (розвідка корисних копалин, вивчення форми поверхні Землі тощо).

Для визначення характеристик гравітаційного поля Землі можна побудувати авіаційну гравіметричну систему (АГС), чутливим елементом (ЧЕ) якої є гравіметр. За допомогою АГС можна здобути гравіметричну інформацію у важкодоступних районах земної кулі набагато швидше та з меншими витратами, ніж за допомогою наземних морських або сухопутних гравіметричних засобів. Тому проведення високоточних авіаційних вимірювань є актуальним.

На кафедрі приладобудування НТУУ «КПІ» сьогодні розроблено новий низькочастотний ПГ, чутливий елемент якого виконано з двома каналами, в кожному з яких встановлено по одному п'єзоелементу. П'єзоелементи обох каналів є ідентичними і виконані у вигляді п'єзопластин та інерційної маси, що закріплені одне на одному. П'єзоелемент одного каналу розташовано п'єзопластинами вниз, а п'єзоелемент іншого каналу розташовано п'єзопластинами вгору. Виходи п'єзопластин обох каналів з'єднані з входами суматора, вихід якого з'єднаний із входом пристрою обчислення вихідного сигналу гравіметра. Новий ПГ є точнішим за існуючі сьогодні гравіметри АГС, тому доцільно буде проаналізувати його похибки.

Похибки від переносної (відносно приладу) кутової швидкості  $\omega_z$  обертання Землі визначаються формулами:

$$\Delta_3 = K_{ПГ} \omega_3; \quad (1)$$

$$\delta_3 = \frac{\Delta_3}{\alpha_{кор}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де  $K_{ПГ}$  – коефіцієнт передачі ПГ;  $\omega_3$  – швидкість обертання Землі;  $\alpha_{кор}$  – корисний сигнал ПГ.

Знайдемо аналітичний вираз похибки  $\Delta_3$ . Для цього врахуємо, що вертикальна складова переносної кутової швидкості головної осі  $xOyz$  зумовлена обертанням Землі і власним рухом ЛА:

$$\omega_z = \omega_3 \sin \varphi + \frac{V_y}{r} \operatorname{tg} \varphi; \quad (3)$$

$$V_y = r \dot{\lambda} \cos \varphi; \quad (4)$$

$$\frac{V_y}{r} \operatorname{tg} \varphi = \dot{\lambda} \sin \varphi, \quad (5)$$

де  $V_y$  – східна складова шляхової швидкості ЛА;  $r$  – геоцентричний радіус Землі;  $\dot{\lambda}$  – швидкість зміни довготи.

Із урахуванням (5) можна представити вираз (3) у вигляді:

$$\omega_z = (\omega_3 + \dot{\lambda}) \sin \varphi. \quad (6)$$

У загальному випадку руху ЛА ще повертається навколо осі  $Oz$  з кутовою швидкістю  $\dot{k}$ , тоді

$$\omega_z = (\omega_3 + \dot{\lambda}) \sin \varphi + \dot{k}, \quad (7)$$

де  $k$  – курсовий кут у площині горизонту, відлічуваний за рухом годинникової стрілки від напрямку на північ до повздовжньої осі об'єкта.

З урахуванням (7) запишемо вираз (3) у вигляді:

$$\Delta_3 = K_{ПГ} [(\omega_3 + \dot{\lambda}) \sin \varphi + \dot{k}]. \quad (8)$$

Відповідне середнє значення абсолютної похибки  $\bar{\Delta}_3$  становить:

$$(t_2 - t_1) \bar{\Delta}_3 = K_{ПГ} [k(t_2) - k(t_1)] + K_{ПГ} \int_{t_1}^{t_2} \omega_3 \sin \varphi(t) dt + K_{ПГ} \int_{t_1}^{t_2} \dot{\lambda}(t) \sin \varphi(t) dt, \quad (9)$$

де  $(t_2 - t_1)$  – інтервал усереднення.

Максимальне значення члена  $K_{ПГ} \omega_3 \sin \varphi$ , яке відповідає  $90^\circ$  та швидкості обертання Землі  $\omega_3 = 7.29 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ , становить  $2.92 \cdot 10^{-5}$  рад.

Очевидно, що при сталому значенні  $\omega_3$  і заданому  $k$  похибка обчислення вказаного члена залежить від похибки визначення  $\varphi$ . Вважаючи, що похибка обчислення  $K_{ПГ} \omega_3 \sin \varphi$  має бути не більшою за  $0.01\% = 2.92 \cdot 10^{-7}$  рад, легко підрахувати, що похибка визначення широти має не перевищувати  $0.5^\circ$ . Зауважимо: похибка визначення широти менша

за  $0.5^\circ$ , якщо замінити  $\int_{t_1}^{t_2} \sin \varphi(t) dt$  середнім значенням  $\overline{\sin \varphi}$  для інтервалу усереднення  $(t_2 - t_1)$ . Крім того, оскільки

польоти відбуваються зі сталою швидкістю, то середнє значення  $\overline{\varphi}$  відповідає середині інтервалу  $(t_2 - t_1)$  і  $\overline{\sin \varphi}$

несуттєво відрізняється від  $\sin \overline{\varphi}$ , тому

$$K_{III} \int_{t_1}^{t_2} \omega_3 \sin \varphi(t) dt = K_{III} \omega_3 \sin \overline{\varphi} (t_2 - t_1). \quad (10)$$

Чутливість АГС до похибок вимірювання широти максимальна під час руху ЛА у середніх широтах. Тому визначимо член  $\dot{\lambda}(t) \sin \varphi$  при  $\varphi = 65^\circ$  і  $v_y = 234$  м/с,  $r = 6.4 \cdot 10^6$  м:

$$\dot{\lambda}(t) \sin \varphi = 7.3 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}. \quad (11)$$

Отже,  $\dot{\lambda}(t) \sin \varphi$  при заданих параметрах руху дорівнює кутовій швидкості обертання Землі.

Якщо брати інтеграл від  $\dot{\lambda}(t)$  для коротких інтервалів часу, які можна вважати сталими, то можна скористатися рівнянням:

$$K_{III} \int_{t_1}^{t_2} \dot{\lambda}(t) \sin \varphi(t) dt = K_{III} [\lambda(t_2) - \lambda(t_1)] \sin \overline{\varphi}, \quad (12)$$

де  $\overline{\varphi}$  – добирається як середина інтервалу усереднення.

Під час випробувальної програми слід обирати маршрут польоту або вздовж паралелі або вздовж меридіана (у цьому разі можна застосовувати розвинення у ряд для відносно грубої апроксимації  $\sin \overline{\varphi}$ ). При зведенні польотних даних для обчислення  $\overline{\varphi}$  слід використовувати середню точку інтервалу  $(t_2 - t_1)$ .

Запишемо вираз (8) в остаточному вигляді:

$$\Delta_3 = K_{III} \left( \frac{k(t_2) - k(t_1)}{t_2 - t_1} + \omega_3 \sin \overline{\varphi} + \frac{\lambda(t_2) - \lambda(t_1)}{t_2 - t_1} \sin \overline{\varphi} \right). \quad (13)$$

Обчислимо  $\overline{\Delta}_3$  та  $\overline{\delta}_3$ , коли  $\dot{k} = 0$ , для наведених вище параметрів. У цьому разі  $\overline{\Delta}_3 = 5.8 \cdot 10^{-5}$  рад = 584 мГал і  $\overline{\delta}_3 = 2.92 \cdot 10^{-2} \%$ .

Отже, похибка ПГ, спричинена  $\omega_3$ , велика порівняно з іншими похибками, її треба враховувати введенням поправки в рівняння руху АГС.

З виразу (13) видно: для того щоб зменшити похибку від переносної кутової швидкості навколо осі ПГ, треба зменшити коефіцієнт передачі каналу вимірювань за рахунок зміни конструкції ПГ.