

ПРИЛАДИ. РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 531.383

О.М. Безвесільна, д.т.н., проф.
Національний технічний університет України "КПІ"

АНАЛІЗ ВПЛИВУ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ЗЕМЛІ
НА ПОХИБКУ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ

Отримано аналітичний вираз для обчислення впливу кутової швидкості обертання Землі на похибку вимірювання кутів гоніометра на основі лазерного гіроскопа; проведено аналіз впливу; надано пропозиції щодо зменшення похибок вимірювань, які виникають через вплив кутової швидкості обертання Землі

Кутівимірювальні прилади на основі лазерного гіроскопа (ЛГ) відрізняються від інших засобів вимірювання кутів тим, що вони чутливі до кутової швидкості обертання Землі. За відомих умов вплив кутової швидкості обертання Землі $\bar{\omega}_e$ може призвести до зниження точності вимірювання кутів. Однак складова похибки вимірювання через обертання Землі може бути зведена до мінімального значення. В літературі [1–3 та інш.] відсутній аналіз впливу кутової швидкості обертання Землі на похибку вимірювань кутів.

Тому **задача даної статті** – отримати аналітичний вираз для обчислення впливу кутової швидкості обертання Землі на похибку вимірювання кутів гоніометра на основі лазерного гіроскопа; провести аналіз впливу; надати пропозиції щодо зменшення похибок вимірювань із-за впливу кутової швидкості обертання Землі.

На рис. 1 показано розташований на поверхні Землі ЛГ 1, який обертається з кутовою швидкістю $\bar{\omega}$, суміщений з місцевою вертикаллю (вісь Oz). Вимірювальна вісь \bar{K} ЛГ 1 при обертанні відхилена від вектора кутової швидкості $\bar{\omega}$ на кут α . Контрольована призма 2 жорстко зв'язана з ЛГ 1. За допомогою фотоелектричного автоколіматора 3 реєструється у динамічному режимі відлікове положення граней призми 2 відносно оптичної осі автоколіматора 3.

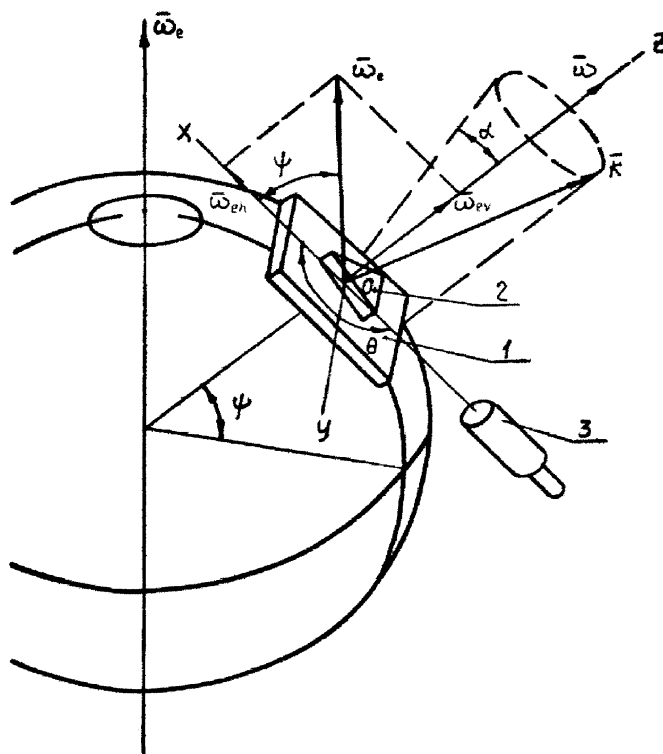


Рис. 1. Гоніометр на основі лазерного гіроскопа розташований на поверхні Землі

Вдалині від зони синхронізації, нехтуючи нелінійністю вихідної характеристики і дрейфом параметрів, в умовах впливу кутової швидкості обертання Землі $\overline{\omega_e}$ різницева частота на виході ЛГ, що обертається, буде дорівнювати:

$$f_{out}(t) = k[\omega(t)\cos\alpha(t) + \omega_{ev}\cos\alpha(t) + \omega_{eh}\sin\alpha(t)\cos(\theta(t) + \theta)], \quad (1)$$

де ω_{ev} , ω_{eh} – вертикальна і горизонтальна проекції $\overline{\omega_e}$ відповідно, тобто

$$\omega_{ev} = \omega_e \sin\psi, \quad \omega_{eh} = \omega_e \cos\psi;$$

ψ – широта місця, де робляться вимірювання;

θ , $\theta(t)$ – кути між горизонтальними проекціями вимірювальної осі \overline{K} ЛГ і $\overline{\omega_{eh}}$ на початку і у процесі вимірювання відповідно,

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt.$$

Позначивши час початку і кінця повороту на вимірюваний кут t_1 і t_φ відповідно, з урахуванням виразу (1) похибку вимірювання кутів за рахунок обертання Землі з урахуванням принципу самокалібрування можна представити у вигляді:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\int_{t_1}^{t_\varphi} [\omega(t)\cos\alpha(t) + \omega_{ev}\cos\alpha(t) + \omega_{eh}\sin\alpha(t)\cos(\theta_1(t) + \theta_1)] dt}{\int_{t_1}^{t_{2x}} [\omega(t)\cos\alpha(t) + \omega_{ev}\cos\alpha(t) + \omega_{eh}\sin\alpha(t)\cos(\theta_2(t) + \theta_2)] dt} - \varphi, \quad (2)$$

де $\theta_1(t) = \int_{t_1}^{t_\varphi} \omega(t) dt$; $\theta_2(t) = \int_{t_1}^{t_{2x}} \omega(t) dt$.

Рішення цього виразу для складних процесів $\omega(t)$ і $\alpha(t)$ може бути одержано на ЕОМ за допомогою чисельних методів. Однак для деяких окремих випадків можуть бути знайдені відносно нескладні рішення. При використанні стабілізованого привода і високоточного поворотного пристрою, а також роблячи вимірювання кутів при відліку від першої грані, одержуємо вираз для похибки вимірювання, обумовленої кутовою швидкістю Землі:

$$\Delta\varphi = A \left[\sin(\omega t_{\varphi_2} + \theta) - \sin\theta \right],$$

$$A = \frac{\text{tg}\alpha \cos\Psi}{\frac{\omega}{\omega_e} + \sin\Psi}. \quad (3)$$

На рис. 2 наведено графік похибки $\Delta\alpha$, обчисленої відповідно виразу (3) при $\alpha = 10'$, $\psi = 50^\circ 27'$, $\omega = 1,047 \text{ c}^{-1}$ для точок $\omega t_{\varphi} = 150, 300, \dots, 3600 = i \cdot 15$, де $i = 1, 2, 3, \dots, 24$. Крива 1 побудована при $\theta = 0^\circ$, криві 2, 3 – при $\theta = 90^\circ$ і $\theta = 270^\circ$ відповідно. Граничне відхилення кривих 1, 2, 3 від осі O_i визначається кутом θ і може, у залежності від азимута оптичної осі автоколіматора, мінатись у 2 рази. Таким чином, похибка за рахунок обертання Землі може мінатись, у залежності від положення приладу, в 2 рази.

З виразу (3) витікає, що зменшення похибки може бути досягнуте шляхом збільшення швидкості обертання ω ЛГ. Однак це призводить до підвищення частоти вихідного сигналу ЛГ, що, в свою чергу, тягне за собою ускладнення системи обробки інформації. Крім того, збільшення ω призводить до підвищення вібрацій поворотного пристрою (якщо воно виконане, наприклад, на підшипниках кочення), а також – до збільшення турбулентності повітряного потоку навколо контрольованого об'єкта, який обертається, що підвищує похибку вимірювання кутів.

Найбільш доцільно зменшувати похибку вимірювання шляхом регулювання кута α до значень, які прагнуть до нуля. Оптичні методи юстирування порівняно просто дозволяють встановлювати ЛГ таким чином, що його вимірювальна вісь буде суміщена з вектором $\overline{\omega}$ з похибкою, що не перевищує $1' \dots 5'$, що достатньо для одержання високої точності вимірювання кутів. Наприклад, при $\alpha = 1'$, $A = 0,0027''$; при $\alpha = 5'$, $A = 0,0013''$. Однак у випадку великих значень α похибка різко зростає. Наприклад, для $\alpha = 1^\circ$ одержимо $A = 0,16''$, що неприпустимо для прецизійних вимірювань.

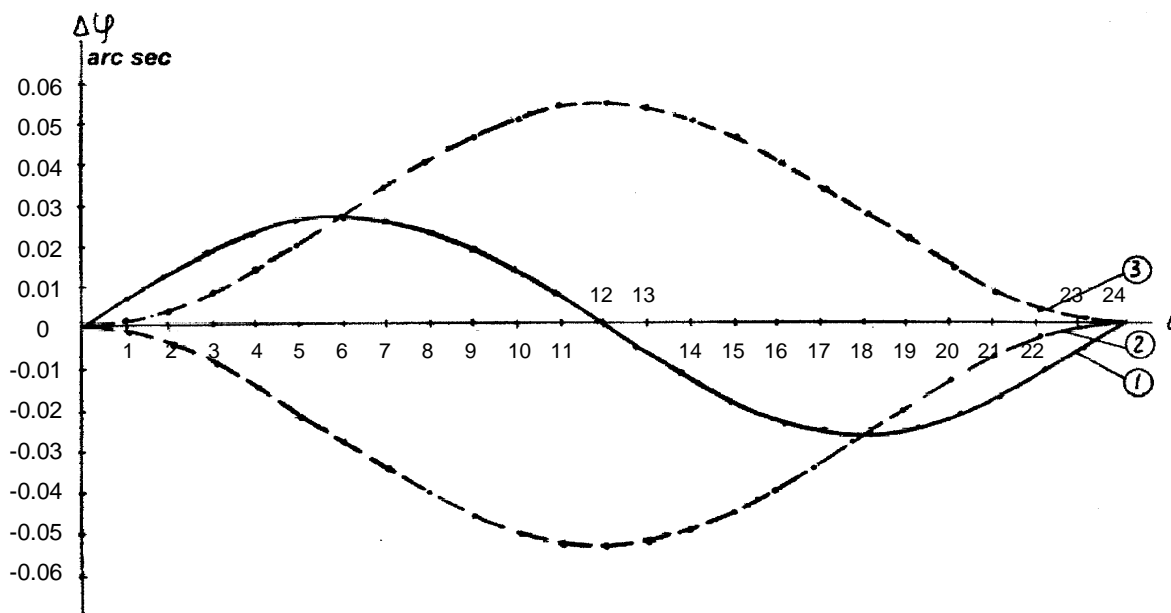


Рис. 2. Похибка вимірювання, обумовлена кутовою швидкістю обертання Землі

Визначимо похибку, зумовлену кутовою швидкістю Землі, при нерівномірності обертання поворотної платформи, що описується виразом:

$$\omega(t) = \omega_0 + bt, \quad bt_{2\pi} \ll \omega_0. \tag{4}$$

При $\alpha(t) = 0$, згідно з виразом (3), одержуємо:

$$\Delta\varphi = 2\pi \left(\frac{\varphi + \varphi_{ev}t_\varphi}{2\pi + \omega_{ev}t_{2\pi}} \right) - \varphi, \tag{5}$$

де t_φ визначають з виразу:

$$\int_0^{t_\varphi} (\omega_0 + bt)dt = \varphi, \tag{6}$$

$$t_\varphi = -\frac{\omega_0}{b} + \left[\left(\frac{\omega_0}{b} \right)^2 + \frac{2\varphi}{b} \right]^{1/2}.$$

Аналогічно, підставляючи 2π замість φ , одержуємо $t_{2\pi}$. Вираз (5) з урахуванням (6) являє собою криву, близьку до параболи з максимальним відхиленням при $\varphi = \pi$. Наприклад, при $b = 0,0174 \text{ c}^{-1}$ (10/c); $\omega_0 = 1,047 \text{ c}^{-1}$ (600/c); $\varphi = \pi$; $\omega_{ev} = 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ одержуємо $\Delta\varphi = 0,6''$. Таким чином, нестабільність кутової швидкості поворотного пристрою при дії кутової швидкості Землі може призвести до суттєвої похибки вимірювання кутів.

Точнісні характеристики комерційних лазерних гоніометрів були досліджені доктором Р.Пробстом (РТВ, Брауншвейг, Німеччина), доктором І.Мокрошом (Словацький метрологічний інститут SMU, Братислава, Словачів), а також докторами Ю.Філатовим та Д. Лук'яновим (Санкт-Петербурзький електротехнічний університет).

Міжнародні звірювання M12, проведені в рамках EUROMET з 1989 по 1991 роки, у яких брали участь 18 лабораторій з 9 країн, показали, що відхилення кутів, виміряних приладом ГС1Л (виготовленим ВО "Арсенал") і прийнятих за еталонні значення, лежать у межах від $\pm 0,02''$ до $\pm 0,09''$. Це виявилось одним з найкращих результатів.

У 1996 році були проведені міжлабораторні звірювання між лабораторіями РТВ і SMU. Лабораторія РТВ для вимірювання кутів полігонів використовувала пристрої, що містять високоточний автоколіматор і кутовий вимірювальний стіл на основі фотоелектричного датчика кутів. Лабораторія SMU використовувала прилад ГС1Л.

Різниця кутів полігонів, виміряних РТВ і SMU, лежала у межах від $\pm 0,04''$ і $\pm 0,08''$ [1].

Звірювання, проведені між РТВ і Санкт-Петербурзьким електротехнічним університетом, який використовував прилад ЕУП-1Л, показали, що різниця вимірювань не перевищувала $0,1''$ [2].

Доктор І.Мокрош з використанням приладу ГС1Л розробив і впровадив Національний еталон плоского кута Словацької республіки.

Таким чином, перші комерційні зразки кутовимірних приладів на основі ЛГ показали, що їх точність не гірше точності найкращих національних еталонів плоского кута. За оцінками докторів Д.Лук'янова та Ю.Філатова [2] точність ЛГ оцінюється величиною порядку 0,001 кут. сек.

Еталонна база більшості країн морально і технічно застаріла. Зарекомендувавши себе у якості точних та надійних приладів, кутовимірні засоби на основі ЛГ можуть бути основою для оновлення еталонної бази.

З використанням ЛГ можуть бути розроблені такі засоби вимірювань, як прилади для вимірювання показників заломлення оптичних середовищ, геодезичні та астрономічні кутовимірні прилади, прилади для контролю кутових параметрів штрихових лімбів і кодових дисків, прилади для контролю датчиків кута, системи слідкування за супутниками.

Висновки:

1. Проведене дослідження аналізу впливу кутової швидкості обертання Землі на похибку вимірювання кутів. Встановлено, що нестабільність кутової швидкості поворотного пристрою при дії кутової швидкості Землі може призвести до суттєвої похибки вимірювання кутів (0,6").

2. Встановлено, що зменшення похибки може бути досягнуте шляхом збільшення швидкості обертання ω ЛГ. Між тим, показано, що найбільш доцільно зменшувати похибку вимірювання шляхом регулювання кута α до значень, які прагнуть до нуля. При цьому складова похибки вимірювання через обертання Землі може бути зведена до мінімального значення.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Мокрош І., Пробст Р., Джаст А. "Vergleichsmessmigen an winkelnormalen zwischen dem SMU Bratislava und der РТВ Braunschweig" // РТВ-Mitteilungen 106. – 1996. – № 5. – Р. 337–343.
2. Філатов Ю.В., Лук'янов Д.П., Пробст Р. Dynamic Angle Measurement by Means of a Ring Laser // Metrologia. – 1997. – № 34. – Р. 343–351.

БЕЗВЕСІЛЬНА Олена Миколаївна – доктор технічних наук, професор кафедри приладобудування Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут".

Наукові інтереси:

- вимірні перетворювачі;
- гравіметрія;
- інформаційні системи.

Подано 03.09.2004

Безвесільна О.М. Аналіз впливу кутової швидкості обертання Землі на похибку вимірювання кутів
Безвесильная Е.Н. Анализ влияния угловой скорости вращения Земли на ошибку измерения углов
Bezvesilnaja E.N. The analysis of influence of angular velocity of the Earth gyration on error measurement of corners

УДК 531.383

Аналіз впливу кутової швидкості обертання Землі на похибку вимірювання кутів / О.М. Безвесільна

Отримано аналітичний вираз для обчислення впливу кутової швидкості обертання Землі на похибку вимірювання кутів гоніометра на основі лазерного гіроскопа; проведено аналіз впливу; надано пропозиції щодо зменшення похибок вимірювань, які виникають через вплив кутової швидкості обертання Землі.

УДК 531.383

Анализ влияния угловой скорости вращения Земли на ошибку измерения углов / Е.Н. Безвесильная

Получено аналитическое выражение для вычисления влияния угловой скорости вращения Земли на ошибку измерения углов гониометра на основе лазерного гироскопа; проведен анализ влияния; даны предложения по уменьшению погрешностей измерения, возникающих из-за влияния угловой скорости вращения Земли.

УДК 531.383

The analysis of influence of angular velocity of the Earth gyration on error measurement of corners / E.N. Bezvesilnaja

The analytical expression is obtained for calculation of influence of angular velocity of Earth gyration on error of goniometer on the basis of laser gyroscope. The analysis of influence is carried out. The sentences are given on decrease of measuring errors of angular velocity of Earth gyration.