

УДК 531.383

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА

*Гнатейко Н.В., Безвесильная Е.Н., Штефан Н.И., Гнатейко В.В., Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина*

*В работе анализируется влияние угловой скорости вращения Земли на точность измерения углов с помощью системы, где используется лазерный гироскоп. Определяется погрешность такого измерения и предполагается методика по учету этой ошибки для получения результата высокой точности*

**Ключевые слова:** точное измерение углов

### Введение

В современных системах измерения в астронавигации, геодезии, метрологии и т.п. для точного определения углов, координат объектов и скорости их перемещения в авиации и космонавтики необходимо использовать системы высокой точностью измерения угловых величин.

Существующие системы измерения углов не обладают высокой точностью, не универсальны и работают в ручном режиме, что значительно снижает производительность данной процедуры и точность результата по времени [1].

Одним из перспективных решений такой задачи является создание систем точного измерения углов с помощью использования чувствительных угловых преобразователей – лазерных гироскопов (ЛГ), что позволяет производить быстро и с высокой точностью измерения угловых координат нахождения объектов в автоматическом режиме.

Целью работы является повышение точности измерения углов с применением таких систем с учетом того, что они инерциальны и требуют учета влияния вращения Земли на точность результата, что требует нахождения метода ее компенсации.

### Определение погрешности измерения от влияния скорости вращения Земли

В последнее время все шире для точных угловых измерений используются угловые преобразователи в виде ЛГ. Применение таких практически безинерциальных систем позволяет получать безконтактное преобразование углов в точном угловом масштабе с высокой точностью и скоростью в реальном времени, что дает возможность работать в динамическом режиме при больших угловых скоростях. К тому же частотный выход сигналов ЛГ позволяет легко преобразовывать такую информацию в цифровой код и проводить ее обработку цифровыми методами на компьютерах.

Однако углоизмеряющие системы на основе ЛГ являются чувствительными к угловой скорости вращения Земли  $\omega_e$ , что снижает точность угловых измерений. В тоже время составляющая погрешность измерения от влияния  $\omega_e$  представляет собой обычно на земле систематическую, методическую погрешность, которую можно учесть и свести ее до минимума. Но в технической литературе такого глубокого анализа влияния вращения Земли на точность измерения углов с помощью ЛГ отсутствует.

Проведенный анализ такой задачи позволил исследовать эту зависимость и

определить такую погрешность  $\Delta\varphi$ . Рассмотрим схему взаимодействия Земли и ЛГ, которая показана на рис.1. Система измерения с ЛГ находится на поверхности земли в точке  $O$ . Угловая скорость вращения самого ЛГ обозначена через  $\bar{\omega}$ , вектор которой совмещен с местной вертикалью в виде оси  $OZ$ . Измеряющая ось ЛГ, обозначенная как  $\bar{K}$ , при вращении Земли отклонена от вектора угловой скорости  $\bar{\omega}$  на угол  $\alpha$ . Контролируемая угловая призма 2, на примере измерения углов которой проводится анализ, жестко связана с ЛГ. С помощью щелевого фотоэлектрического автоколлиматора 3 регистрируется в динамическом режиме отсчитываемое положение грани призмы 2 относительно измеряющей оптической оси автоколлиматора 3 – ось  $X$ .

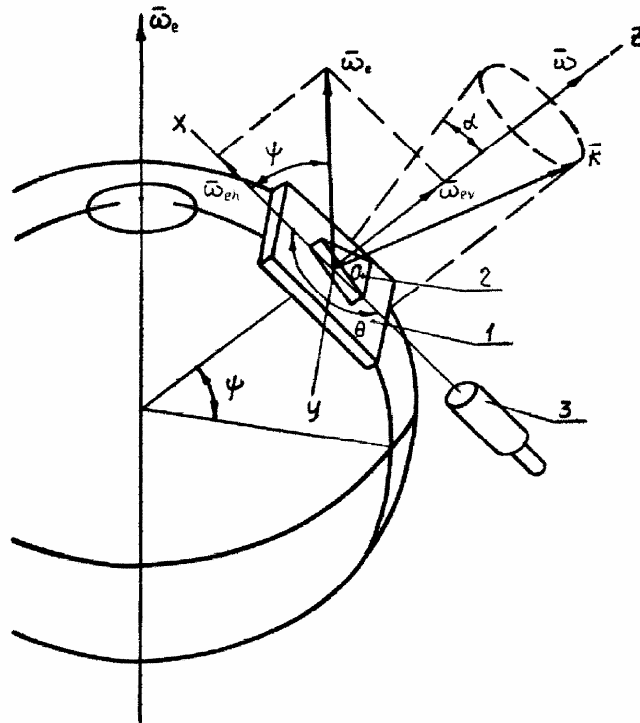


Рис. 1. Схема измерения углов с помощью лазерного гироскопа на Земле в точке  $O$

Так как измерение углов проводится ближе к средним широтам Земли, т.е. вдалеке от зоны синхронизации, пренебрегая малыми величинами нелинейности выходной характеристики ЛГ и дрейфом параметров, в условиях влияния скорости вращения Земли  $\omega_e$  переменную частоту сигнала на выходе с ЛГ можно определить зависимостью по времени  $t$ :

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

где  $\omega_{ev}, \omega_{eh}$  - вертикальная и горизонтальная проекции  $\omega_e$ , которые определяются из схемы:

$$\begin{aligned} \omega_{ev} &= \omega_e \sin \psi , \\ \omega_{eh} &= \omega_e \cos \psi , \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\psi$  - широта места, где производятся измерения углов;

$\theta, \theta(t)$  - углы между проекциями измеряющей оси  $\bar{K}$  ЛГ и  $\omega_{eh}$  в начале измерения и в процессе процедуры по  $t$ , как

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt. \quad (3)$$

Если обозначить время начала измерения  $t_1$  и конца измерения угла  $\varphi$  через  $t_\varphi$ , то с учетом (1), (2) и (3) погрешность измеренного угла  $\varphi$  за счет влияния вращения Земли, с применением принципа самокалибровки, можно определить по выражению:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\int_{t_1}^{t_\varphi} \left[ \omega(t) \cos\alpha(t) + \omega_{ev} \cos\alpha(t) + \omega_{eh} \sin\alpha(t) \cos(\theta_1(t) + \theta_1) \right] dt}{\int_{t_1}^{t_{2\pi}} \left[ \omega(t) \cos\alpha(t) + \omega_{ev} \cos\alpha(t) + \omega_{eh} \sin\alpha(t) \cos(\theta_2(t) + \theta_2) \right] dt} - \varphi, \quad (4)$$

где  $\theta_1(t) = \int_{t_1}^{t_\varphi} \omega(t) dt, \theta_2(t) = \int_{t_1}^{t_{2\pi}} \omega(t) dt.$

Нахождение погрешности измерения угла в таком сложном выражении возможно на ЭОМ с помощью числовых методов. В то же время, для отдельных случаев можно найти более упрощенное решение. Так, при наличии в измерительной системе стабилизированного электропривода поворотного устройства (также с хорошими по точности работы характеристиками) при измерении угловых координат призмы, начиная отчет с ее первой начальной грани, можно найти более простое определение погрешности измерения от влияния вращения Земли:

$$\Delta\varphi = C_\varphi \left[ \sin(\omega t_{\varphi_2} + \theta) - \sin\theta \right], \quad (5)$$

где  $C_\varphi$  - угловой коэффициент масштабного пересчета, равный

$$C_\varphi = \frac{\text{tg}\alpha \text{g}\alpha \text{c}\alpha}{\frac{\omega}{\omega_e} + \sin\Psi}. \quad (6)$$

Проведенные расчеты по (5) и (6) дали возможность наглядно показать картину функциональной зависимости между параметрами системы. На рис. 2 приведен график таких расчетов величины погрешности  $\Delta\varphi$  при  $\alpha = 10'$ , широта  $\psi = 50^\circ 27'$ ,  $\omega = 1,047 \text{ c}^{-1}$  для 24 точек временной фазы  $\omega t$  окружности через каждые  $15^\circ$ .

Кривая 1 построена при  $\theta = 0^\circ$ , кривая 2 при  $\theta = 90^\circ$ , кривая 3 при  $\theta = 270^\circ$ . Анализ результата показывает, что отклонение  $\Delta\varphi_i$  от оси абсцисс зависит от величины угла  $\theta$  и может в зависимости от азимута оптической оси автоколлиматора, изменяться почти в 2 раза.

Для уменьшения погрешности измерения угла  $\Delta\varphi$  можно на основании выражения (6) увеличить скорость вращения платформы с ЛГ – т.е.  $\bar{\omega}$ . Однако это может привести к возникновению больших динамических процессов в виде вибрации в механической цепи привода платформы системы измерения и появления разброса показаний результата измерения угла.

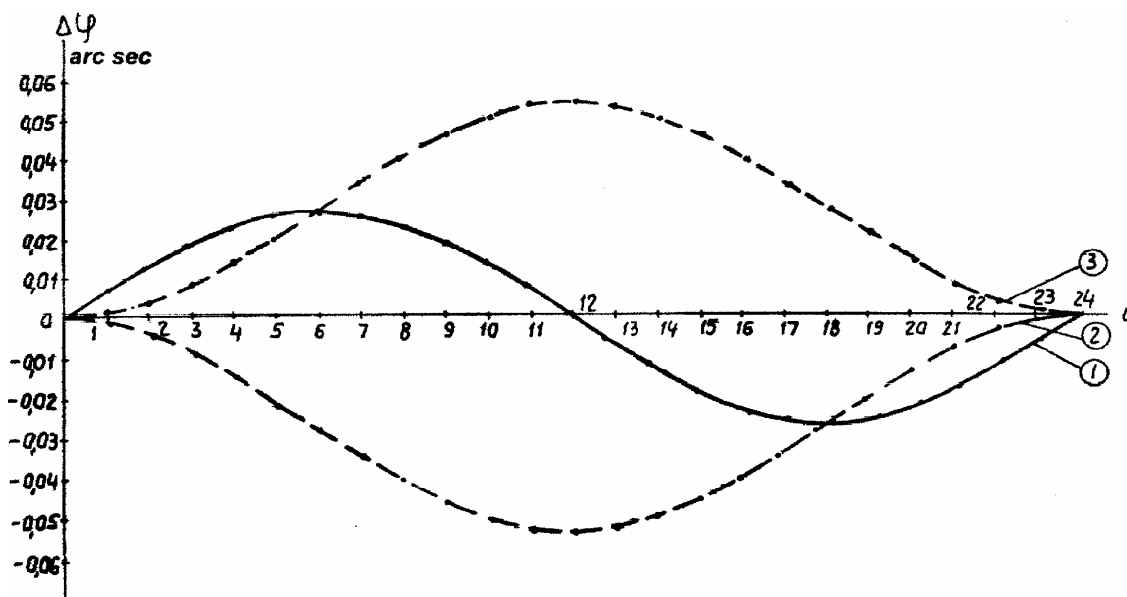


Рис. 2. Ошибки измерения углов с помощью ЛГ, обусловленные скоростью вращения Земли

Более эффективно уменьшать  $\Delta\varphi$  за счет более точной регулировки угла отклонения измерительной оси  $\overline{K}$  ЛГ от вектора его вращения с угловой скоростью  $\overline{\omega}$ , т.е. угла  $\alpha$ . Этого можно легко достигнуть с помощью применения современных методов оптического юстирования за счет более точной установки ЛГ в пространстве так, чтобы его измерительная ось совмещалась с вектором  $\overline{\omega}$  (см. рис.1). В таком случае погрешность установки ЛГ укладывается в  $3' \dots 5'$ , что вполне достаточно для высокой точности измерения углов  $\varphi$ . Это видно из примера, когда при  $\alpha = 1'$ , то коэффициент углового пересчета  $C_\varphi = 0,16''$ , а при  $\alpha = 5'$  получаем  $C_\varphi = 0,0013''$ .

Также были проведены исследования влияния скорости вращения Земли  $\overline{\omega_e}$  на точность измерения углов  $\varphi$  с помощью лазерного кольцевого преобразователя при неравномерности его углового вращения из-за вариации оборотов электродвигателя, вращающего платформу с ЛГ. Такая неравномерность вращения (как не плавность хода) платформы и ЛГ по времени поворота  $t$  описывается формулой:

$$\omega(t) = \omega_0 + (\Delta\omega)t \quad (7)$$

где  $\Delta\omega$  – вариация угловой скорости вращения ЛГ, при наличии  $(\Delta\omega)t_{2\pi} \ll \omega_0$ ;  $\omega_0$  – средняя скорость вращения.

При условии, что  $\alpha(t) = 0$  и согласно выражению (5) находим:

$$\Delta\varphi = 2\pi \left( \frac{\varphi + \varphi_{ev} t_\varphi}{2\pi + \omega_{ev} t_{2\pi}} \right) - \varphi, \quad (8)$$

где  $t_\varphi$  определяется из соотношения:

$$\int_0^{t_\varphi} (\omega_0 + (\Delta\omega)t) dt = \varphi, \quad (9)$$

Тогда на основании преобразований (7), (8) и (9) находим:

$$t_{\varphi} = -\frac{\omega_0}{\Delta\omega} + \left[ \left( \frac{\omega_0}{\Delta\omega} \right)^2 + \frac{2\varphi}{\Delta\omega} \right]^{1/2}. \quad (10)$$

Подставляя  $2\pi$  вместо  $\varphi$  и определяется  $t_{2\pi}$ . Согласно полученным зависимостям (8) и (10) можно сделать вывод, что такая зависимость описывает кривую, близкую к параболе с максимальным отклонением при  $\varphi = \pi$ . Так, например, при  $\Delta\omega = 0,0174 \text{ с}^{-1}$  ( $1^0/\text{с}$ ) и при  $\omega_0 = 1,047 \text{ с}^{-1}$  ( $60^0/\text{с}$ ), при  $\varphi = \pi\omega_{ev} = 5,6 \cdot 10^{-5}$ , получаем, что  $\Delta\varphi = 0,6''$ . Таким образом видно, что нестабильность угловой вращения ЛГ при воздействии скорости вращения Земли приводит к существенным погрешностям измерения углов.

### Выводы

Установлено, что на такую систему измерения углов с ЛГ влияют такие параметры автоматического измерения углов, как угловая скорость вращения Земли, неточность настройки измеряющей оси ЛГ по отношению его вектора вращения и нестабильность вращения ЛГ на платформе из-за не плавности хода электропривода этой платформы, что приводит к значительным погрешностям измерений углов.

Разработана методика устранения таких погрешностей, что позволяет такую систему автоматического измерения углов с помощью ЛГ сделать метрологически точной и повысить качество навигационного оборудования.

Для дальнейшего усовершенствования систем измерения углов автоматически с помощью вращающегося ЛГ будут проведены исследования по влиянию скорости его вращения на точность работы системы и установить наиболее оптимальные ее режимы и разработать устройство точной установки оси ЛГ в устройстве.

### Література

1. Безвесільна О.М. Елементи і пристрої автоматики та систем управління. Перетворюючі пристрої приладів та комп'ютерних систем: Підручник. - Житомир: ЖДТУ, 2008. - 700 с.
2. Безвесільна О.М., Гнатейко Н.В. Автоматична система високоточного вимірювання кутів в динаміці // Механіка гіроскопічних систем. - 2009. - №20. - С.78–81.
3. Пролетко В.И., Иносов В.Л. Анализ погрешностей измерения плоского угла в интервале времени // Измерительная техника. - 1974. - №1. - С.11-14.

Безвесільна О.М., Гнатейко Н.В., Штефан Н.И., Гнатейко В.В. **Вплив кутової швидкості обертання Землі на точність вимірювання кутів за допомогою лазерного гіроскопа**  
В роботі аналізується вплив кутової швидкості обертання Землі на точність вимірювання кутів у динаміці руху об'єктів спостереження за допомогою звичайних оптичних пристроїв з використанням лазерних гіроскопів в якості чутливих елементів процесу виміру.  
**Ключові слова:** точне вимірювання кутів

Bezvesilna O.M., Gnateyko N.V., Shtefan N.I., Gnateyko V.V. **The influence of earth's rotation rate on the accuracy of angle measuring with a laser gyroscope**  
The paper analyzes the influence of Earth's angular velocity on the accuracy of angle measuring in the dynamics of objects in motion tracking with conventional optical devices using laser gyroscopes as sensitive elements of the measurement process.  
**Keywords:** highly accurate angle measurement

Надійшло до редакції  
2 квітня 2010 року