

О ПОВЫШЕНИИ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ОДНОГО ИЗ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Е. Н. БЕЗВЕСИЛЬНАЯ

Киевский политехнический институт

Поступило 1 декабря 1987 г.

Представлено проф. д-р. Петрик

Abstract

The method, presented by the paper, is used for the improvement of the navigational measurement accuracy of latitude. The methodological and performance error sources are carefully analysed by the author. Finally it is proposed a special arrangement of giros and an efficient measurement procedure.

Прибор для измерения широты входит в авиационную гравиметрическую систему и предназначен для определения широты местоположения летательного аппарата, производящего гравиметрическую съемку.

Известные гироскопические приборы для измерения широты, называемые гироскопами Фуко 2-го рода или гироскопами, а также гироскопические маятники [3] на практике используются мало вследствие значительных инструментальных погрешностей этих приборов, вызванных в основном моментом дебаланса подвижной системы прибора. Кроме того, перекрестные угловые и линейные ускорения могут привести к существенным методическим погрешностям этих приборов. Трудно также с необходимой точностью удерживать ось гироскопа в плоскости меридиана. Применение упомянутых приборов требует использования точной стабилизированной платформы, ориентированной относительно плоскости горизонта, что представляет собой сложную техническую задачу.

Целью настоящей работы является рассмотреть прибор, обеспечивающий повышение точности измерений широты за счет устранения методических погрешностей, вызванных перекрестными угловыми и линейными ускорениями, устранения инструментальных погрешностей из-за дебаланса подвижной системы; повышение достоверности измерений за счет создания возможности измерять два независимых значения угла географической широты; повышение точности выставки за счет исключения необходимости использования гироскопической платформы.

Указанная цель достигается путем применения двух одинаковых и одина-

ково ориентированных трехстепенных гироскопов, помещенных во внутренние и наружные рамки. Центры тяжести двух гироскопов одинаково смещены в одном и том же направлении вдоль осей вращения роторов гироскопов, расположенных перпендикулярно плоскости географического меридиана, относительно осей наружных рамок. Оси наружных рамок кардановых подвесов гиromаятников направлены по линии отвеса. Гироскопы снабжены двумя электрическими датчиками угла, а также двумя электрическими датчиками момента, образующими две системы коррекции. Выходы двух электрических датчиков угла, закрепленных на осях внутренних рамок двух гироскопов, соединены с двумя электрическими датчиками момента, размещенными на осях наружных рамок двух гироскопов. Выходы двух дополнительных электрических датчиков угла, расположенных на осях наружных рамок двух гироскопов, соединены с обмотками управления двух дополнительных электрических датчиков момента, размещенных на осях внутренних рамок двух гироскопов. Заданная ориентация главных осей двух одинаковых гироскопов в направлении, перпендикулярном плоскости меридиана, в которой лежат наружные рамки, осуществляется с помощью сигналов, используемых в упомянутых системах коррекции, от гировертикали (ГВ) и гирокомаса (ГК) (см. рис. 1). Векторы кинетических моментов двух трехстепенных гироскопов противоположно направлены. Фор-

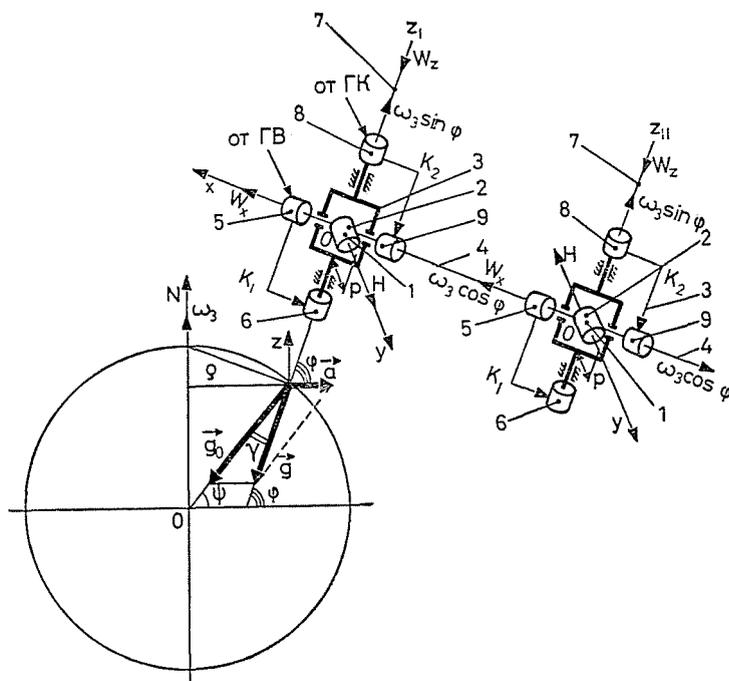


Рис. 1

мируются сигналы, пропорциональные разности углов поворота двух гироскопов.

На рис. 1 изображена принципиальная схема предлагаемого гироскопического прибора для измерения географической широты местоположения объекта. Гироскопический прибор имеет в качестве чувствительного элемента два одинаковых трехстепенных гироскопа 1 с противоположными направлениями кинетических моментов гироскопов, помещенных во внутренние 2 и наружные 3 рамки таким образом, что центры тяжести гироскопов равно смещены в одном направлении вдоль осей вращения роторов 1 гироскопов. Оси вращения роторов расположены перпендикулярно плоскости географического меридиана относительно осей 7 наружных рамок. На осях 4 внутренних рамок расположены два одинаковых электрических датчика угла (ДУ) 5, выходы которых соединены с обмотками управления двух одинаковых электрических датчиков момента (ДМ) 6, расположенных на осях наружных рамок. На осях наружных рамок расположены два одинаковых дополнительных электрических датчика угла 8, выходы которых соединены с обмотками управления двух одинаковых дополнительных электрических датчиков момента 9, расположенных на осях внутренних рамок.

Гироскопический прибор для измерения широты работает следующим образом. При наличии составляющей w_x линейного ускорения вдоль осей 4 внутренних рамок гироскопов, последние начнут поворачиваться вокруг осей 4 под действием маятникового момента $mw_x l$, направленного по осям 7 наружных рамок. Повороты происходят в противоположных направлениях, так как вектора кинетических моментов двух гироскопов противоположно направлены. Повороты гироскопов под действием этого момента приводят к появлению электрических сигналов с двух одинаковых датчиков угла 5, выходы которых соединены с обмотками управления двух одинаковых датчиков момента 6. Датчики момента создадут моменты, компенсирующие маятниковые моменты $mw_x l$ по осям 7 наружных рамок.

Под действием маятникового момента $mw_z l$, вызванного составляющей линейного ускорения w_z вдоль осей 7 наружных рамок и направленного вдоль осей 4 внутренних рамок, два трехстепенных гироскопа начнут поворачиваться вокруг осей 7. Поворот двух гироскопов под действием момента $mw_z l$ приводит к появлению электрических сигналов с двух одинаковых датчиков угла 8, выходы которых соединены с обмотками управления двух одинаковых датчиков момента 9. Датчики момента создадут моменты, компенсирующие маятниковые моменты $mw_z l$, действующие по осям 4 внутренних рамок.

Для обеспечения заданной ориентации осей гироскопов (или выставки их) в направлении, перпендикулярном плоскости меридиана, в которой лежат наружные рамки, в упомянутых системах коррекции гироскопов (ДУ 5—ДМ 6, ДУ 8—ДМ 9) используются сигналы от гировертикали и гирокомпаса, соответственно.

Для пояснения принципа работы предлагаемого гироскопа приведем следующую систему уравнений, описывающих движение одного из гироскопов этого двухгироскопного прибора [1; 2; 3, стр. 256]:

$$\begin{aligned} H(\dot{\beta} + \omega_3 \cos \varphi) + K_1 \beta + n_1 \alpha &= m w_x l; \\ H(\dot{\alpha} + \omega_3 \sin \varphi) + K_2 \alpha + n_2 \beta &= m w_z l, \end{aligned} \quad (1)$$

где α, β — углы поворота гироскопа вокруг осей наружной и внутренней рамок, соответственно;

H — кинетический момент гироскопа;

K_1, K_2 — коэффициенты, равные произведению передаточных коэффициентов соответствующих датчика угла и датчика момента каналов коррекции;

n_1, n_2 — коэффициенты сил вязкого трения относительно соответствующих осей;

m — масса подвижной части гироскопа;

l — смещение центра масс гироскопа относительно точки пересечения осей карданова подвеса;

w_z, w_x — вертикальная и горизонтальная составляющие линейного ускорения, действующего на гироскоп;

ω_3 — угловая скорость суточного вращения Земли.

Установившиеся значения углов α_1, β_1 поворота рамок карданова подвеса первого гироскопа найдем из уравнений (1):

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{m l w_z}{K_2} - \frac{H \omega_3 \sin \varphi}{K_2}, \\ \beta_1 &= \frac{m l w_x}{K_1} - \frac{H \omega_3 \cos \varphi}{K_1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Аналогично для второго гироскопа (с противоположным направлением кинетического момента):

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \frac{m l w_z}{K_2} + \frac{H \omega_3 \sin \varphi}{K_2}, \\ \beta_2 &= \frac{m l w_x}{K_1} + \frac{H \omega_3 \cos \varphi}{K_1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Если сформировать сигналы, пропорциональные разности статических углов поворота двух одинаковых гироскопов, то есть

$$\begin{aligned} U_1 &= \alpha_1 - \alpha_2 = -\frac{2H \omega_3}{K_2} \sin \varphi, \\ U_2 &= \beta_1 - \beta_2 = -\frac{2H \omega_3}{K_1} \cos \varphi \end{aligned} \quad (4)$$

тогда из них можно определить географическую широту местоположения самолета по формулам

$$|\varphi| = \arcsin \frac{K_2 U_1}{2H \omega_3},$$

$$|\varphi| = \arcsin \frac{K_1 U_2}{2H \omega_3}. \quad (5)$$

Формирование выходных сигналов U_1 и U_2 , пропорциональных разности статических углов поворота двух одинаковых гироскопов, может быть осуществлено двумя путями: либо использованием двух одинаковых гироскопов с противоположно направленными векторами кинетических моментов, либо использованием одного гироскопа с реверсированием кинетического момента и применением запоминающих устройств. В обоих случаях создаются два канала прохождения сигналов. По двум значениям широты в уравнениях (5) осреднением получают географическую широту, а наличие избыточной информации существенно снижает ошибки измерения, обусловленные методическими и инструментальными погрешностями.

В приведенной выше записи уравнений движения (1) ряд моментов-помех опущен, так как в работе [1] показано, что величины погрешностей, обусловленных действием этих моментов-помех, малы и учитывать следует, в основном, действие наиболее существенных моментов $m\omega_x l$, $m\omega_z l$.

Тем не менее, в ряде случаев перекрестные угловые и линейные ускорения, момент остаточного дебаланса и др., возможно, вызовут нежелательные погрешности прибора.

Покажем, что предлагаемый двухгироскопный прибор позволяет добиться практически полного исключения влияния на работу прибора моментов-помех от перекрестных угловых и линейных ускорений (то есть покажем, что прибор устраняет методические динамические погрешности). Покажем также, что прибор устраняет некоторые инструментальные погрешности, вызванные например дебалансом подвижной части прибора.

Для этого запишем прецессионные уравнения движения одного из гироскопов прибора с учетом всех моментов-помех [1]

$$H\dot{\beta} + K_1 \beta + n_1 \dot{\alpha} = m w_x l - H(\omega_x + \omega_y \alpha) - A \dot{\omega}_z + M_{Д1} - H \omega_3 \cos \varphi, \quad (6)$$

$$H\dot{\alpha} + K_2 \alpha + n_2 \beta = m w_z l - m l g - m l (w_x \alpha - w_y) \beta - B(\dot{\omega}_x + \dot{\omega}_y \alpha) - H \omega_y \beta + M_{Д2} - H \omega_3 \sin \varphi,$$

где w_x , w_y , w_z — проекции ускорения поступательного движения летательного аппарата на оси ox , oy , oz опорной системы координат $oxuz$, связанной с летательным аппаратом (ее начало „о“ совпадает с центром масс подвижной части прибора; ось ox направлена параллельно продольной оси объекта, ось oy — параллельно поперечной оси; ось oz — параллельно нормальной оси);

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ — проекции угловой скорости объекта на соответствующие оси; A — приведенный к оси вращения наружной рамки момент инерции системы «гироскоп в кардановом подвесе»; B — момент инерции «ротор и внутренняя рамка гироскопа».

Обозначав возмущающие моменты помех относительно осей подвеса рамок гироскопа

$$M_1 = mw_x l - H(\omega_x + \omega_y \alpha) - A\dot{\omega}_z + M_{Д1}, \quad (7)$$

$$M_2 = mw_z l - mlg - ml(w_x \alpha - w_y \beta) - B(\dot{\omega}_x + \dot{\omega}_y \alpha) - H\omega_y \beta + M_{Д2},$$

перепишем уравнения (6) в виде

$$\begin{aligned} H\dot{\beta} + K_1 \beta + n_1 \dot{\alpha} &= M_1 - H\omega_3 \cos \varphi, \\ H\dot{\alpha} + K_2 \alpha + n_2 \beta &= M_2 - H\omega_3 \sin \varphi. \end{aligned} \quad (8)$$

Решим уравнения (8) относительно α и β . Для этого уравнения (8) представим в виде

$$\begin{aligned} n_1 p \alpha + (Hp + K_1) \beta &= M_1 - H\omega_3 \cos \varphi; \\ (Hp + K_1) \alpha + n_2 p \beta &= M_2 - H\omega_3 \sin \varphi, \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$p = \frac{d}{dt}.$$

Найдем определитель системы уравнений (9)

$$\Delta = \begin{vmatrix} n_1 p & Hp + K_1 \\ Hp + K_2 & n_2 p \end{vmatrix} = n_1 n_2 p^2 - (Hp + K_1)(Hp + K_2).$$

Запишем определители по α и β :

$$\Delta_\alpha = \begin{vmatrix} M_1 - H\omega_3 \cos \varphi & Hp + K_1 \\ M_2 - H\omega_3 \sin \varphi & n_2 p \end{vmatrix} = n_2 p (M_1 - H\omega_3 \cos \varphi) - (Hp + K_1)(M_2 - H\omega_3 \sin \varphi),$$

$$\Delta_\beta = \begin{vmatrix} n_1 p & M_1 - H\omega_3 \cos \varphi \\ Hp + K_2 & M_2 - H\omega_3 \sin \varphi \end{vmatrix} = n_1 p (M_2 - H\omega_3 \sin \varphi) - (Hp + K_2)(M_1 - H\omega_3 \cos \varphi).$$

Найдем решения уравнений (6)

$$\begin{aligned} \alpha(p) &= \frac{n_2 p (M_1 - H\omega_3 \cos \varphi) - (Hp + K_1)(M_2 - H\omega_3 \sin \varphi)}{n_1 n_2 p^2 - (Hp + K_1)(Hp + K_2)}, \\ \beta(p) &= \frac{n_1 p (M_2 - H\omega_3 \sin \varphi) - (Hp + K_2)(M_1 - H\omega_3 \cos \varphi)}{n_1 n_2 p^2 - (Hp + K_1)(Hp + K_2)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Запишем выражения установившихся значений углов $\alpha_{уст}$, $\beta_{уст}$ поворота одного

из гироскопов прибора, воспользовавшись (10)

$$\alpha_{\text{уст}} = \frac{-K_1(M_2 - H\omega_3 \sin \varphi)}{-K_1 K_2} = \frac{-H\omega_3 \sin \varphi + mw_z l - mlg - ml(w_x \alpha - w_y) \beta - B(\dot{\omega}_x + \dot{\omega}_y \alpha) - H\omega_y \beta + M_{\text{Д2}}}{K_2}, \quad (11)$$

$$\beta_{\text{уст}} = \frac{-K_2(M_1 - H\omega_3 \cos \varphi)}{-K_1 K_2} = \frac{-H\omega_3 \cos \varphi + mw_x l - H(\omega_x + \omega_y \alpha) - A\dot{\omega}_z + M_{\text{Д1}}}{K_1}. \quad (12)$$

Сформируем сигналы, пропорциональные разности углов поворота двух гироскопов. Для этого напишем формулы сигналов двух гироскопов:

$$\alpha_{1\text{уст}} = K_2^{-1}[-H\omega_3 \sin \varphi + mw_z l - mlg - ml(w_x \alpha - w_y) \beta - B(\dot{\omega}_x + \dot{\omega}_y \alpha) - H\omega_y \beta + M_{\text{Д2}}],$$

$$\alpha_{2\text{уст}} = K_2^{-1}[H\omega_3 \sin \varphi + mw_z l - mlg - ml(w_x \alpha - w_y) \beta - B(\dot{\omega}_x + \dot{\omega}_y \alpha) + H\omega_y \beta + M_{\text{Д2}}]$$

и

$$\beta_{1\text{уст}} = K_1^{-1}[-H\omega_3 \cos \varphi + mw_x l - H(\omega_x + \omega_y \alpha) - A\dot{\omega}_z + M_{\text{Д1}}],$$

$$\beta_{2\text{уст}} = K_1^{-1}[H\omega_3 \cos \varphi + mw_x l + H(\omega_x + \omega_y \alpha) - A\dot{\omega}_z + M_{\text{Д1}}]. \quad (14)$$

Получим значение двух выходных сигналов прибора для измерения широты, найдя разность величин $U_1 = \alpha_{1\text{уст}} - \alpha_{2\text{уст}}$ и $U_2 = \beta_{1\text{уст}} - \beta_{2\text{уст}}$:

$$U_1 = \alpha_{1\text{уст}} - \alpha_{2\text{уст}} = K_2^{-1}(-2H\omega_3 \sin \varphi - 2H\omega_y \beta), \quad (15)$$

$$U_2 = \beta_{1\text{уст}} - \beta_{2\text{уст}} = K_1^{-1}[-2H\omega_3 \cos \varphi - 2H(\omega_x + \omega_y \alpha)]. \quad (16)$$

Значит в работе [1] показано, что погрешности, обусловленные влиянием угловых скоростей, входящих в выражения (15), (16) чрезвычайно малы ($\approx 1,7 \cdot 10^{-8}$ рад.), так что ими можно пренебречь.

В выражениях (15), (16) выходных сигналов прибора для измерения широты полностью отсутствуют моменты от перекрестных угловых и линейных ускорений, а также — от дебаланса.

Покажем, что каждый из двух гироскопов прибора может измерять две составляющие абсолютного ускорения, что может быть использовано для ориентировки каждого из гироскопов и избавляет от необходимости использования высокоточной стабилизированной платформы для выставки двух одинаковых гироскопов прибора для измерения широты.

Приведем уравнения (2) выходных сигналов одного из гироскопов

$$\alpha_1 = \frac{mlw_z}{K_2} - \frac{H\omega_3 \sin \varphi}{K_2},$$

$$\beta_1 = \frac{mlw_x}{K_1} - \frac{H\omega_3 \cos \varphi}{K_1}.$$

Для второго гироскопа рассматриваемого прибора уравнения (3) для выходных сигналов α_2, β_2 будут аналогичными.

Из приведенных выражений видно, что каждый из гироскопов может измерять две составляющие абсолютного ускорения \vec{w}_z и \vec{w}_x . То есть каждый гироскоп может измерять результирующий вектор абсолютного ускорения

$$\vec{w} = \vec{w}_z + \vec{w}_x,$$

что обеспечивает большую точность выставки каждого из двух гироскопов и избавляет от необходимости использования высокоточной стабилизированной платформы. При этом перпендикулярность осей чувствительности каждого из гироскопов к оси вращения все время поддерживается автоматически благодаря применению двух систем коррекции. Смещения центров тяжести у каждого из гироскопов необходимы, так как благодаря им каждый из гироскопов измеряет полный вектор абсолютного ускорения, что может быть использовано для ориентировки каждого из гироскопов.

Покажем, что возможность измерения двух независимых значений угла широты по формулам (5) позволяет повысить достоверность результатов.

Обозначим значения широты, измеренные первым и вторым путем прибором для измерения широты через φ_1, φ_2 соответственно:

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \varphi + \Delta_1; \\ \varphi_2 &= \varphi + \Delta_2,\end{aligned}\tag{17}$$

где φ — истинное значение широты,

Δ_1, Δ_2 — абсолютные погрешности измерения широты в первом и втором случаях соответственно.

Тогда среднее значение абсолютной погрешности измерения угла широты, равное среднему арифметическому для двух измерений, будет

$$\Delta = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2}.\tag{18}$$

А в случае n измерений при $n \rightarrow \infty$ погрешность измерения Δ было бы стремиться к нулю

$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} \rightarrow 0.\tag{19}$$

Из выражения (19) видно, что чем больше количество измерений, тем меньше погрешность измерений угла широты. Более строгое обоснование этого же положения можно найти, например, в [4, стр. 290—292].

Следовательно, обосновано, что возможность измерения двух независимых значения угла широты с помощью рассматриваемого прибора позволяет повысить достоверность результатов.

Таким образом, выше показано, что у предлагаемого гироскопического прибора для измерения широты одинаковые смещения в одном и том же направлении центров тяжести двух одинаковых трехстепенных гироскопов вдоль осей вращения роторов относительно осей наружных рамок и расположение на осях наружных рамок двух дополнительных датчиков угла (выходы которых соединены с обмотками управления двух дополнительных датчиков момента, расположенных на осях внутренних рамок прибора) — позволяет получить следующие положительные эффекты. Дают возможность

- повысить точность выставки за счет исключения необходимости использования гиростабилизированной платформы (так как каждый из двух гироскопов прибора меряет две составляющие абсолютного ускорения, что может быть использовано для ориентировки каждого из них)
- повысить достоверность измерений (так как позволяют определить два независимых значения широты)
- повысить точность измерений за счет устранения методических погрешностей (вызванных перекрестными угловыми и линейными ускорениями) и за счет устранения инструментальных погрешностей (из-за дебаланса подвижной системы).

Резюме

Описан прибор, позволяющий значительно повысить точность измерений географической широты за счет устранения ряда методических и инструментальных погрешностей.

Литература

1. Безвесильная, Е. Н.: Оценка точностных характеристик измерителя линейных ускорений. Брошюра общества «Знание» УССР, Киев, 1979, 22с.
2. Безвесильная Е. Н.: Об исследовании маятникового акселерометра с помощью ЭВМ ЕС-1020. Брошюра, издательство Института Физики АН УССР, Киев, 1981, 22с.
3. Ривкин, С. С.: Теория гироскопических устройств. Судостроение. Л., 1964, Т. 2, 547 с.
4. Вентцель, Е. С.: Теория вероятностей. Наука. М., 1964, 623 с.

Безвесильная Елена Николаевна Киевский политехнический институт СССР
252056 Киев—56 Брест—Лировский проспект 39