

В.В. Мелешко, А.В. Нужный

## ФИЗИЧЕСКОЕ ГИРОКОМПАСИРОВАНИЕ ПО ДАТЧИКУ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

### Вступление

Инерциальные навигационные системы (ИНС) являются основой навигационных комплексов современных подвижных объектов. Для нормального функционирования ИНС необходимо как можно точнее выполнить начальную выставку ИНС, которая включает физическую или аналитическую выставку чувствительных элементов в азимуте, т.е. гироскопирование. Чувствительными элементами ИНС зачастую являются датчики угловой скорости (ДУС). Это могут быть лазерные гироскопы, волоконно-оптические гироскопы, динамически настраиваемые гироскопы и др.

Выходной сигнал ДУСа можно использовать как для начальной выставки ИНС [3], [4], так и в отдельном курсоуказывающем устройстве [6],[7].

В статье рассматривается физическое гироскопирование по выходному сигналу ДУС, его отличие и преимущества в сравнении с гироскопированием по сигналу акселерометра [1].

### Постановка задачи

Рассмотрим принцип использования выходного сигнала датчика угловой скорости для осуществления физического гироскопирования гироскопированной платформы.

Начальная выставка производится на неподвижном основании, после горизонтирования платформы. Предполагая, что гироскопы достаточно точно определяют скорость вращения Земли, ориентирование платформы производится до тех пор, пока сигнал ДУС о составляющей угловой скорости вращения Земли  $\omega_{\xi_0}$  не станет равным нулю [2], [5]. На рис.1.  $\eta_0, \xi_0$ -оси, связанные с платформой,  $\eta, \xi$  - оси географической системы координат в плоскости горизонта,  $\omega_\eta$  - горизонтальная составляющая угловой скорости Земли,  $\omega_{\xi_0}$ ,

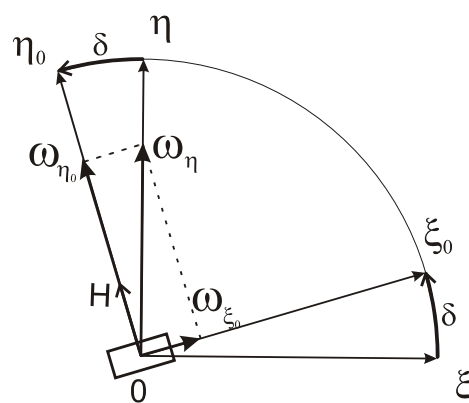


Рис.1. К принципу гироскопирования

$\omega_{\eta 0}$  - проекции  $\omega_{\eta}$  на оси платформы,  $\delta$  - отклонение платформы от направления на север. При  $\delta = 0$  проекция  $\omega_{\xi 0}$  обращается в нуль. Платформа поворачивается (гироскомпасируется) до тех пор, пока это не произойдет. Исследуем этот процесс.

### Схема и математическая модель гироскомпасирования

На рис.2. показана схема гироскомпасирования по выходному сигналу ДУС. Здесь А – акселерометр, ДУ – датчик угла первого гироскопа, ДМ1 – датчик момента первого гироскопа, ДМ2 – датчик момента второго гироскопа,  $k_3$  - коэффициент передачи азимутального канала,  $k_2$  - коэффициент передачи горизонтального канала. Другие элементы стабилизатора не показаны.

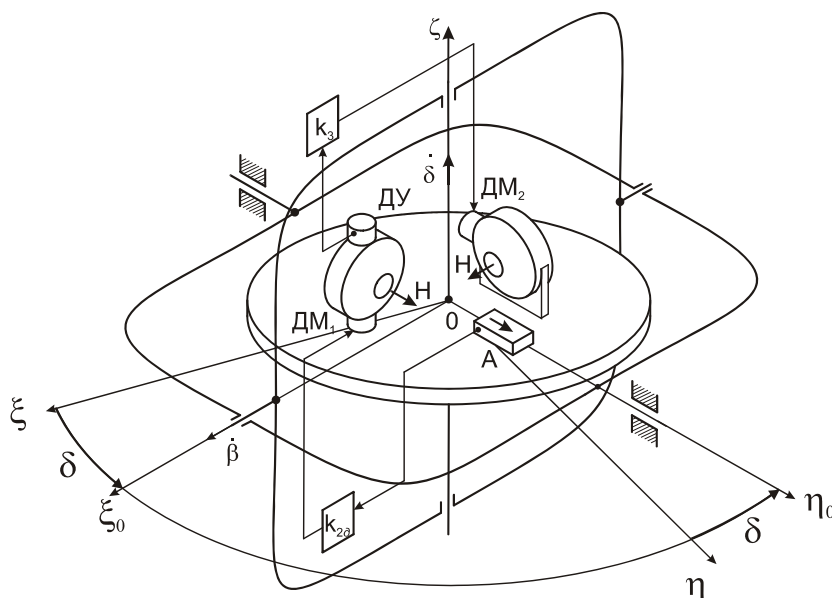


Рис. 2. Схема физического гироскомпасирования по ДУС

Составим уравнения движения платформы в режиме гироскомпасирования. Для описания процесса используется кинематика поворотов рис.3., где  $\xi \eta \zeta$  - географическая сопровождающая система координат, ось  $\xi$  направлена на восток, ось  $\eta$  на север, ось  $\zeta$  – по вертикали,  $XYZ$  – система координат, связанная с платформой,  $Y$  – направлена по продольной оси платформы.  $\alpha$  и  $\beta$  – углы отклонения платформы от горизонта.

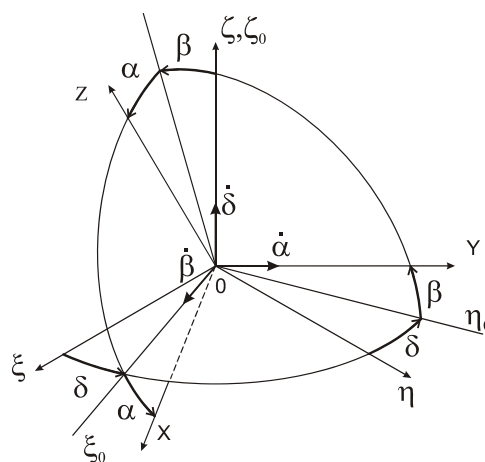


Рис.3. Кинематика поворотов

Уравнения прецессионного движения в виде проекций угловых скоростей запишем в виде

$$\begin{aligned}\dot{\beta} - \dot{\delta}\alpha &= \omega_x^k + \omega_{\partial x} - \omega_\xi - \omega_\eta\delta + \omega_\zeta\alpha, \\ \dot{\alpha} + \dot{\delta}\beta &= \omega_y^k + \omega_{\partial y} + \omega_\xi\delta - \omega_\eta - \omega_\zeta\beta, \\ \dot{\delta} - \dot{\beta}\alpha &= \omega_z^k + \omega_{\partial z} - \omega_\xi\alpha + \omega_\eta\beta - \omega_\zeta;\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь скорости коррекции -  $\omega_x^k = \pm k_2(\beta + \varepsilon)$  по акселерометру  $\omega_z^k = \pm k_3(\omega_{\partial x} - \omega_{\eta 0}\delta)$  - по ДУС,  $\varepsilon = \delta a / g$  - ошибка горизонтирования, определяемая погрешностью акселерометра.

Учитывая, что на неподвижном основании  $\omega_\xi = 0$ , углы  $\alpha, \beta \ll \delta$ , получим:

$$\begin{aligned}\dot{\beta} &= \pm k_2(\beta + \varepsilon) + \omega_{\partial x} - \omega_\eta\delta, \\ \dot{\alpha} &= \omega_y^k + \omega_{\partial y} - \omega_\eta, \\ \dot{\delta} &= \pm k_3(\omega_{\partial x} - \omega_{\eta 0}\delta) + \omega_{\partial z} - \omega_\zeta.\end{aligned}\quad (2)$$

Второе уравнение системы (2) не зависит от  $\beta$  и  $\delta$ , оно описывает горизонтирование по  $\alpha$ . Систему образуют уравнения

$$\begin{aligned}\dot{\beta} &= -k_2(\beta + \varepsilon) + \omega_{\partial x} - \omega_\eta\delta, \\ \dot{\delta} &= k_3(\omega_{\partial x} - \omega_{\eta 0}\delta) + \omega_{\partial z} - \omega_\zeta.\end{aligned}\quad (3)$$

Решение системы имеет вид:

$$\begin{aligned}\beta^\partial &= \frac{-\omega_\eta(\delta_0 - \delta_{\text{уст}}^\partial)}{-k_3\omega_\eta + k_{2\partial}} e^{-k_3\omega_\eta t} - \frac{\omega_\eta(\delta_0 - \delta_{\text{уст}}^\partial) + (\beta_0 - \beta_{\text{уст}}^\partial)(-k_3\omega_\eta + k_{2\partial})}{\omega_\eta(-k_3\omega_\eta + k_{2\partial})} e^{-k_3\omega_\eta t} + \beta_{\text{уст}}^\partial; \\ \delta^\partial &= (\delta_0 - \delta_{\text{уст}}^\partial) e^{-k_3\omega_\eta t} + \delta_{\text{уст}}^\partial.\end{aligned}\quad (4)$$

Здесь установившиеся значения имеют вид:

$$\begin{aligned}\beta_{\text{уст}}^\partial &= \frac{-k_3\omega_\eta(k_{2\partial} - \omega_{\partial x}) + \omega_\eta(\omega_\zeta - \omega_{\partial z})}{k_{2\partial}k_3\omega_\eta}, \\ \delta_{\text{уст}}^\partial &= \frac{1}{\omega_\eta} \left( \frac{\omega_{\partial z} - \omega_\zeta}{k_3} \right) + \frac{\omega_{\partial x}}{\omega_\eta}.\end{aligned}\quad (5)$$

Для сравнения, установившиеся значения при гироскопировании по сигналу акселерометра имеют вид [2]:

$$\beta^a_{ycm} = \frac{-(\omega_{\partial z} - \omega_{\zeta})}{k_1}, \quad (6)$$

$$\delta^a_{ycm} = \frac{k_{2a}}{k_1 \omega_{\eta}} (\omega_{\partial z} - \omega_{\zeta}) + \frac{\omega_{\partial x}}{\omega_{\eta}}.$$

Сравнение показывает, что при компасировании по ДУС на точность влияет только коэффициент передачи азимутального канала  $k_3$  в отличие от гироскомпасирования по акселерометру, когда на точность влияют 2 коэффициента передачи  $k_1$  и  $k_{2a}$ . Как известно [1], уменьшение  $k_{2a}$  ведет к увеличению времени выставки, при увеличении  $k_{2a}$  увеличивается установившаяся ошибка, т.е. существует противоречие между точностью и длительностью выставки. В схеме гироскомпасирования по ДУС такого противоречия нет.

### Моделирование процесса гироскомпасирования

Моделирование процесса происходит при условии малости углов отклонения:  $\delta_0 = 5^\circ$ ,  $\alpha_0 = \beta_0 = 0,01^\circ$ , скорость коррекции не превышает 0.05 рад/с. На рис.4, 5 приведены результаты численного моделирования процесса гироскомпасирования при следующих параметрах :

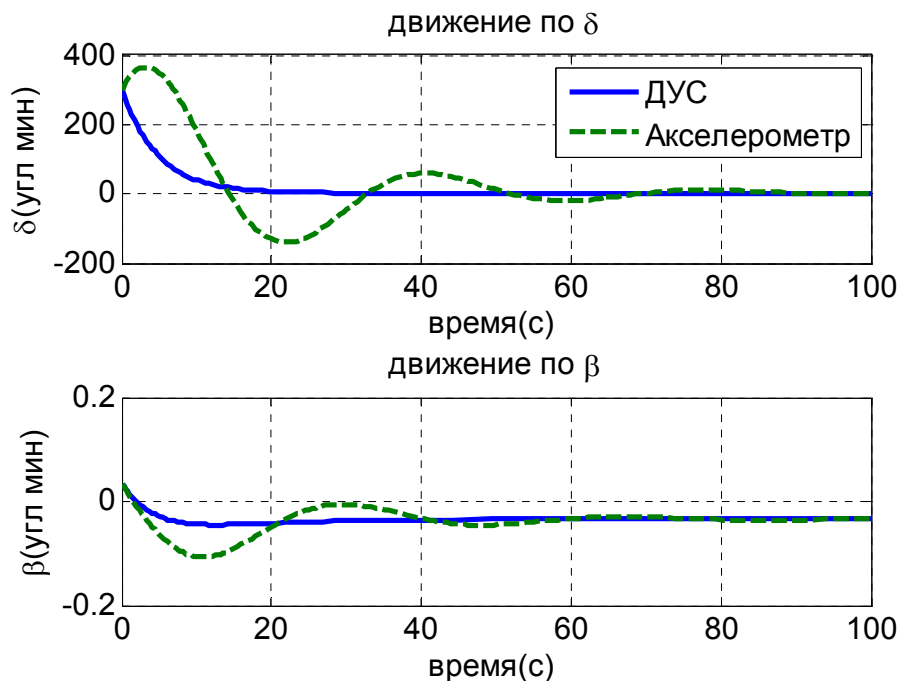


Рис.4. Изменение углов

$\varepsilon=1e-5$  (рад),  $\omega_{\partial x}=4.8e-8$  (1/с),  $\omega_{\partial z}=4.8e-8$ (1/с),  $\omega_{\partial y}=4.8e-8$ (1/с), и коэффициентах передачи по акселерометру: азимутальный канал -  $k_1=600$ (1/с), канал демпфирования -  $k_{2a}=0.1$ (1/с); по ДУС: азимутальный канал -  $k_3=4000$ , канал демпфирования -  $k_{2\partial}=0.1$ (1/с). Достижимая точность гирокомпасирования  $\delta_{уст}^d=3'$ . Из рис.4. видно, что гирокомпасирование по ДУС может быть выполнено за 20 с. В схеме с акселерометром при увеличении  $k_{2a}$  с целью сокращения времени возрастает установившаяся ошибка.

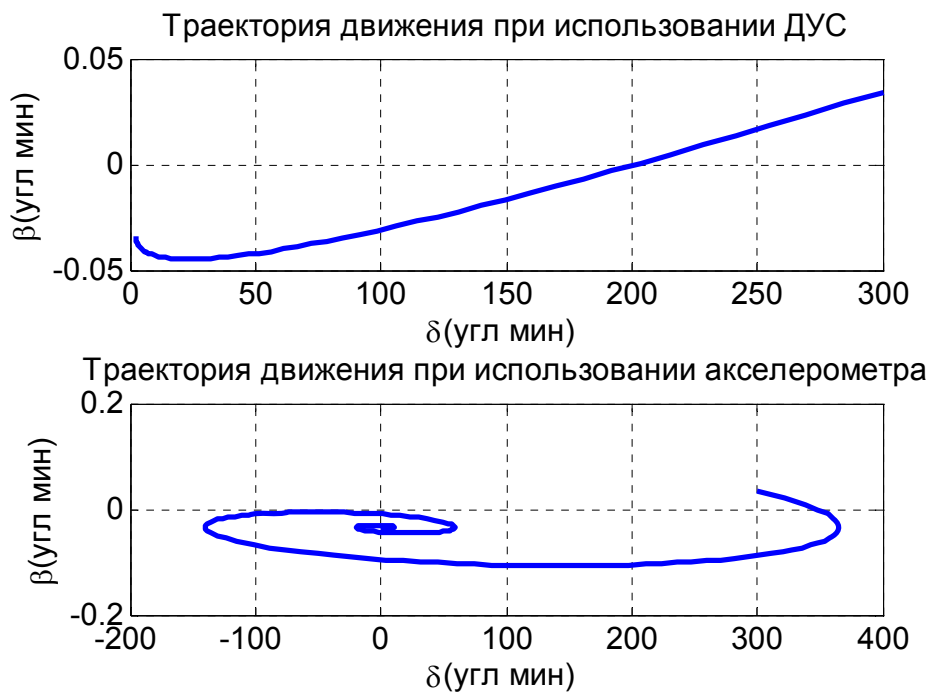


Рис.4. Фазовая траектория

## Выводы

1. Анализ решений показывает, что установившаяся ошибка при использовании сигнала ДУС  $\delta_{уст}^d$  зависит от соотношения угловых скоростей дрейфа  $\omega_{\partial x}$ ,  $\omega_{\partial z}$  и коэффициента передачи  $k_3$ . Чем больше  $k_3$ , тем быстрее и точнее проводится выставка. Для сравнения, точность гирокомпасирования при использовании сигнала акселерометра  $\delta_{уст}^a$  зависит от соотношения угловых скоростей дрейфа  $\omega_{\partial x}$ ,  $\omega_{\partial z}$  и коэффициентов передачи  $k_1$  и  $k_{2a}$ , при росте  $k_{2a}$  уменьшается время, но увеличивается  $\delta_{уст}^a$ .
2. При использовании сигнала ДУС возможно уменьшить время гирокомпасирования без потерь точности.
3. Гирокомпасирование по ДУС менее зависимо от точности горизонтирования платформы.

### **Литература:**

1. Мелешко В.В. Инерциальные навигационные системы. Начальная выставка. – К.: «Корнийчук», 1999. – 123с.
2. Назаров Б.И., Хлебников Г.А. Гиросtabilизаторы ракет, 1975. – 215с.
3. Патент 2110767 РФ МПК G01C19/34 «Способ аналитического гироскопирования с помощью гироскопического датчика угловой скорости» Редькин С.П. дата публикации: 10.05.1998
4. Патент 2188392 РФ МПК G01C21/12 «Способ определения истинного курса наклонного объекта с применением гироскопического датчика угловой скорости» Редькин С.П. дата публикации: 27.08.2002
5. Titterton D., Weston J., Starupdown Inertial Navigation Tehnology – 2<sup>nd</sup> Edition, Institution of Eleccrical Engineers, UK, 2004. – 558p.
6. United States Patent № 4,512,086 Int. Cl. G01C19/34 «Heading Indicator» Inventors: George Galuchak, Hasbrouck Hts.;Richard J.Stomber, Wayne, both of N.J date of patent Apr.23,1985
7. United States Patent № 4,173,216 «NORTH-SEEKING GYRO» date of patent Mar. 16,1965 James V.Johnston, Giles Drive, Huntsville, Ala.