

ГИРОКОМПАС НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА

С МАГНИТООПТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

Для ориентации на местности и целеуказания обычно применяют компас. Лучшие современные магнитные компасы не обеспечивают точность определения азимута выше $1,5^\circ$ даже при отсутствии магнитных аномалий, вибраций и климатических воздействий. Ориентироваться на местности можно также с помощью гироскопа, где репером направления на север является высокостабильное вращение Земли. Представлена конструкция и метод оценки погрешности измерений усовершенствованного отечественного лазерного гироскопа (ЛГ) 9А184 на основе лазерного гироскопа ДУП-4.

Вообще гироскопы можно изготовить на основе любых гироскопов: механических, волоконно-оптических и лазерных. Однако существующие механические и волоконно-оптические гироскопы имеют ряд недостатков. Механические динамически настраиваемые гироскопы хотя и обладают высокой точностью, но чувствительны к механическим ударным перегрузкам и климатическим воздействиям [1]. Волоконно-оптические гироскопы не обеспечивают необходимую для гироскопов стабильность смещения нуля и масштабного коэффициента в нужном диапазоне температур [2]. Сегодня оптимальными приборами с точки зрения цены и качества считают лазерные гироскопы.

Возможность создания гироскопа на лазерном гироскопе впервые обсуждалась уже в конце 60–70-х гг. прошлого века в работах [3,4,5]. Однако реализовать идею не удалось из-за несовершенства конструкции и больших габаритов лазерных гироскопов. Сейчас же появилась возможность создавать конкурентоспособные ЛГ.

Рассмотрим лазерные гироскопы двух типов. В первом задействован высокочастотный механический виброподвес лазера для преодоления "мертвой" зоны гироскопа и линейари-

зации его выходной характеристики. Существенный недостаток таких приборов – прецессия оси чувствительности гироскопа и ее чувствительность к механическим перегрузкам. Второй тип лазерных гироскопов имеет монолитную конструкцию, полностью лишенную каких-либо подвижных частей. Чтобы преодолеть "мертвую зону" в этом типе гироскопа применено магнитооптическое управление на основе эффектов Зеемана или Фарадея.

Лазерные гироскопы второго типа чрезвычайно перспективны. Именно поэтому авторы использовали для создания опытных образцов ЛГ усовершенствованный одноосный лазерный гироскоп на эффекте Зеемана – ДУП-4. Здесь описана оптимальная конструкция гироскопа на лазерном гироскопе. Мы также проанализировали погрешности измерений азимута с помощью ЛГ.

ПАРАМЕТРЫ ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА ДУП-4

В работе использовался экспериментальный образец одноосного лазерного гироскопа ДУП-4 (рис. 1), разработанный в научно-производственной фирме "Кварк" [6]. Гироскоп состоит



Рис. 1. Одноосный лазерный гироскоп ДУП-4

Ю.Голяев, А.Исаев, Ю.Колбас,
С.Лантратов, В.Минзар, Г.Телегин



Таблица 1. Технические характеристики ДУП-4

Параметр, единица измерения	Значение
Потребляемая мощность, Вт	13
Напряжение питания, В	10,5–15
Время готовности, с	1
Диапазон измеряемых угловых скоростей, град./с.	±1000
Суммарный дрейф нуля, град./ч без калибровки с калибровкой в течение 5 мин при реверсе оси чувствительности и с калибровкой в течение 15 мин	1–0,5 0,1–0,05 0,01
Магнитная чувствительность, град./ч·Э	0,004
Разрешение по углу поворота (дискрет), °	0,8200–0,83000
Нестабильность масштабного коэффициента, отн. ед.	1·10 ⁻⁴
Диапазон рабочих температур, °С	-55...60
Габариты	
диаметр, мм	105
высота, мм	116
Масса, кг	1,5
Назначенный ресурс, ч	5000
Назначенный срок службы, лет	5

из зеемановского лазерного датчика ЗЛК-16 и схемы управления датчиком. Схема включает преобразователь в кодовые посылки для персонального компьютера (ПК) через порт RS-485. Внешний корпус гироскопа выполнен из трехслойного пермаллового магнитного экрана в форме цилиндра диаметром 105 мм и высотой 116 мм.

За счет относительно небольшого энергопотребления (13 Вт) гироскоп может работать непрерывно неограниченное время, выходя на стационарное значение смещения нуля с остаточным дрейфом на уровне 0,01 град./ч. Основные характеристики гироскопа приведены в табл. 1.

УСТРОЙСТВО И ПАРАМЕТРЫ ЛГ 9А184

ЛГ марки 9А184 выпускают несколько предприятий: НПП "Сапфир-КНС" (Москва), НПФ "Кварк" (Москва), НПП "Гирос" (Москва), Объединение "Исток-ЭОС" (Фрязино). Данный прибор определяет азимут (угол между выбранным направлением и направлением на Север) и углы наклона относительно плоскости местного горизонта. Измерения производят во время остановок, т.е. компас должен находиться в статическом положении.

Технические характеристики 9А184 приведены в табл. 2, а внешний вид на рис. 2.



Рис.2. Лазерный гироскоп 9А184

ЛГ состоит из блока измерений (БИ), представляющего собой моноблок с пылевлагонепроницаемым кожухом, и пульта автономного управления (ПАУ). ПАУ является дополнительным оборудованием и служит для индикации измеренных значений наклонов и азимута.

БИ включает в себя:

- лазерный гироскоп ДУП-4;
- устройство поворота ДУП-4 – поворотную платформу, которая фиксируется в 16 рабочих положениях через угол 22,5°±5" при помощи магнитной муфты;
- шаговый электродвигатель для поворота платформы;
- 2 акселерометра АК5-50А;
- энкодер – датчик углового положения поворотной платформы;
- модуль микроконтроллера Octagon 6040 – управляет процессом измерения и расчета азимута, углов крена и тангажа;
- адаптер RS232C-RS485 – связывает блок измерений с ПАУ и модуль микроконтроллера Octagon 6040;
- адаптер RS232C-RS485 – связывает блок измерений с внешним ПК при работе по протоколу RS-485;
- плату питания и коммутации, которая обеспечивает работу всех устройств и преобразует цифровые сигналы микроконтроллера в сигналы управления работой шагового электродвигателя и магнитной муфты.

ПАУ включает в себя:

- дисплей, где отображаются вводимые оператором данные, служебная информация и результаты измерений;
- клавиатуру, с помощью которой оператор вводит необходимую информацию;
- модуль процессорный CPU-188-5BS, управляющий вводом-выводом и обменом данными с БИ.

Таблица 2. Технические характеристики 9А184

Параметр, единица измерения	Значение
Пусковой ток, А	3
Мощность потребления в установившемся режиме, Вт	60
Погрешность измерения азимута (с вероятностью 0,9), °	10
Погрешность измерения углов тангажа и крена (с вероятностью 0,9), °	2,6
Время измерения азимута, мин	8
Масса ЛГ, кг	
блок измерений	12
пульт автономного управления (дополнительное оборудование)	2
Объем ЛГ, л	
блока измерений	19
пульта автономного управления (дополнительное оборудование)	3
Габариты ЛГ, мм	
блок измерений	320 · 392 · 235
пульт автономного управления (дополнительное оборудование)	275 · 200 · 63

Таблица 3. Технические характеристики 9А184М

Параметр, единица измерения	Значение
Масса ЛГ, кг блок измерений пульт автономного управления (дополнительное оборудование)	9 1,5
Объем ЛГ, л блока измерений пульта автономного управления (дополнительное оборудование)	12 2
Габариты ЛГ, мм блок измерений пульт автономного управления (дополнительное оборудование)	260 · 280 · 225 265 · 190 · 53

В следующей модификации ЛГ 9А184М – размеры блоков и вес уменьшены на 15%, а объем снижен в 1,5 раза. Характеристики 9А184М приведены в табл. 3.

ПРИНЦИП РАБОТЫ И АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЛГ

Рассмотрим принцип работы ЛГ (рис. 3). Задача ЛГ – определение угла σ между проекцией измерительной оси гироскопа (ИО ГК) в плоскости местного горизонта и направлением на север. В общем случае ИО ГК наклонена к плоскости горизонта на угол β . Лазерный гироскоп и акселерометр установлены на поворотной платформе с возможностью фиксации в нескольких положениях, причем оси чувствительности (ОЧ) гироскопа и акселерометра совпадают и перпендикулярны оси вращения платформы. При повороте платформы ОЧ перемещается в измерительной плоскости (ИП) гироскопа. В первом из фиксированных положений платформы ИО ГК и ОЧ совпадают.

ЛГ включается либо по команде с ПАУ, либо от внешнего ПК. Измерения проводят в три этапа. На первом этапе измеряют проекции угловой скорости вращения Земли и угол наклона при исходном положении ОЧ, совпадающем с ИО ГК, и определяют предварительный азимут. Модуль микроконтроллера Octagon 6040 считывает показания энкодера и регистрирует реальное угловое положение поворотной платформы. Затем в течение 10 с. измеряют наклоны платформы и накоп-

ливают показания гироскопа. По ним рассчитывают предварительный азимут ОЧ. Если направление ОЧ лазерного гироскопа не совпадает с направлением "запад-восток", то дается команда на шаговый электродвигатель, который устанавливает поворотную платформу в оптимальное положение. На втором этапе измеряют проекции угловой скорости вращения Земли и угол наклона при ОЧ, зафиксированной в положении, которое близко к направлению "запад-восток" ("восток-запад") и определяется по предварительному азимуту. В направлении "запад-восток" в течение 230 с накапливаются показания гироскопа. На третьем этапе ОЧ фиксируют в положении, повернутом на угол 180°. После чего в течение 230 с повторно производится накопление показаний датчика. По накопленным показаниям угловой скорости рассчитывается азимут, и результат выдается на дисплей ПАУ или во внешний ПК. После передачи результата поворотная платформа возвращается в исходное положение.

Оценим погрешности измерений с помощью ЛГ. При втором и третьем положениях ОЧ (назовем их "+" и "-") проекции скорости вращения Земли на ОЧ составляют:

$$W_{пз} = \pm(\sin \sigma \cdot \cos \beta + \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} j) \cdot W_3 \cos j \quad (1)$$

где $W_3 = 15,04$ град/ч – угловая скорость вращения Земли, σ – азимут ИО ГК, j – широта места точки измерения, β – угол между ИО ГК и плоскостью горизонта, α – угол между осью, перпендикулярной ИО ГК и плоскостью горизонта.

Выходной сигнал гироскопа состоит из двух составляющих (с учетом масштабного коэффициента):

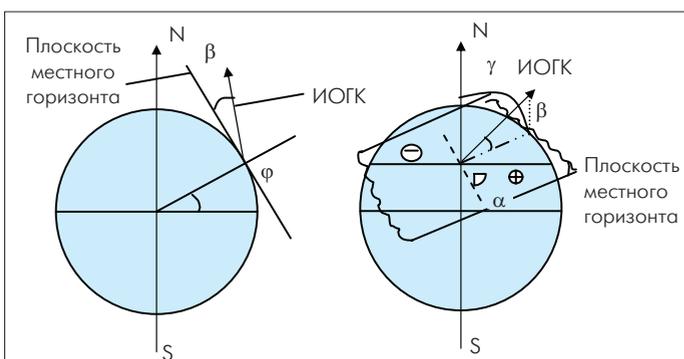
$$W_{вых}^{\pm} = W_{пз}^{\pm} + W_g \cdot \quad (2)$$

Здесь W_g – дрейф нуля гироскопа, в общем случае меняющийся во времени, в том числе и случайным образом. Процесс измерения ЛГ занимает в каждом из измерительных положений ОЧ ("+", "-") одинаковый интервал времени T ; измерения проводят последовательно с минимальным разрывом во времени.

За каждый интервал T компьютер гироскопа принимает от гироскопа измеренный угол Q , равный:

$$\Theta^{\pm} = \int_0^T \Omega_{вых}^{\pm} dt = \int_0^T (\Omega_{пз}^{\pm} + \Omega_g(t)) dt. \quad (3)$$

Абсолютные значения проекции скорости вращения Земли $W_{пз}^+$ и $W_{пз}^-$ равны друг другу, а знаки противоположны (с точностью до ошибок устройства реверса оси чувствительности гироскопа). Знак и значение дрейфа нуля гироскопа не зависят от направления ОЧ гироскопа, за исключением влияния магнитного поля Земли (до 0,8 Э при установке гироскопа на автомобиле). Учитывая эти свойства гироскопа, легко найти разницу в измерительных углах гироскопа DQ для



ИОГК – измерительная ось гироскопа, α – угол наклона ОЧ во втором положении (+) по отношению к плоскости местного горизонта, β – угол наклона ИОГК к плоскости местного горизонта, σ – угол между проекцией ИОГК и направлением на север (азимут), j – широта места точки измерения (стояния).

Рис.3. Принцип работы ЛГ



двух периодов измерения T (временным разрывом между измерениями пренебрегаем):

$$\Delta\Theta = \Delta\Theta^+ - \Delta\Theta^- = 2T\Omega_{\text{пз}} + \int_0^T \Omega_g(t)dt - \int_T^{2T} \Omega_g(t)dt = 2T\Omega_{\text{пз}} + \Delta\Theta_g, \quad (4)$$

где $\Delta\Theta_g = \int_0^T \Omega_g(t)dt - \int_T^{2T} \Omega_g(t)dt$ – ошибка ЛГ в первичном накопленном измерительном угле из-за непостоянства скорости дрейфа нуля гироскопа.

Углы b и a определяются при измерениях проекций местного ускорения свободного падения g на ОЧ акселерометра, совпадающую по направлению с ОЧ гироскопа.

В общем случае выходной сигнал акселерометра в положениях "+" и "-" равен:

$$a^{\pm} = \pm g \sin a + a_0^{\pm}. \quad (5)$$

В начальном положении выходной сигнал акселерометра равен:

$$a = g \sin b + a_0, \quad (6)$$

где a_0 – смещение нуля акселерометра в начальном положении.

Из уравнений (5) и (6) определяем углы b и a :

$$\sin a = [(a^+ - a^-) + (a_0^+ - a_0^-)]/2g = (a^+ - a^-)/2g + D a_0/2g, \quad (7)$$

где $D a_0 = a_0^+ - a_0^-$ – случайная составляющая смещения нуля акселерометра.

Соответственно

$$\sin b = [a - (a^+ + a^- - D a_0)/2]/g. \quad (8)$$

Из уравнений (1), (4), (7), (8) легко найти значение азимута измерительной оси ЛГ σ :

$$\sin \gamma = \frac{(\frac{\Delta\Theta - \Delta\Theta_g}{2T\Omega \cos \varphi} - \frac{a^+ - a^-}{2g} \text{tg} \varphi - \frac{\Delta a_0}{2g} \text{tg} \varphi)}{\sqrt{1 - \frac{(a - (a^+ + a^- - \Delta a_0)/2)^2}{g^2}}}. \quad (9)$$

Проведем оценку погрешностей измерения азимута. Суммарная величина ошибки определения угла может быть выражена как:

$$\Delta\gamma = \sqrt{\Delta\gamma_{\Omega\text{ш}}^2 + \Delta\gamma_{\varphi}^2 + \Delta\gamma_{\beta\alpha}^2 + \Delta\gamma_{\text{п}}^2}, \quad (10)$$

где $D\sigma_{\text{ш}}$ – ошибка, связанная с дрейфом гироскопа, включая влияние магнитного поля Земли,

$D\sigma_{\text{ж}}$ – ошибка, связанная с неточностью определения широты места,

$D\sigma_{\text{ба}}$ – ошибка, связанная со смещением нуля акселерометра,

$D\sigma_{\text{п}}$ – ошибка, связанная с отличием угла между положениями "+" и "-" от 180° . Очевидно, что $D\sigma_{\text{п}}$ определяется точностью изготовления поворотного устройства.

Рассмотрим ошибку, связанную с дрейфом гироскопа. Функция дрейфа $W_g(t)$ хорошо описывается суперпозицией линейной монотонной составляющей и случайной составляющей (шум):

$$W_g(t) = W_{g0} + At + W_{\text{гш}}(t), \quad (11)$$

где $|W_{\text{гш}}(t)| \ll |W_{g0} + At|$.

Отсюда следует, что ошибка DQ для линейной формы средней составляющей функции дрейфа гироскопа определяется только небольшой немонотонной остаточной случайной составляющей:

$$\Delta\Theta_g = \Delta\Theta_{\text{гш}} = \int_0^T \Omega_{\text{гш}}(t)dt - \int_T^{2T} \Omega_{\text{гш}}(t)dt. \quad (12)$$

Из (9) найдем ошибку, связанную с дрейфом гироскопа. Для упрощения оценки принимаем, что азимут σ , углы наклона к горизонту a и b мало отличаются от 0 (это обычно выполняется при правильной установке гироскопа).

Тогда $\sigma \approx \sin \sigma$, $a \approx D\sigma_{\text{ш}}$ определяется по формуле:

$$\Delta\gamma_{\Omega\text{ш}} = \frac{\Delta\Theta_{\text{гш}}}{2T\Omega \cdot \cos \varphi} + \frac{0,8S}{\Omega \cdot \cos \varphi} \approx \frac{\Delta\Theta_{\text{гш}} + 0,8S}{\Omega_7 \cos \varphi}, \quad (13)$$

где S – магнитная чувствительность дрейфа гироскопа.

Очевидно, что ошибка существенно возрастает при измерениях в высоких широтах ($\text{жб} 90^\circ$).

Проанализируем ошибки, связанные с неточностью определения широты места $D\sigma_{\text{ж}}$. Вводимая в (9) широта места ж равна $\text{ж}_{\text{ист}} + D\text{ж}$, где $\text{ж}_{\text{ист}}$ – истинная широта места, $D\text{ж}$ – ошибка определения широты места. Учтем, что углы наклона к горизонту a и b мало отличаются от 0 . Тогда $D\sigma_{\text{ж}}$ определяется по формуле:

$$\Delta\gamma_{\varphi} + \gamma \approx \frac{\Delta\Theta}{2T\Omega_3 \cos(\varphi + \Delta\varphi)} - \sin \alpha \text{tg}(\varphi + \Delta\varphi) = \frac{\Delta\Theta}{2T\Omega_3 (\cos \varphi \cos \Delta\varphi - \sin \varphi \sin \Delta\varphi)} - \sin \alpha \frac{\text{tg} \varphi + \text{tg} \Delta\varphi}{1 - \text{tg} \varphi \text{tg} \Delta\varphi}. \quad (14)$$

Учтем, что $D\text{ж}$ является малой величиной. Тогда $\text{tg} D\text{ж} \gg D\text{ж}$ и $\cos D\text{ж} \approx 1$. Тогда:

$$\Delta\gamma_{\varphi} \approx \frac{\Delta\Theta \Delta\varphi}{2T\Omega_3 \cos(\varphi + \Delta\varphi)} - \sin \alpha \frac{\Delta\varphi}{\cos(\varphi + \Delta\varphi)} \approx \frac{\Delta\varphi}{\cos \varphi} \left(\frac{\Delta\Theta_3}{2T\Omega} - \sin \alpha \right). \quad (15)$$

Таким образом, ошибка возрастает в более высоких широтах ($\text{жб} 90^\circ$), а также с ростом накопленного угла DQ (т.е. откло-

нения ОЧ от направления "запад-восток" и увеличением наклона вниз).

Ошибка измерения наклона зависит от шумовой составляющей смещения нуля акселерометра. Для малых углов α и β ошибка измерения углов наклона равна:

$$D\beta = D\alpha = D a_0/g. \quad (16)$$

По формуле (9) с учетом (16) получим:

$$\Delta\gamma_\alpha \cong \frac{\Delta a_0}{g} \operatorname{tg}\varphi. \quad (17)$$

Очевидно, что ошибка быстро возрастает в высоких широтах ($\beta \approx 90^\circ$).

Проведем численную оценку ошибки определения направления на север для лазерного гирокомпаса 9A184. Погрешность $D\sigma_\Pi$ не превышает $30''$.

Лазерный гироскоп ДУП-4 (см. табл.1) в условиях компенсации постоянной составляющей дрейфа за счет поворота оси чувствительности имеет случайную составляющую дрейфа $w_{гш} = 0,01$ град./ч и магнитную чувствительность $0,007$ град./ч·Э. Для широты места 70° из формулы (13) получим $D\sigma_{wш} = 8,7'$.

Точность определения широты места Dj лимитирована точностью спутниковых навигационных систем. Согласно [7], горизонтальная ошибка местоопределения по уровню $3s$ (s – средняя квадратичная ошибка горизонтального местоопределения) не превышает 100 м, что соответствует $Dj = 3,6''$. Приняв максимальную широту точки стояния $j = 70^\circ$, угол наклона $\alpha = 10^\circ$, максимальное отклонение ОЧ от направления "запад-восток" 10° , по формуле (15) рассчитаем значение $Dj = 2,9''$.

Используемый акселерометр АК5-50А имеет случайную составляющую смещения нуля $D a_0/g = 10^{-4}$. Тогда для $j = 70^\circ$ с помощью (17) получим $D\sigma_{\beta\alpha} = 0,9'$.

С помощью (10) рассчитаем общую ошибку:

$$\Delta\gamma = \sqrt{(30'')^2 + (8,7')^2 + (2,9'')^2 + (0,9')^2} = 8,9'.$$

Как и ожидалось, основной вклад в ошибку дает случайная составляющая дрейфа гироскопа. Вторая по значимости – ошибка из-за неточности измерения наклонов, на третьем месте – допуски изготовления поворотной платформы.

ТЕНДЕНЦИИ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ ЛГ

Сейчас появляются новые способы улучшить качество зеемановских ЛГ с магнитной частотной подставкой. Новый зеема-



новский лазерный гироскоп ДУП-4М работает в четырехчастотном режиме. Этот режим полностью исключает магнитную составляющую дрейфа, поскольку для каждой пары мод генерации она одинакова, но противоположна по знаку и легко вычитается при совместной обработке показаний ЛГ на двух парах мод генерации. В результате дрейф $\dot{w}_{\text{гш}}$ уменьшается до 0,004 град./ч, а точность измерения азимута улучшается до 3' при том же времени осреднения (8 мин) и без изменения массы, габаритов и стоимости.

Специально для прецизионных измерений разрабатывается новый четырехчастотный зеэмановский лазерный гироскоп повышенной точности. Он отличается большим периметром резонатора (увеличение в 1,7 раза) и точностью в режиме реверса оси чувствительности $\dot{w}_{\text{гш}}$ не хуже 0,001 град./ч, при ее вкладе в ошибку гироскопирования $D\sigma_{\dot{w}_{\text{гш}}}$ до 40". Акселерометры (АК-6, ДА-11, ДА-15) позволяют уменьшить ошибку измерения наклонов до 2–3". В этом случае возрастает роль случайной составляющей рассогласования углов фиксации оси ЛГ $D\sigma_{\text{п}}$. Здесь можно применить алгоритмическую коррекцию случайной составляющей рассогласования углов фиксации и оси гироскопа $D\sigma_{\text{п}}$, а также несколько увеличить размер поворотной платформы. Таким образом уменьшается угловая ошибка фиксации. Предварительные эксперименты доказали, $D\sigma_{\text{пр}}$ можно стабилизировать на уровне 10". Преде-

лы результирующей точности определения азимута, предположительно, составят 50–55" при общей массе ЛГ не более 20 кг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермаков В.С., Максимов А.Г., Крупнов В.Ф., Дедок И.А. "О применении модуляционного гироскопа в судовом гироскопе". IX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – С.-Пб., 2002.
2. Голяев Ю.Д., Колбас Ю.Ю., Телегин Г.И. Нестабильность и нелинейность выходных характеристик волоконно-кольцевых интерферометров. – Квантовая электроника, 1990, вып. 17, №1.
3. Богданов А.Д. Гироскопы на лазерах. – М.: Воениздат, 1973.
4. Бромберг П.В. Теория инерциальных систем навигации. – М.: Наука, 1979.
5. Закатов П.С. Курс высшей геодезии. – М.: Недра, 1976.
6. Голяев Ю.Д., Дмитриев В.Г., Зверев Г.М. Лазерные гироскопы второго поколения. – Военный парад, 2003, №3(57).
7. Харисов В.Н., Петров А.И., Болдин В.А. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС. – М: ИПРЖР, 1999.