

Г.В. ЧЕРЕМИСЕНОВ

## **ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ГИРОКОМПАСА НА ОСНОВЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА**

*Рассматривается попытка создания гирокомпаса на основе лазерного гироскопа, вращающегося вокруг горизонтальной оси чувствительности. Оцениваются уровни погрешностей, вызванных различными источниками. Описывается конструкция макета гирокомпаса. Приводятся результаты его испытаний.*

**Ключевые слова:** гирокомпас, лазерный гироскоп, азимут.

### **Введение**

Определение направления на Север необходимо для решения практически любой навигационной задачи. В настоящее время для автономного определения азимута широко применяются гирокомпасы, построенные на базе гироскопов различной физической природы.

Наиболее точными, но и наиболее сложными, могут быть гирокомпасы, построенные на базе электростатических гироскопов (ЭСГ). Здесь достижимы точности в десятки и даже единицы угловых секунд [1]. Более простыми, но с точностями в единицы минут, являются гирокомпасы на лазерных гироскопах (ЛГ) с вибрационной, или земановской, подставкой [2]. Не менее точны, но более дешевы и надежны волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) [3, 9, 10, 11]. Постоянно растущие требования к точности определения азимута и другим характеристикам гирокомпаса стимулируют исследования по разработке новых конструкций.

Настоящая работа посвящена исследованию возможностей гирокомпаса на базе ЛГ, вращающегося вокруг своей горизонтальной оси. Вращение дает возможность уйти от зоны нечувствительности ЛГ, являющейся основным источником его погрешностей [4]. Такой гирокомпас может быть более точным, чем гирокомпас на ЛГ с частотной подставкой или на ВОГ, но более простым, чем компас на ЭСГ.

В статье рассматриваются возможные источники погрешностей такого гирокомпаса и приводится элементарная оценка их влияния на точность определения азимута, а также описываются экспериментальная установка и полученные результаты.

Возможно, полученный опыт будет полезен специалистам, разрабатывающим гирокомпасы или другие устройства на базе вращающегося ЛГ, например гониометры.

### **Источники погрешности компаса на основе вращающегося ЛГ**

Вращение ЛГ исключает влияние зоны нечувствительности и связанные с ней погрешности, но остаются другие, присущие любому ЛГ и гирокомпасу на

---

**Черемисенов** Геннадий Викторович. Кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории, АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха» (Москва). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

его основе. Это погрешности, связанные с нестационарным дрейфом ЛГ, влиянием магнитного поля, погрешностями горизонтирования и разворота на  $180^\circ$  для компенсации стационарного и линейного дрейфа [2, 4]. Добавляются также новые погрешности, влияние которых существенно именно для вращающегося ЛГ. Рассмотрим некоторые из этих погрешностей более подробно. При оценках будем считать, что измерения происходят по трехточечной схеме (измерение в начальном положении / разворот на  $180^\circ$  и измерение в этом положении / разворот в начальное положение и измерение в нем). В этом случае компенсируются стационарные и линейно меняющиеся погрешности.

### **Конические движения**

Из-за биения подшипников ось вращения ЛГ может перемещаться в пространстве так, что ее траектория описывает поверхность конуса. Такие конические движения оси приводят к погрешности  $\Delta\omega$  измеряемой угловой скорости [5]

$$\Delta\omega = \pi \cdot \alpha^2 / T,$$

где  $\alpha$  – угловые биения оси вращения,  $T$  – период вращения.

Таким образом, при периоде вращения 2 с биения оси вращения не должны превышать  $\pm 20''$ , чтобы погрешность измеряемой угловой скорости не превышала  $1,3 \cdot 10^{-3}''/с$  и, следовательно, чтобы погрешность азимута не превышала  $30''$  (на широте Москвы). Приведенная оценка показывает, что влияние конических движений не предъявляет особо жестких требований к подшипникам, обеспечивающим вращение ЛГ. К тому же такой расчет дает в большинстве случаев завышенную оценку погрешности азимута, поскольку при измерениях по трехточечной схеме аддитивное воздействие, постоянное на всех трех интервалах времени съема данных, не дает погрешности в определении азимута. Это является следствием разворота на  $180^\circ$  оси чувствительности ЛГ при измерении. В этом случае полезная составляющая измеренной скорости (горизонтальная проекция скорости вращения Земли) меняет свой знак, а все стационарные воздействия его не меняют и вычитаются при обработке.

### **Фиксирование целого числа оборотов и дискретность отсчета**

Измерение малой угловой скорости Земли вращающимся ЛГ происходит на фоне большой (один оборот в 2 с) скорости собственного вращения. Отделить собственное вращение можно, если измерять накопленный угол на целом числе оборотов от метки на вращающейся части до той же метки (отсчет ЛГ на обороте). Фиксирование прохождения метки должно быть довольно точным. Если, например, производятся измерения в одной точке в течение времени  $T$  и при измерении накопленного при этом угла имеется погрешность  $\Delta\varphi$ , то появится погрешность  $\Delta\varphi / T$  в измерении угловой скорости и, следовательно, погрешность определения азимута

$$\Delta\gamma = \frac{\Delta\varphi}{T\Omega_2},$$

где  $\Omega_2$  – горизонтальная проекция угловой скорости вращения Земли.

Отсюда можно сделать вывод, что для того, чтобы на широте Москвы погрешность азимута из-за погрешности фиксирования оборота не превосходила 30" при времени измерения 1,5 мин, точность фиксирования должна быть не хуже 0,1". Очевидно, что дискретность отсчета ЛГ влияет на погрешность измерения азимута в такой же пропорции, то есть 0,1" погрешности дискретности приводит к 30" погрешности в азимуте при описанных выше условиях.

Для точного фиксирования целого оборота могут применяться, например, коллимационные или оптико-интерференционные способы, но они достаточно громоздки и сложны [6, 7]. Простой способ считывания метки светодiodной парой не обеспечивает точности при единичном считывании. Однако погрешность считывания метки имеет случайный характер, и среднее значение погрешности стремится к нулю при увеличении числа считываний. В рассматриваемом варианте гирокомпаса не важно, на какой именно метке начинается оборот, важно только, чтобы он на ней же и заканчивался. За то время, пока ЛГ совершит два физических оборота, можно считать много оборотов, начиная их на разных метках, расположенных по кругу. Взяв среднее по всем оборотам, получим значительное увеличение точности.

Очевидно, что биения оси вращения будут вносить погрешность в фиксирование целых оборотов. Если за время оборота произошло смещение диска с метками на величину  $\Delta L$ , то это приведет к угловой погрешности

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta L}{D},$$

где  $D$  – диаметр диска с метками.

Эта погрешность может быть существенной: например, при использовании диска с метками диаметром 150 мм и биениях подшипников в 10 микрон погрешность фиксирования оборота может превышать 10". Для исключения этой погрешности необходимо использовать дифференциальную схему, для чего на диске все метки должны быть расположены равномерно, а считывание меток должно осуществляться двумя считывающими устройствами, сдвинутыми по окружности на 180°. Отсчет ЛГ формируется в этом случае как среднее по всем меткам первого и второго считывающих устройств.

В первых экспериментах в качестве датчика меток (углов) применялся цифровой оптический преобразователь (энкодер) ВЕ-17845, позволяющий снять 1000 меток (углов) на один оборот. Однако вскоре обнаружилось большое (несколько угловых секунд) нестационарное смещение положения меток, вызванное, по-видимому, биениями в подшипниках, несмотря на сравнительно малый диаметр его оптического круга (50 мм) и отсутствие дифференциального съема информации. Энкодер с дифференциальным съемом информации найти не удалось. Кроме того, энкодер плохо вписывался в предполагаемую конструкцию компаса. Оптимальным оказалось использование тонкого диска максимально возможного для данной конструкции диаметра с равномерно расположенными по кругу метками и с их считыванием по дифференциальной схеме.

В эксперименте использовался диск диаметром 150 мм с 360 метками (щелями) по кругу, изготовленный с применением прожигающего лазера. В качестве считывающего устройства применялась пара «лазерный диод – фотодиод».

Получившаяся погрешность фиксирования оборота, то есть среднее отличие от 360° углового расстояния от метки до той же метки, была оценена в величине

ну не хуже  $0,3''$ . Эта оценка получена путем сравнения с результатами фиксации оборотов, выполненными с помощью длиннофокусного автоколлиматора.

Погрешность дискретности тоже имеет в значительной мере случайный характер, поскольку метка начала и конца каждого оборота случайным образом попадает в интервал между счетными импульсами. В связи с тем что рассчитывается среднее по 360 меткам и двум датчикам, погрешность от дискретности также значительно уменьшается. В предположении, что погрешность дискретности является случайной величиной типа белого шума, это 27-кратное уменьшение (квадратный корень из 720). Значительное уменьшение погрешности от дискретности при осреднении было косвенно подтверждено описанным ниже экспериментом. Используемый в опыте ЛГ имел цену одного импульса (дискретность)  $1''$ . С использованием электронной схемы счета дробной части интервала между основными счетными импульсами, позволяющей уменьшить дискретность в 10 раз до  $0,1''$ , изучался разброс осредненных измерений. Применение этой схемы уменьшало разброс единичных отсчетов, но не уменьшило разброс осредненных, что косвенно доказывает, что при осреднении погрешность от дискретности по крайней мере в 10 раз меньше по сравнению с единичным отсчетом.

### *Нестабильность масштабного коэффициента ЛГ*

При вращении ЛГ накапливается большое значение угла, и изменение масштабного коэффициента во время измерений приводит к большой погрешности. Например, если во втором цикле трехточечной схемы (после поворота на  $180^\circ$ ) произошло относительное изменение  $\delta K$  масштабного коэффициента ЛГ, то при последующем измерении в этом цикле поворотов накопится погрешность угла

$$\Delta\varphi = (K_u N - KN) = \Delta KN = \frac{\Delta K}{K} NK = \delta K \frac{2\pi T}{T_{об}},$$

где  $T$  – время измерения в цикле,  $T_{об}$  – период оборота,  $N$  – накопленное за время  $T$  число импульсов с ЛГ,  $K_u$  и  $K$  – истинный и ложный масштабные коэффициенты ЛГ.

При обработке по алгоритму трехточечной схемы будет получена погрешность азимута

$$\Delta\gamma = \frac{\Delta\varphi}{\Omega_z T} = \frac{2\pi}{2\Omega_z T_{об}} \delta K.$$

При периоде оборота в 2 с погрешность азимута составит  $30''$  в случае, если произошло относительное изменение масштабного коэффициента ЛГ всего на  $4 \cdot 10^{-9}$  от значения в исходном положении. Такое изменение масштабного коэффициента ЛГ может произойти по причине изменения настройки его резонансного оптического контура, вызванного самим поворотом. Это является существенным ограничением точности компаса на основе вращающегося ЛГ. При этом к долговременной стабильности масштабного коэффициента не предъяв-

ляется особо жестких требований. Действительно, относительное изменение  $\delta K$  масштабного коэффициента, постоянное на всех фазах измерения азимута, повлияет только на точность измерения угловой скорости Земли и приведет к погрешности азимута

$$\Delta\gamma = \frac{\Omega_{np}}{\Omega_2} \delta K < \delta K,$$

где  $\Omega_{np}$  – проекция горизонтальной составляющей  $\Omega_2$  угловой скорости вращения Земли на ось чувствительности ЛГ.

В этом случае максимальная погрешность азимута в 30" получается при долговременной относительной стабильности масштабного коэффициента  $1,5 \cdot 10^{-4}$ , что для ЛГ вполне осуществимо.

На рис. 1 представлена полученная экспериментально зависимость относительного изменения масштабного коэффициента от расстройки резонансного контура ЛГ.

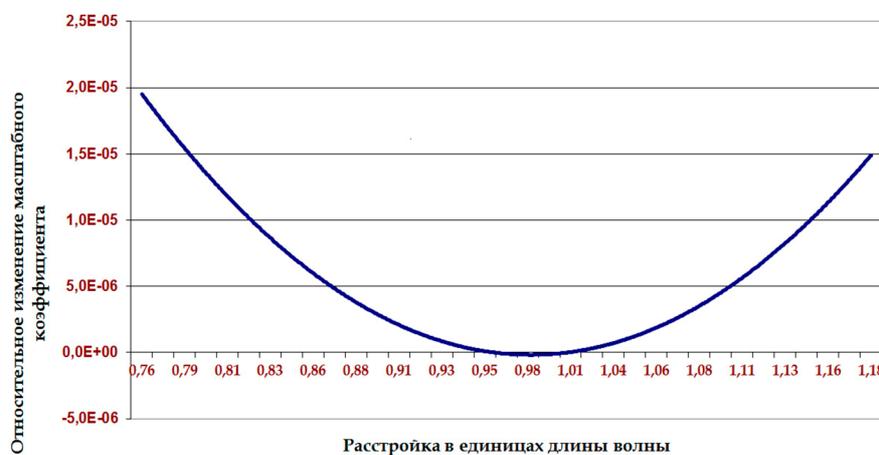


Рис. 1. Относительное изменение масштабного коэффициента ЛГ в зависимости от расстройки его резонансного контура

Для получения графика (рис. 1) была отключена схема регулировки периметра. На зеркало с пьезоприводом подавалось линейно возрастающее медленно меняющееся напряжение. Скорость изменения напряжения была такова, что увеличение периметра на одну длину волны происходило за 10 мин и в течение одного оборота, который составлял 1,9 с, можно было считать периметр постоянным. На каждом обороте по показаниям ЛГ измерялся угол поворота от метки до той же метки. Изменение этого угла трактовалось как изменение масштабного коэффициента ЛГ. Гипотеза о возможном изменении дрейфа ЛГ не рассматривалась потому, что аналогичные измерения для ЛГ с включенной виброподставкой (без осуществления поворотов), проведенные в ходе настроечно-регулирующих работ при изготовлении ЛГ, показали небольшую, практически нулевую, линейную зависимость его показаний от расстройки периметра.

Очевидно, что важен не сам уровень расстройки, а ее изменение при поворотах. Однако при минимальной расстройке минимально и ее возможное

изменение. Оно может происходить вследствие погрешности в работе схем регулировок периметра и амплитуды (накачки) или изменившегося характера возможных электрических наводок.

Другим существенным фактором, который проявляется как изменение масштабного коэффициента, являются биения подшипников. Если ось чувствительности ЛГ не точно выставлена по оси вращения и составляет с ней угол  $\psi$ , то изменение этого угла из-за биений подшипников на величину  $\Delta\psi$  приведет к изменению измеряемой угловой скорости на величину

$$\Delta\omega = \omega \cdot (\cos(\psi) - \cos(\psi + \Delta\psi)) \approx 0,5 \cdot \Delta\psi^2 - \psi \cdot \Delta\psi.$$

Наиболее существенно влияние второго члена этой формулы. Так, например, чтобы относительное изменение кажущегося масштабного коэффициента не превосходило  $5 \cdot 10^{-9}$ , необходимо выставлять ось чувствительности ЛГ по оси вращения с точностью  $20''$  и ограничить биения подшипников величиной  $10''$ .

Реверсирование направления вращения ЛГ в середине каждого из трех интервалов измерения не дает ожидаемого положительного эффекта. В этом случае на каждом измерительном интервале трехточечной схемы в первой половине времени происходит накопление угла, а во второй – его уменьшение. Ожидалось, что погрешность от нестабильности масштабного коэффициента ЛГ и, следовательно, общая погрешность измерения должны уменьшиться. Однако остановки при изменении направления вращения приводят к возмущениям схемы регулировок периметра и накачки, и требуется дополнительное время для их успокоения. При этом установившееся значение может отличаться от предыдущего. Все это приводит к увеличению погрешности и времени измерения. Возможно, если уменьшить время реверса (ударный реверс) и отключать регулировки на время реверса, этот метод даст положительный результат.

### Макет компаса

Макет представляет собой цилиндр диаметром 140 мм, вращающийся вокруг горизонтальной оси, закрепленной в двух подшипниках. Подшипники установлены на вертикальных стойках, жестко фиксированных на горизонтальном основании (рис. 2).

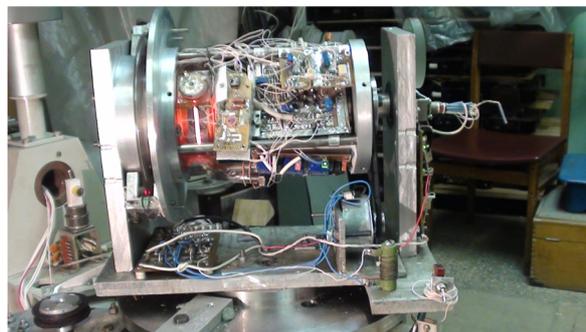


Рис. 2. Макет компаса

На этом же основании размещается шаговый двигатель, приводящий во вращение цилиндр через резиновый пассик, период оборота составлял  $\approx 2$  с.

В экспериментах использовался ситалловый квадратный блок (резонатор) со стороной в 7 см (вес  $\approx 1$  кг, цена выходного импульса 1") и электронные схемы высокочастотной накачки и регулировки периметра от зеркального лазерного гироскопа КМ-7 (производство НИИ «Полюс», г. Москва). В режиме работы с виброподставкой ЛГ КМ = 7 обладает погрешностью  $\sim 1 \div 3 \cdot 10^{-2}$  °/час при осреднении на часовых интервалах.

Ситалловый блок укреплен на одном из торцов внутри цилиндра. На этом же торце, но снаружи, закреплены два датчика считывания меток, разнесенные на  $180^\circ$ . Метки выполнены в виде щелей в тонком металлическом диске, укрепленном неподвижно на вертикальной стойке соосно с цилиндром. Таким образом, датчики меток вращаются вокруг неподвижного диска с метками.

Внутри цилиндра располагаются вторичные блоки питания, микроконтроллер, а также взаимодействующая с ним электроника интерфейсов и обработки информации.

Внешнее питание (= 24 В) и информационный обмен между микроконтроллером и персональным настольным компьютером осуществляется по бесконтактному токопереходу. Этот токопереход использует вращающиеся трансформаторы, выполненные на ферритовых горшкообразных сердечниках. При этом информационные сигналы СОМ-портов транслируются непосредственно, а питающее напряжение предварительно преобразуется в высокую частоту и во вращающейся части вновь восстанавливается (выпрямляется). Макет компаса устанавливается на поворотный стол с вертикальной осью вращения. Поворот стола ограничивается двумя упорами, угловое расстояние между которыми составляет  $180^\circ$ . Поворот от одного упора до другого осуществляется вручную.

### **Экспериментальные результаты**

С целью исключения погрешности, связанной с наклоном, и увеличения чувствительности до начала эксперимента ось вращения ЛГ была выставлена в горизонт с помощью жидкостного уровня и в направлении на Восток с помощью магнитного компаса. Погрешность выставок не превосходила соответственно  $15''$  и  $5^\circ$ . Далее приводится алгоритм получения значения азимута.

Микроконтроллер, помещенный вместе с ЛГ во вращающийся цилиндр, осуществляет суммирование счетных импульсов с ЛГ от каждой метки до неё же по всем 360-ти меткам с использованием двух датчиков. На каждом обороте по всем этим суммам вычисляется среднее значение. Это число, умноженное на масштабный коэффициент ЛГ, представляет собой среднее значения угла  $\Psi$  поворота ЛГ в инерциальном пространстве за время периода оборота.

В каждом положении трехточечной схемы производится суммирование этих средних углов на интервале времени  $T$ . Время суммирования во всех положениях задается одинаковым. Таким образом, после завершения трехточечной схемы измерения получают три угла  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$ . Азимут  $\gamma$  определяется по формуле

$$\gamma = \pi / 2 - \varphi,$$

где

$$\varphi = \arcsin(b), \quad b = \left( \frac{0.5(\psi_1 + \psi_3) - \psi_2}{2\Omega_z T} \right).$$

Из вида зависимости приращения функции от приращения аргумента для  $\arcsin$

$$d\varphi = \frac{db}{\sqrt{1-b^2}}$$

следует, что погрешность определения азимута растет с увеличением  $b$  и, следовательно,  $\varphi$ , принимая при  $b = \pm 1$  (при этом  $\varphi = \pm \pi / 2$ ,  $\gamma = 0, \pi$ ) бесконечно большое значение. Из этого следует, что измерение невозможно при азимутах оси вращения, близких к  $0^\circ$  или  $180^\circ$ , а для увеличения точности необходимо выставлять ось вращения ЛГ в направлении Запад–Восток, когда  $\varphi = 0$ . Точность такой выставки может быть сравнительно небольшой. Так, при  $\varphi = 5^\circ$  погрешность определения азимута увеличивается всего на 0,4% по сравнению с  $\varphi = 0^\circ$ .

В ходе экспериментов изучалась только среднеквадратическая погрешность (СКП) измерения азимута. Все определения азимута проводились по трехточечной схеме, упомянутой выше.

Основной интерес представляли зависимость СКП от времени измерения в одной точке и зависимость от времени, прошедшего после включения ЛГ, то есть время готовности при запуске из холодного состояния.

Погрешности определения азимута можно разделить на три группы. Погрешности, связанные с фиксированием целых оборотов, погрешности, связанные с блоком ЛГ и его вращением, и погрешности, связанные с поворотом на  $180^\circ$  для компенсации дрейфа [2]. Первые две погрешности можно оценить, если при измерении не производить развороты ЛГ на  $180^\circ$ , но обработку измерений проводить по трехточечной схеме. Очевидно, что в идеальном случае должна получаться нулевая погрешность в вычислении азимута без какого-либо разброса. В действительности же из-за наличия погрешностей ЛГ и фиксирования целых оборотов наблюдается случайный разброс.

В экспериментах непрерывно в течение нескольких часов записывался массив сумм показаний ЛГ, осредненных по 360 оборотам и по двум датчикам меток. Затем этот массив обрабатывался по трехточечному алгоритму с получением значения азимута. Каждые три измерительных интервала (точки) брались последовательно по всему массиву от начала до конца. Между измерительными интервалами оставлялся промежуток времени в 8 с, имитирующий время, необходимое для поворота ЛГ на  $180^\circ$  при реальных измерениях. Таким образом, общее время измерения азимута составляло сумму длительностей трех измерительных интервалов плюс 16 с (время поворотов). Массив исходных данных обрабатывался многократно при различных измерительных интервалах времени в одной точке. Таким образом, для каждого измерительного интервала получался массив вычисленных азимутов и вычислялось СКП.

Далее измерения проводились уже с реальными поворотами на  $180^\circ$ . При одной заданной длительности измерительного интервала и времени поворота от упора до упора в 8 с проводились непрерывные определения азимута в течение 1,5 ч и также

подсчитывалось СКП. Такие измерения были выполнены для четырех значений измерительных интервалов.

На рис. 3 представлены результаты экспериментов. Сплошная кривая показывает зависимость СКП измерения азимута от полного времени измерения (три измерительных интервала плюс время поворотов) при измерениях без реальных поворотов. Крестиками отмечены СКП азимута при измерениях с реальными поворотами.

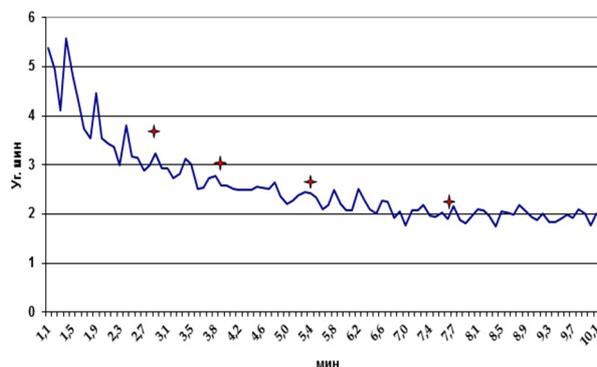


Рис. 3. СКП измерения азимута в зависимости от времени наблюдения

Как видно из рис. 3, измерения с реальными поворотами дали несколько худшие результаты. Дополнительные исследования макета компаса с использованием теодолита и закрепленного на стойке зеркала показали, что из-за недостаточной жесткости конструкции имеется разброс в угловом положении блока при постановке на упоры. Величина этого разброса сравнима с наблюдаемым на рис. 3 увеличением СКП определения азимута при реальных поворотах.

Что касается времени готовности, то оно практически полностью определяется временем выхода на стационарный режим характеристик резонатора и электроники накачки. Для рассматриваемых электронных схем и ситаллового блока это время составляло несколько десятков секунд. Это подтверждается экспериментами, в которых измерение азимута начиналось одновременно с подачей питания на ЛГ и двигатель вращения.

### Заключение

Проведенные исследования дают основание полагать, что на основе вращающегося ЛГ можно создать гирокомпас с погрешностью определения азимута в 1-3' за 3-5 мин времени и со временем готовности менее 1 мин. Для сравнения: представленные в интернете и в открытой печати лазерный гирокомпас 9А-184 (ЗАО «Исток-ЭОС», г. Фрязино) имеет погрешность 10' за 8 мин времени наблюдения [8], а ЛГК-4 (НИИ «Полюс», г. Москва) – 4' за 8–10 мин времени наблюдения [2, 9]. В ходе экспериментов не удалось определить конкретный вклад каждого источника в общую погрешность определения азимута вращающимся ЛГ, однако из приведенных в статье оценок следует, что наиболее критичными с точки зрения величины вносимой погрешности являются биения подшипников и расстройка резонансного контура ЛГ.

Предлагаемый гирокомпас может использоваться в наземных топографо-геодезических и маркшейдерских работах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гусинский В. З., Лесючевский В. М., Литманович Ю. А., Пешехонов В. Г. Высокоточный наземный гироскоп // Доклады VII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб, 2000. С. 43–50.
2. Голяев Ю. Д., Дронов И. В., Колбас Ю. Ю. Малогабаритный гироскоп на квазичетырех частотном лазерном гироскопе // Вестник МГТУ им Н. Э. Баумана, серия «Приборостроение». 2012. № 3. С. 112–125.
3. Коркишко Ю. Н. и др. Волоконно-оптический гироскоп навигационного класса точности // Гироскопия и навигация. 2008. № 1. С. 71–81.
4. Бычков С. И., Лукьянов Д. П., Бакаляр А. И. Лазерный гироскоп. М.: Сов. радио. 1975. 424 с.
5. Енин В. Н., Кветкин Г. А. Динамические возмущения лазерного гироскопа с вибрационным подвесом // Вопросы оборонной техники. Серия 9. 2010. Вып. 3–4. С. 108–115.
6. Коломийцев Ю. В., Новикова И. В. Интерференционные методы измерения углов // Реф. Обзор. 1978. № 1920.
7. Афанасьев В. А. Оптические измерения. М.: Недра, 1968.
8. Гироскоп 9А 184. ЗАО Исток-ЭОС, г. Фрязино. Сайт [https://ru/navigac/9A 184.html](https://ru/navigac/9A%20184.html).
9. Колбас Ю. Ю. Гироскоп на основе зеемановского кольцевого лазера // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 2011.
10. Патюрель И. и др. Волоконно-оптические гироскопы фирмы IXSEA и системы на их основе // Гироскопия и навигация. 2004. № 3. С. 53–61.
11. Tanaka T., Igarashi Y., Nara M., Yoshino T. Automatic north sensor using a fiber optic gyroscope. *Applied Optics*. Vol. 33. 1994. Pp. 120–123.

G.V. Cheremisenov (M.F. Stelmach Polyus Research and Development Institute, Moscow, Russia). Experience of gyrocompass design based on rotating laser gyroscope. *Гироскопия и навигация*. 2017. Vol. 25. №3 (98). P. 49-59.

**Abstract.** *An attempt to create a gyrocompass based on a laser gyroscope rotating about the horizontal sensitive axis is discussed. Levels of errors due to various causes are estimated. The design of gyrocompass mockup is described, and results of its testing are presented.*

**Key words:** gyrocompass, laser gyroscope, azimuth.

## REFERENCES

1. Gusinskiy, V.M., Lesyuchevskiy, Yu.A., Litmanovich, V.G., Peshekhonov, V.G., *Vysokotochnyy nazimnyy girokompas* (High-accuracy Ground-based Gyrocompass), *Doklady VII Sankt-Peterburgskoi mezhdunarodnoi konferentsii po integrirovannym navigatsionnym sistemam* (Proceedings of the 7th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems), St. Petersburg, 2000, pp. 43–50.
2. Golyaev, Yu.D., Dronov, I.V., and Kolbas, Yu.Yu., *Malogabaritnyy girokompas na kvazichetyrehchastotnom lazernom giroskope* (Small-size Gyrocompass on Quasi-Four-Frequency Laser Gyroscope), *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana, Seriya Priborostroenie*, 2012, No. 3, pp. 112–125.
3. Korkishko, Yu.N., Fedorov, V.A., Prilutskii, V.E., Ponomarev, V.G., Marchuk, V.G., Morev, I.V., Kostritskii, S.M., and Paderin, E.M., *Volonno-opticheskii giroskop navigatsionnogo klassa tochnosti* (Fiber-optic Gyro of Navigation Accuracy Grade), *Гироскопия и навигация*, 2008, No. 1, pp. 71–81.
4. Bychkov, S.I., Lukyanov, D.P., and Bakalyar, A.I., *Lazernyy giroskop* (Laser Gyro), *Sovetskoe radio*, 1975. 424 p.

5. **Enin, V.N., and Kvetkin, G.A.**, *Dinamicheskie vozmushcheniya lazernogo girometra s vibratsionnym podvesom* (Dynamic Dithering of Laser Gyrometer with Vibrational Suspension), *Voprosy oboronnoi tekhniki*, 2010, Series 9, No. 3-4, pp 108–115.
6. **Kolomiitsev, Yu.V., and Novikova, I.V.**, *Interferentsionnye metody izmereniya uglov* (Interference Methods of Angles Measurement), *Ref. Obzor*, No. 1920, 1978.
7. **Afnas'ev, V.A.**, *Opticheskie izmereniya* (Optical Measurements), Moscow, Nedra, 1968.
8. **ISTOK-EOS** [Online], Girocompass 9A 184, URL: [https://ru/navigac/9A\\_184.html](https://ru/navigac/9A_184.html)
9. **Kolbas, Yu.Yu.**, *Girokompas na osnove zeemanovskogo kol'tsevogo lazera* (Gyrocompass Based on Zeeman Ring Laser), Diss. Cand. Eng. Sc., Moscow, 2011.
10. **Paturel, Y., Willemenot, E., and Urgell, A.**, *Volokonno-opticheskiegiroskopy firmy IXSEA i sistemy na ikh osnove* (FOG Technology and FOG-Based Systems: An Industrial Reality at Ixsea), *Giroskopiya i navigatsiya*, 2004, No. 3, pp 53–61.
11. **Tanaka, T., Igarashi, Y., Nara, M., and Yoshino, T.**, Automatic North Sensor Using a Fiber Optic Gyroscope, *Applied Optics*, 1994, vol. 33, pp. 120–123.

Материал поступил 16.03.2017