

ПОГРЕШНОСТИ БЕСПЛАТФОРМЕННОГО ГИРОКОМПАСА ДЛЯ ОБЪЕКТОВ С НЕОГРАНИЧЕННЫМИ УГЛАМИ ПОВОРОТОВ *

П. К. Плотников¹, А. В. Михеев², С. Г. Наумов³

Саратовский государственный технический университет имени Ю.А.Гагарина,
Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, каф. «Приборостроение»,
E-mail: pribor@sstu.ru, тел. 8452-99-88-47

Аннотация

Ключевые слова: гироскоп, бесплатформенная инерциальная навигационная система, погрешности, кватернионы

Построены дифференциальные уравнения БГК в кватернионных параметрах, приведенные к осям горизонтного базиса, с горизонтальной коррекцией от акселерометров и настройкой на частоту Шулера. Выведены и проанализированы уравнения ошибок БГК. На основе опытного образца БГК, созданного на базе ООО НПК «Оптолинк», проведены экспериментальные исследования на неподвижном основании и на борту подвижного объекта, подтвердившие работоспособность разработанных алгоритмов.

Введение

Бесплатформенные гироскопы (БГК) находят широкое применение на наземных, воздушных, морских подвижных объектах (ПО). Значительную роль в их использовании играют точность формирования выходных параметров и их конечная стоимость. Бесплатформенный гироскопический компас реализуется на основе БИНС, поэтому описание процесса функционирования БГК в значительной степени базируется на теории инерциальных систем ориентации и навигации. Гироскопы на основе БИНС имеют методические погрешности, а также инструментальные, которые в основном определяются погрешностями датчиков первичной информации. Методические погрешности связаны с алгоритмами функционирования БГК, вследствие чего возникает необходимость исследования особенностей их работы с целью повышения точности определения угла курса. Инструментальные погрешности датчиков также требуют внимательного исследования, поскольку вносят значительный вклад в формирование погрешностей БГК. Однако в условиях отсутствия возможности привлечения дополнительной внешней информации (автономный БГК) возникают значительные сложности в идентификации инструментальных погрешностей. Тем не менее остается возможность повышения точности БГК за счет применения алгоритмических решений на различных этапах его работы.

Актуальность темы обусловлена необходимостью определять угол курса на подвижных объектах с неограниченными углами поворотов. Например, в гироинclinометрах, в штреках, шахтах, трубах с вертикальными и горизонтальными участками, в подвижных роботах и т.д. Имеющиеся гироскопы, в которых используются углы Эйлера-Крылова, либо кинематические уравнения Эйлера не обеспечивают решения этой задачи. В данном докладе применены кватернионные кинематические уравнения [1-3] в качестве алгоритмов работы бесплатформенного гироскопа, с помощью которых решается задача.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований

Бесплатформенный гироскоп реализуется на основе БИНС, поэтому описание процесса его функционирования в значительной степени базируется на их теории. Ввиду того, что математические модели и алгоритмическое обеспечение гироскопов являются коммерческой собственностью и не подлежат публикации, возникает необходимость разработки собственных новых типов алгоритмов его работы. Элементную базу составляют три ВОГа замкнутого типа, три кварцевых акселерометра, высокопроизводительный бортовой вычислитель.

Цель работы: вывод уравнений погрешностей бесплатформенного гироскопа на основе кватернионных корректируемых дифференциальных уравнений с настройкой на частоту Шулера. Используются кватернионные уравнения, обладающие важным свойством невырождаемости решения, в противовес классическим кинематическим уравнениям Эйлера.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

– развиты математическая модель и алгоритмы функционирования канала курса в БИНС с введением в них членов коррекции от акселерометров для моделирования горизонта и определения угла курса;

¹ Доктор технических наук, профессор кафедры.

² Ассистент кафедры.

³ Кандидат технических наук, доцент кафедры.

- построен алгоритм начальной выставки гироскопа;
- выведены уравнения погрешностей.

Применены дифференциальные уравнения бесплатформенного гироскопа в кватернионных параметрах, приведенные к осям горизонтного базиса, с горизонтальной коррекцией от акселерометров и настройкой на частоту Шулера, устраняющую баллистические погрешности от действия горизонтальных ускорений [4]. В силу этого на борту подвижного объекта в бортовом компьютере моделируется горизонтная система координат и обеспечивается избирательность одной из осей горизонтного трехгранника к направлению на Север (на неподвижном основании) или к направлению вектора угловой скорости географического трехгранника, лежащего в плоскости горизонта на подвижном объекте.

Члены горизонтальной коррекции обеспечивают приведение моделируемого в бортовом компьютере горизонтного трехгранника к плоскости горизонта, при этом по углам отклонения от плоскости горизонта имеется обратная связь. В режиме начальной выставки и нормального функционирования обеспечены условия Шулера, накопления ошибок от постоянных сдвигов нулей трехкомпонентного гироскопического измерителя угловой скорости и трехкомпонентного измерителя кажущихся ускорений нет. В то же время по каналу азимута система разомкнута, постоянные угловые скорости дрейфов трехкомпонентного гироскопического измерителя угловой скорости приводят к накоплению ошибок в оценке угла рыскания. Непрерывно производится определение оценок текущих углов рыскания, тангажа, крена и курса по тригонометрическим формулам на основе кватернионных компонентов, которые поступают в блок навигации и в каналы управления подвижных объектов.

Вычисление угла курса строится на основе формулы $\Psi = \psi + \Psi_K$, где Ψ_K – угол, на который повернута горизонтная ортодромическая сопровождающая СК $O\eta$ относительно географической сопровождающей СК $O\zeta$. Тогда оценка угла курса

$$\hat{\Psi} = \hat{\psi} + \hat{\Psi}_K, \quad \text{tg} \hat{\Psi}_K = \frac{-\omega_{\eta 3}^k}{-\omega_{\eta 1}^k},$$

где $\hat{\Psi}_K$ – оценка угла Ψ_K ; $\omega_{\eta 1}^k, \omega_{\eta 3}^k$ – угловые скорости коррекции, приведенным к осям горизонтного базиса.

В том случае, когда имеется угловое движение подвижного объекта, его влияние устраняется с точностью до ошибок моделируемого горизонтного трехгранника путем пересчета угловых скоростей и ускорений к плоскости горизонта. Это же необходимо и для обеспечения условий Шулера.

Начальная широта определяется по сигналам измерителей угловой скорости и кажущихся ускорений при начальной выставке. Начальная выставка производится для подвижного объекта, неподвижного относительно Земли. В том числе определяется оценка угла текущей широты места, которая в процессе работы используется для введения азимутальной коррекции в алгоритмы ориентации.

Работа гироскопа складывается из трех основных режимов (начальная выставка по тригонометрическим формулам, ускоренная выставка по дифференциальным уравнениям и непосредственно рабочий режим), поэтому требуется проведение анализа погрешностей автономного гироскопа на каждом этапе по отдельности.

Погрешности БГК $\Delta\Psi, \Delta\theta, \Delta\gamma$ (по углам курса, тангажа и крена соответственно) на этапе начальной выставки по тригонометрическим алгоритмам напрямую зависят от инструментальных и методических погрешностей датчиков (гироскопов и акселерометров) и определяются на основе варьирования выражений для начальной выставки. Формулы для погрешностей в осях географической СК имеют вид:

$$\Delta\Psi = \Delta\Psi_K = \frac{\Delta\omega_{\zeta 3}}{U \cos \varphi} + \frac{\Delta W_{\zeta 3} \cos \Psi \text{tg} \theta}{g} + \frac{\Delta W_{\zeta 1} \sin \Psi \text{tg} \theta}{g} \text{tg} \varphi - \frac{\Delta W_{\zeta 3}}{g} \text{tg} \varphi,$$

$$\Delta\theta = \frac{\Delta W_{\zeta 1} \cos \Psi - \Delta W_{\zeta 3} \sin \Psi}{g}, \quad \Delta\gamma = -\frac{\Delta W_{\zeta 3} \cos \Psi + \Delta W_{\zeta 1} \sin \Psi}{g \cos \theta},$$

где $\Delta\omega_{\zeta i}, \Delta W_{\zeta i}$ ($i = 1, 2, 3$) – угловые скорости дрейфов ВОГ и сдвиги нулевых сигналов акселерометров; приведенные к географической СК; U – угловая скорость вращения Земли; φ – широта места.

На данном этапе важную роль играет фильтрация сигналов датчиков, поскольку за счет этого значительно снижается влияние шумовых составляющих выходных сигналов гироскопов и акселерометров. В результате повышается повторяемость выходных параметров БГК от запуска к запуску.

Погрешность выработки угла курса в рабочем режиме зависит от погрешности определения горизонтальных составляющих скорости $\Delta v_{\zeta 1}$ и $\Delta v_{\zeta 3}$, погрешности определения угла широты $\Delta\varphi$, неточности

определения вертикали места α_ζ и χ_ζ , а также от вертикальной составляющей угловой скорости дрейфа гироскопов в географической СК.

Погрешность БГК в рабочем режиме определяется на основе уравнения

$$\Delta\Psi_K = \frac{R(v_{\zeta 3} + RU \cos \varphi)(\dot{\chi}_\zeta - \alpha_\zeta U \sin \varphi - \alpha_\zeta v_{\zeta 3} t g \varphi / R + \Delta\omega_{\zeta 3})}{v_{\zeta 1}^2 + v_{\zeta 3}^2 + RU \cos \varphi (2v_{\zeta 3} + RU \cos \varphi)} +$$

$$\frac{Rv_{\zeta 1}(\dot{\alpha}_\zeta + \chi_\zeta U \sin \varphi + \chi_\zeta v_{\zeta 3} t g \varphi / R + \Delta\omega_{\zeta 1})}{v_{\zeta 1}^2 + v_{\zeta 3}^2 + RU \cos \varphi (2v_{\zeta 3} + RU \cos \varphi)} - \Delta\psi + (\alpha_\zeta \cos \Psi - \chi_\zeta \sin \Psi) \tan \theta.$$

Значительный вклад вносит компонента при восточной составляющей угловой скорости дрейфа. При наличии постоянной скорости оказывает влияние компонента при северной составляющей угловой скорости дрейфа, эффект от которой тем выше, чем больше значение горизонтальные проекции относительной скорости. Кроме того, оказывает заметное влияние погрешность горизонтирования.

В лабораторных условиях определялись статические характеристики БГК по углам курса $\hat{\Psi}$, тангажа $\hat{\theta}$ и крена $\hat{\gamma}$. Для этих целей БГК был установлен на платформе поворотного стола КПА-5, выставленной в плоскость горизонта с точностью до $6'$, а продольная ось прибора совмещалась с направлением на север с погрешностью не более $0,1^\circ$, и из исходного положения трехкратно производились повороты платформы поочередно по всем трем углам. Осредненная величина погрешности статической характеристики по углу $\hat{\Psi}$ представлена на рис. 1, при этом $\max \Delta\Psi = 0,34^\circ$.

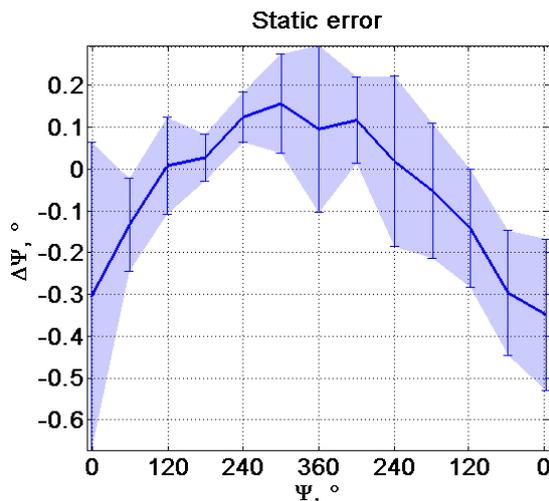


Рис. 1. Погрешность статической характеристики БГК

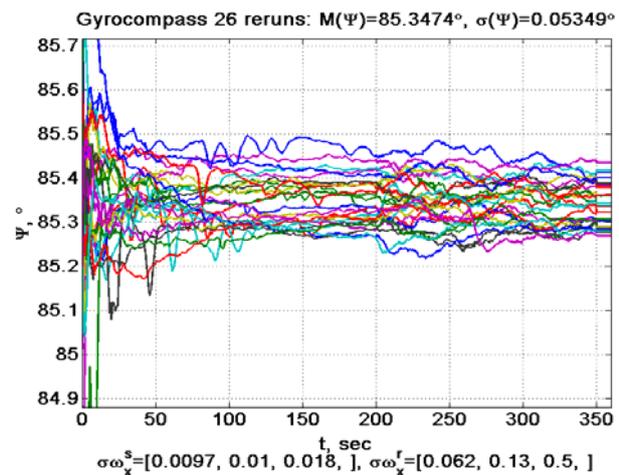


Рис. 2. Повторяемость показаний БГК при перезапусках

Производилась оценка повторяемости показаний БГК от запуска к запуску. В серии из 26 перезапусков в статических условиях разброс при вычислении угла курса (рис. 2) составил $0,3^\circ$ ($\sigma_\Psi = 0,054^\circ$). СКО шума гироскопов при этом составляло $\sigma\omega_x = 0,06 \div 0,5^\circ/\text{ч}$ ($\sigma\omega_x = 0,01 \div 0,02^\circ/\text{ч}$ после фильтрации скользящим средним).

Заключение

Развита математическая модель БГК за счет алгоритмов гирокомпасирования в виде отношения восточной и северной компонент горизонтальной коррекции, введенных в кватернионные дифференциальные уравнения.

Выведены уравнения ошибок БГК, анализ которых показал, что наибольший вклад в погрешность определения угла курса вносят угловая скорость дрейфа по восточной оси, неточная начальная выставка (угол погрешности горизонтирования моделируемой географической СК), а также, при наличии движения ПО, возрастает влияние угловой скорости дрейфа по северной оси. Кроме того, значительных величин достигает скоростная погрешность.

Проведены экспериментальные исследования с опытным образцом БГК с предложенными алгоритмами гирокомпасирования, подтвердившие теоретические предпосылки работы.

Литература

1. **Плотников, П.К.** Элементы теории работы одной разновидности бесплатформенных инерциальных систем ориентации // Гироскопия и навигация. -1999. -№4. -с. 23-35.
2. **Плотников, П. К.** Построение и анализ кватернионных дифференциальных уравнений задачи определения ориентации твердого тела с помощью бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Изв. РАН Механика твердого тела. – 1999. – № 2 (26). – С. 3–14.
3. **Челноков Ю.Н.** Кватернионные модели и методы динамики, навигации и управления движением. - М.: Физматлит, 2011. – 556 с.
4. **Михеев, А. В.** Исследование погрешностей бесплатформенного инерциального гироскопа на основе трех гироскопических измерителей угловой скорости и трех измерителей кажущегося ускорения / Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.11.03 / Алексей Владимирович Михеев. – Саратов, 2012. – 20 с.