

Б. В. КЛИМКОВИЧ

МЕТОД АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ПОГРЕШНОСТИ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ КОЛЬЦЕВОГО ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА С ВИБРОПОДСТАВКОЙ

Рассматривается способ алгоритмической коррекции погрешности углового положения кольцевого лазерного гироскопа с виброподставкой без датчика углового положения. Показано, что при применении указанной коррекции точность углового положения не уступает точности, определенной с применением датчика углового положения.

Введение

В бесплатформенных системах инерциальной навигации кольцевые лазерные гироскопы (КЛГ) находят широкое применение, однако существует проблема их использования, обусловленная наличием захвата встречных мод и применением для подавления этого эффекта механической виброподставки.

Устранение влияния захвата встречных мод с помощью виброподставки накладывает требование вычитания (списания) этого дополнительного колебательного вращения гироскопа в целях определения углового положения основания, связанного с корпусом бесплатформенного блока инерциальной навигации. Как правило, для этого применяются либо датчик углового положения (ДУП), либо датчик угловой скорости (ДУС). Назначение ДУП состоит в определении моментов времени перемены знака интерференционного биения встречных мод кольцевого лазерного гироскопа (КЛГ). Разница числа интерференционных колебаний на прямом и обратном ходе виброподставки определяет изменение углового положения основания [1].

Альтернативным вариантом списания виброподставки может быть применение сдвоенного фотодатчика со смещением одного фотоприемника относительно другого на четверть длины интерференционной картины. Усиленные и оцифрованные компараторами сигналы с двух фотоприемников, проходя через триггер, вырабатывают сигнал изменения направления вращения КЛГ относительно инерциального пространства. В отличие от ДУП в этом случае списание проводится не при нулевом угловом положении гироскопа относительно основания, а при нулевой угловой скорости относительно инерциального пространства [2].

В работе [3] показано, однако, что в этот метод имеет существенный недостаток, состоящий в наличии дополнительной ошибки определения углового положения основания, связанной с изменением амплитуды колебательного вращения виброподставки (ошумлением амплитуды для подавления явления захвата встречных мод) и изменением величины угловой скорости основания. Традиционное применение в этом случае реверсивного счетчика для подсчета интерференционных колебаний на прямом и обратном ходе виброподставки приводит к дополнительной ошибке в угловом положении основания. В большей степени это проявляется при конусном движении бесплатформенного блока инерциальной навигации.

Климкович Борис Владимирович. Кандидат физико-математических наук, начальник отдела УП «СКБ Камертон» (Минск, Белоруссия).

Цель настоящей статьи состоит в разработке способа алгоритмической коррекции дополнительной ошибки определения углового положения основания, связанной с изменением амплитуды колебательного вращения виброподставки и изменением величины угловой скорости основания в реальном масштабе времени. Для этого подсчет интерференционных колебаний на прямом и обратном ходе виброподставки необходимо проводить с помощью быстродействующего цифрового сигнального процессора (ЦСП) с одновременной коррекцией указанной выше дополнительной ошибки.

Преимуществом использования ЦСП в блоках обработки информации и управления работой КЛГ является возможность нахождения программным способом механического резонанса виброподставки и его поддержания, стабилизации и ошумления ее амплитуды. Кроме того, обеспечиваются поиск оптической моды лазерного излучения и поддержание периметра кольцевого лазера, обеспечивающего максимальное излучение, а также управление усилением сигнала с фотодатчика.

Такая гибкость использования ЦСП позволяет с одной стороны значительно упростить электронику блока обработки информации и управления работой КЛГ, а с другой – использовать новые (более совершенные) методы ошумления виброподставки [2] и коррекции получаемого с КЛГ значения углового положения.

Алгоритм коррекции погрешности углового положения кольцевого лазерного гироскопа

Для анализа предлагаемого способа рассмотрим основное уравнение работы КЛГ [4-6]

$$\frac{\partial}{\partial t} \Psi = 2\pi M (\Omega_0(t) + \Omega_p(t) \sin(\omega_p t) + \Omega_1 \sin(\Psi) + \Omega_2 \cos(\Psi)), \quad (1)$$

где Ψ – разность фаз встречных мод кольцевого лазера; M – масштабный коэффициент кольцевого лазера ($\sim 10^5$); $\Omega_0(t)$ – угловая скорость основания; $\Omega_p(t)$, ω_p – амплитуда угловой скорости и круговая частота виброподставки (p – подставка), Ω_1 , Ω_2 – вещественная и мнимая части комплексной амплитуды взаимодействия встречных мод. В настоящей статье не рассматривается алгоритмическая коррекция ошибки, имеющей вид винеровского процесса (random walk), которая связана с двумя последними слагаемыми уравнения (1) и обусловлена прохождением гироскопа через точки с нулевой угловой скоростью. Далее предполагается, что $\Omega_1 = \Omega_2 = 0$.

Возьмем интеграл по времени от левой и правой частей уравнения (1) для моментов времени t при четном (с момента начала обработки сигнала) прохождении

точки с нулевой угловой скоростью, учитывая, что $F(t) = \int_0^t \Omega_0(\tau) d\tau$ –

искомое угловое положение основания, $N(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^t \frac{\partial}{\partial \tau} \Psi(\tau) d\tau$ – число импульсов

интерференционных биений встречных мод, насчитанных к моменту времени t с учетом перемены знака.

Интеграл от второго слагаемого в уравнении (1) представим в виде

$$\int_0^t \Omega_p(\tau) \sin(\omega_p \tau) d\tau = \int_0^{2\pi n} A(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi - Error \equiv I - Error ,$$

где $A(\varphi) = \Omega_p / \omega_p$, а слагаемое $Error$ обусловлено несовпадением моментов времени $2\pi n / \omega_p$ ($n=0,1,2, \dots$) с моментами времени при четном прохождении точки с нулевой угловой скоростью при $\Omega_0(t) \neq 0$.

Интеграл I возьмем по частям:

$$I = \sum_{j=0}^{\infty} (-1)^{j+1} \frac{\partial^{2j}}{\partial \varphi^{2j}} A(\varphi) \Big|_0^{2\pi n} = -A(2\pi n) + A(0) + \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} A(2\pi n) - \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} A(0) + \dots \quad (2)$$

Для дальнейшего рассмотрения важно уточнить характер поведения функций $\Omega_0(t)$ и $A(\varphi)$.

Функция $\Omega_0(t)$ определяет скорость изменения углового положения объекта, на котором установлена система инерциальной навигации. Поскольку наличие вибрационной составляющей в движении объекта не влияет на его положение и ориентацию как целого, следует считать функцию $\Omega_0(t)$ медленно меняющейся за период колебания виброподставки КЛГ (350-400 Гц).

Функция $A(\varphi)$ изменяется в связи с дополнительным ошумлением амплитуды колебания для уменьшения зоны захвата встречных мод КЛГ. Механическая колебательная система привода виброподставки имеет добротность ($Q \sim 100$), что означает относительное изменение $A(\varphi)$ за период колебаний 2π на величину не более $1/Q \sim 10^{-2}$. Таким образом, в формуле (2) вторые и все последующие четные производные приблизительно на четыре порядка меньше по сравнению с первыми двумя слагаемыми и могут быть отброшены.

Учитывая сказанное выше, запишем

$$F(t) = \frac{N(t)}{M} + \frac{\Omega_p(t) - \Omega_p(0)}{\omega_p} + Error ; \quad (3)$$

Таким образом, определение углового положения основания без применения ДУП требует учета изменения амплитуды колебания привода виброподставки в процессе работы и дополнительной поправки на ненулевую угловую скорость $\Omega_0(t)$.

Доступной для анализа и обработки в ЦСП информацией являются число интерференционных биений между последовательными моментами прохождения КЛГ нулевой угловой скорости. Для практического применения формулы (3) необходимо получить выражение для оценки амплитуды $\Omega_p(t)$ и угловой скорости основания $\Omega_0(t)$ по двум последовательным количествам биений N_1 и N_2 .

Проинтегрируем выражение (1) между временами $t_0 - t_1$ и $t_1 - t_2$, где t_0, t_1, t_2 – следующие подряд времена обращения в ноль левой части уравнения (1):

$$N_1 / M = \Omega_0(t_1 - t_0) + \frac{\Omega_p}{\omega_p} (\cos(\omega_p t_0) - \cos(\omega_p t_1)) ; \quad (4)$$

$$N_2 / M = \Omega_0(t_2 - t_1) + \frac{\Omega_p}{\omega_p} (\cos(\omega_p t_1) - \cos(\omega_p t_2)) . \quad (5)$$

Условие нулевой угловой скорости при временах t_0, t_1, t_2 дают уравнения:

$$\Omega_0 = -\Omega_p \sin(\omega_p t_0) ; \Omega_0 = -\Omega_p \sin(\omega_p t_1) ; \Omega_0 = -\Omega_p \sin(\omega_p t_2) . \quad (6)$$

Складывая и вычитая уравнения (4), (5) с учетом уравнений (6) получим:

$$\Omega_0 = \omega_p \frac{(N_1 + N_2)}{2\pi M}; \quad (7)$$

$$\Omega_p = \omega_p \frac{(N_1 - N_2)}{4M(\sqrt{1-x^2} + x \arcsin(x))}, \quad (8)$$

где $x = \frac{\Omega_0}{\Omega_p} < 1$.

Следует отметить, что числа N_1 и N_2 имеют противоположные знаки, поэтому введем обозначения:

$$dN = |N_1| - |N_2|; \quad N = |N_1| + |N_2|,$$

где dN – разность чисел интерференционных биений по положительной и отрицательной полуволне за период колебания виброподставки, N – общее число интерференционных биений за период виброподставки.

Учитывая малость параметра x и разлагая выражение (8) в ряд (содержащий только четные степени x) получим оценку двух последних слагаемых в уравнении (3), определяющих коррекцию углового положения основания с учетом изменения амплитуды колебаний виброподставки и изменения скорости вращения основания:

$$F(t) = \frac{1}{M}(N(t) + \frac{N - N_0}{4} - \beta(N_0)X^2), \quad (9)$$

где N_0 – среднее число интерференционных биений за период виброподставки (постоянная величина, относительно которой ЦСП автоматически поддержива-

ет амплитуду колебаний); $X = \frac{dN}{N}$, $\beta(N_0)$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от среднего числа интерференционных биений N_0 .

Было проведено численное моделирование рассматриваемого алгоритма списания виброподставки в целях проверки его эффективности и определения зависимости $\beta(N_0)$. Расчет проводился для привода виброподставки с резонансной частотой 370 Гц и добротностью $Q=95$. Средняя амплитуда колебаний варьировалась от 2 до 6 угл. мин. Ошумление амплитуды виброподставки проводилось введением псевдослучайной составляющей в возбуждающий виброподставку сигнал. Масштабный коэффициент КЛГ принят $M=10^5$.

Тестовое движение основания при моделировании состояло в следующем: до первой секунды основание не вращалось ($\Omega_0(t) = 0$), после первой секунды основание совершало колебательное вращение с частотой 1 Гц.

На рис. 1 представлена одна из случайных реализаций ошумления амплитуды виброподставки. По оси Y отложена разница в радианах между точным (заданным) и вычисленным по формуле (9) угловым положением основания, умноженная на 10^5 . Линия 1 на рис. 1 – без учета корректирующих поправок (без двух последних слагаемых в формуле (9)), линия 2 – с учетом поправок.

Среднее квадратичное отклонение (СКО) разницы между точным и определенным КЛГ угловым положением основания с учетом поправок составило $0,15 \times 10^{-5}$ рад, без учета поправок – $1,8 \times 10^{-5}$ рад. Введение поправок снижает на порядок ошибку определения углового положения и делает ее гораздо меньше ошибки углового положения при списании виброподставки с использованием

ДУП (СКО для ДУП равно 1 отсчету интерференционной картины или 1×10^{-5} рад).

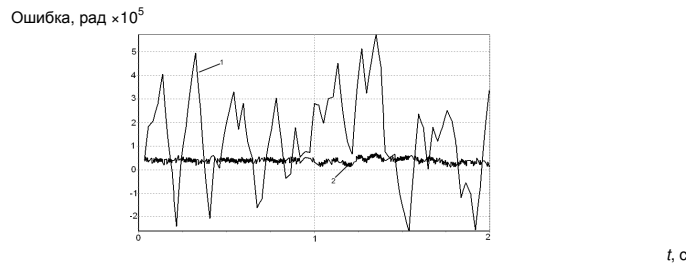


Рис. 1. Зависимость ошибки определения углового положения от времени при модельном движении основания

Расчет при задании различных амплитуд колебаний и минимальном СКО разницы между точным и определенным по данным КЛГ угловым положением основания позволил определить зависимость $\beta(N_0)$ (рис. 2).

Регрессионная обработка результатов численного моделирования дает следующее уравнение:

$$\beta(N_0) = 0,097254N_0 + 2,7571.$$

Следует отметить, что при вычислении X текущее значение dN – разности чисел интерференционных биений за период – содержит значительную шумовую составляющую, не связанную с реальным (достаточно медленным) движением объекта. Поэтому характеризовать величину $\Omega_0(t)$ должна не dN , а ее усредненное значение dN_f , что было учтено при проведении численного моделирования.

С этой целью текущее значение dN по последнему периоду виброподставки пропускалось через программный фильтр нижних частот. Частота среза фильтра должна соответствовать максимальной маневренности транспортного средства, для которого применяется разрабатываемая инерциальная система навигации с лазерным гироскопом. При проведении данной работы применялся фильтр нижних частот второго порядка типа БИХ [7]:

$$dN_f = K_1 dN + K_2 dN_{f-1} + K_3 dN_{f-2},$$

где dN_f – профильтрованное текущее значение разницы отсчетов; dN_{f-1}, dN_{f-2} – профильтрованные значения разницы отсчетов за предыдущие периоды колебаний; K_1, K_2, K_3 – коэффициенты фильтра.

Из рисунка (1) следует, также, что значение углового положения основания, определенное с учетом описанного выше алгоритма имеет постоянное смещение. Знак смещения зависит от знака начального полупериода колебания виброподставки. Поскольку физический смысл имеет только разность угловых положений, постоянное смещение не увеличивает ошибку бесплатформенной системы инерциальной навигации.

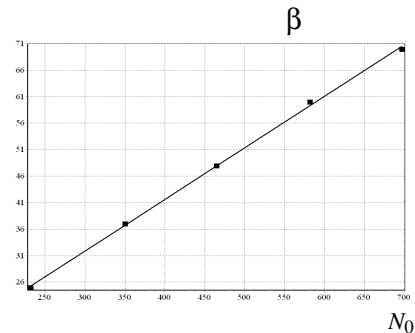


Рис. 2. Зависимость $\beta(N_0)$

Испытания способа алгоритмической коррекции

Описанный выше способ алгоритмической коррекции дополнительной ошибки определения углового положения основания был использован в конструкции бесплатформенной системы инерциальной навигации на одноосных КЛГ с периметром 28 см, предназначенной для использования в наземных транспортных средствах. По вертикальной оси был установлен КЛГ с СКО угловой скорости в запуске 0,029 град/ч по 100-секундному усреднению. Испытания на движущемся в течение часа наземном транспортном средстве проводились при контроле начального и конечного углового положения бесплатформенной системы инерциальной навигации по удаленному ориентиру оптическим прибором с погрешностью $\pm 0.03^\circ$. Контролируемым параметром при испытаниях было значение «ухода» азимута после часа движения наземного транспортного средства («хранение азимута в движении»). Экспериментальное значение погрешности хранения азимута в движении наземного транспортного средства составило 0,039 град/ч.

Заключение

Результаты численного моделирования и натурные испытания бесплатформенной системы инерциальной навигации показывают, что применение алгоритмической коррекции списания виброподставки может обеспечить определение углового положения основания не хуже, чем применение ДУП. В то же время исключается один из аппаратных узлов, что повышает надежность конструкции блока инерциальной навигации и соответствует общей тенденции перехода от аналоговой обработки информации к цифровой.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Titterton, D.H., Weston, J.L.** Strapdown Inertial Navigation Technology -2nd Edition, p.581, 2004.
2. **Лепешкин, Д.В.** Методы оптимизации и уменьшения ошибок лазерного гироскопа. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - М., 2007.
3. **Енин, В.Н.** Лазерные гироскопы для бесплатформенных систем ориентации. Учебное пособие по курсу «Проектирование систем ориентации» / Под ред. Д.С.Пельпора. - МВТУ им.Н.Э.Баумана. -, М., 1988.
4. **Menegozzi, L.N., Lamb, W.E.** Theory of Ring Laser. Physical Review A. v.8, №4, p.2103, 1973.
5. **Aronowitz F.** Fundamentals of the Ring Laser Gyro. In Optical Gyros and their Application (RTO AGAR- Dograph 339, 1999, p.3-1).
6. **Бондаренко, Е.А.** Частотная характеристика равномерно вращающегося лазерного гироскопа с неодинаковым усилением встречных волн. Квантовая электроника 32, №2 с. 160-164, 2002.
7. **Айфичер, Э.** Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е изд. / Э. Айфичер, Б. Джервис / Пер. с англ. - М. Издательский дом «Вильямс», 2004. – 992 с.

Abstract. The way of algorithmic error correction of the angular position of ring laser gyroscope with a dither without an angular position sensor. It is shown that, in applying this correction accuracy of the angular position is not inferior to the method using the angular position sensor.

Key words: algorithmic error correction, ring laser gyroscope, angular position, dither