

© Николаев М.В., Клещенко А.Э.
Nikolaev M., Kleschenko A.

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА БЕЗ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

THE MODE OF INCREASE OF ACCURACY OF OUTPUT SIGNAL OF AN OPEN-LOOP FIBER OPTIC GYROSCOPE

Аннотация. Проведен анализ точности обработки выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа без обратной связи. Показано влияние углового ускорения на ухудшение точностных характеристик. Предложен способ повышения точности обработки выходного сигнала и представлены алгоритмы обработки выходной информации волоконно-оптического гироскопа без обратной связи.

Annotation. The mode of increase of accuracy of output signal of open-loop fiber optic gyroscope is proposed. The analysis of accuracy of processing output a signal of the open-loop fiber optic gyroscope is carried out. Influence of angular acceleration on deterioration of accuracy is shown. The mode of a raise of accuracy of handling of an output signal is offered and algorithms of handling of the output information of an open-loop fiber optic gyroscope are presented.

Ключевые слова. Волоконно-оптический гироскоп, схема без обратной связи, угловая скорость, угловое ускорение.

Key words. Fiber optic gyroscope, open-loop scheme, angular velocity, angular acceleration.

Волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) широко используются в приборах и системах навигации, ориентации и управления подвижными объектами различного назначения. Наибольшее распространение получили схемы, построенные на основе волоконного кольцевого интерферометра. Волоконный кольцевой интерферометр измеряет фазу Саньяка, пропорциональную угловой скорости. В настоящее время используются две основные схемы ВОГ, первые из них построены по разомкнутой схеме, а вторые по замкнутой схеме.

Разомкнутая схема ВОГ или схема ВОГ без обратной связи выполняется по цельноволокновой технологии, что позволяет создавать малогабаритные измерительные системы, обладающие низкой стоимостью, малыми габаритами и высокой точностью.

Существенным недостатком такой схемы является косинусная зависимость выходного сигнала от угловой скорости $\Omega(t)$, ухудшающая чувствительность ВОГ при малых угловых скоростях [1]. Для исключения этого явления косинусная зависимость преобразуется в си-

нусную с использованием пьезоэлектрического модулятора. Однако использование синусной зависимости в разомкнутой схеме ВОГ приводит к существенному росту погрешности масштабного коэффициента с увеличением угловой скорости.

Для анализа возможности уменьшения этой погрешности рассмотрим сначала ВОГ с аналоговым выходом. Напряжение на выходе такого гироскопа имеет вид

$$u(t) = k_u \sin[k_0 \Omega(t)], \quad (1)$$

где k_u – коэффициент передачи электронного тракта аналогового ВОГ;

k_0 – оптический масштабный коэффициент.

Аргументом синуса в выражении (1) является фаза Саньяка $\varphi_c = k_0 \Omega(t)$. Для малых значений фазы Саньяка зависимость выходного напряжения от угловой скорости является линейной

$$u(t) = k_u k_0 \Omega(t). \quad (2)$$

Выходное напряжение ВОГ используется для вычисления оценки угловой скорости. В соответствии с выражениями (1), (2) можно получить два варианта та-

Николаев Михаил Викторович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ФГУП «ЦНИИМаши», тел.(495)513-4053;

Клещенко Александр Эдуардович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, ФКГУ «4 ЦНИИ Минобороны России».

Nikolaev Mikhail – candidate of technical sciences, leading research officer, TSNII Mash, tel.(495)513-4053;

Kleschenko Aleksandr – candidate of technical sciences, senior research officer, leading research officer, FKGU «4 CRI Russian Defense Ministry».

кой оценки.

Точная оценка угловой скорости имеет вид

$$\Omega_{CA}(t) = \frac{1}{k_0} \arcsin\left[\frac{u(t)}{k_u}\right]. \quad (3)$$

Приближенная оценка, применимая для малых значений $k_0\Omega(t)$, определяется выражением

$$\Omega_{CL}(t) = \frac{1}{k_0 k_u} u(t). \quad (4)$$

Следует заметить, что для получения точной оценки угловой скорости в соответствии с формулой (3) требуется операция вычисления арксинуса. Выполнение ее с использованием аналоговых элементов не обеспечивает требуемой точности, к тому же усложняется электронная часть ВОГ. Вычисление приближенной оценки угловой скорости по формуле (4) реализуется просто, но использование ее при больших угловых скоростях приводит к значительному ухудшению точности. Например, для $k_0\Omega(t)=1$ рад относительная погрешность определения угловой скорости составляет около 16%.

В современных системах ориентации и навигации, как правило, используется дискретный выходной сигнал с фиксированным тактом съема информации в виде приращений интеграла угловой скорости [2]

$$\nabla\theta_n = \nabla\theta(t_n) = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \Omega(t)dt. \quad (5)$$

Эти приращения могут быть измерены интегрирующими гироскопами. Однако ВОГ к ним не относится, поэтому величину $\nabla\theta_n$ для волоконно-оптического гироскопа необходимо вычислять.

Выражение (5) связано со средним значением угловой скорости следующим образом:

$$\nabla\theta_n = \Omega_{cпн} \Delta t, \quad (6)$$

где $\Omega_{cпн}$ – среднее значение угловой скорости на такте съема информации (интервал времени $[t_{n-1}, t_n]$).

Для ВОГ с дискретным выходом невозможно определить оценку мгновенного значения угловой скорости. Вместо этого используется среднее значение угловой скорости на интервале измерения.

Электронная часть ВОГ содержит тракт обработки измерительной информации, состоящий из усилителей, вспомогательных устройств и аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). Для определенности далее рассматривается АЦП на основе преобразователя напряжение-частота (ПНЧ). Сигнал на входе счетчика АЦП (выход ПНЧ) имеет вид

$$\frac{\Delta N_n}{\Delta t} = k_d \langle \sin[k_0 \Omega(t)] \rangle, \quad (7)$$

где $\langle \sin[k_0 \Omega(t)] \rangle = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_{n-1}}^{t_n} \sin[k_0 \Omega(t)]dt$ – среднее значение

синуса фазы Саньяка на интервале $[t_{n-1}, t_n]$;

$\Delta t = t_n - t_{n-1}$ – такт съема информации;

ΔN_n – приращение количества импульсов за такт съема информации;

k_d – коэффициент передачи электронного тракта ВОГ с цифровым выходом.

Из выражения (7) можно определить оценку угловой скорости

$$\Omega_{DAn} = \frac{1}{k_0} \arcsin\left(\frac{1}{k_d} \frac{\Delta N_n}{\Delta t}\right). \quad (8)$$

Для малых значений $k_0\Omega(t)$ справедливо соотношение, аналогичное выражению (2)

$$\frac{\Delta N_n}{\Delta t} = k_0 k_d \Omega_{cпн}. \quad (9)$$

Оценка, полученная с использованием формулы (9), имеет вид

$$\Omega_{DLn} = \Omega_{cпн} = \frac{1}{k_0 k_d} \frac{\Delta N_n}{\Delta t}, \quad (10)$$

а приращение количества импульсов на выходе счетчика АЦП за такт съема информации

$$\Delta N_n = \Delta t k_0 k_d \Omega_{cпн}. \quad (11)$$

Из формулы (6) следует, что для получения $\nabla\theta_n$ необходимо вычислить среднюю угловую скорость $\Omega_{cпн}$. Однако при обработке информации в соответствии с формулой (8), полученной из формулы (7), в вычислениях участвует средний синус, аргументом которого является угловая скорость, умноженная на оптический масштабный коэффициент. Поэтому необходимо оценить, насколько отличается угловая скорость, полученная в результате измерения среднего синуса от средней угловой скорости. Рассмотрим случай равномерного углового ускорения, при котором закон изменения угловой скорости от времени имеет вид

$$\Omega_n = \Omega_{n-1} + \dot{\Omega}_{n-1} \Delta t. \quad (12)$$

Приращение угла получается интегрированием этого уравнения

$$\nabla\theta(t_n) = \nabla\theta_n = \Omega_{n-1} \Delta t + \dot{\Omega}_{n-1} \frac{\Delta t^2}{2}, \quad (13)$$

а среднее значение угловой скорости получается в результате деления на такт съема информации

$$\frac{\nabla\theta_n}{\Delta t} = \Omega_{cпн} = \Omega_{n-1} + \dot{\Omega}_{n-1} \frac{\Delta t}{2}. \quad (14)$$

По аналогии с формулой (5) удобно ввести величину фиктивного угла поворота

$$\nabla\xi_n = \nabla\xi(t_n) = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \sin[k_0 \Omega(t)]dt. \quad (15)$$

Разложив подынтегральный синус в ряд Тейлора в окрестности t_{n-1} и проведя интегрирование, формулу (15) можно переписать в виде

$$\frac{\nabla \xi_n}{\Delta t} = \sin(k_0 \Omega_{n-1}) + k_0 \cos(k_0 \Omega_{n-1}) \dot{\Omega}_{n-1} \frac{\Delta t}{2}. \quad (16)$$

Теперь необходимо найти соотношение

$$\frac{\nabla \xi_n(\Omega_{\text{срн}})}{\Delta t} = \sin(k_0 \Omega_{\text{срн}}), \quad (17)$$

которое с использованием выражений (14), (17) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \frac{\nabla \xi_n(\Omega_{\text{срн}})}{\Delta t} &= \sin(k_0 \Omega_{n-1}) \cos(k_0 \dot{\Omega}_{n-1} \frac{\Delta t}{2}) + \\ &+ \cos(k_0 \Omega_{n-1}) \sin(k_0 \dot{\Omega}_{n-1} \frac{\Delta t}{2}). \end{aligned} \quad (18)$$

Выражения (17), (18) определяют искомую оценку угловой скорости

$$\Omega_{\text{Дсрн}} = \frac{1}{k_0} \arcsin\left[\frac{\nabla \xi_n(\Omega_{\text{срн}})}{\Delta t}\right]. \quad (19)$$

Формула (19) позволяет вычислить точную оценку угловой скорости. Однако при работе ВОГ нет возможности непосредственно измерять величину $\nabla \xi_n(\Omega_{\text{срн}})/\Delta t$, а известна только величина $\nabla \xi_n/\Delta t$, определяемая выражением (16). Разница между этими двумя значениями является компенсационной поправкой

$$D_n = \frac{\nabla \xi_n}{\Delta t} - \frac{\nabla \xi_n(\Omega_{\text{срн}})}{\Delta t}. \quad (20)$$

Подставляя в это выражение формулы (16), (18) с разложением в ряд Тейлора выражений для синуса и косинуса, содержащих в качестве аргумента величину углового ускорения, можно получить

$$\begin{aligned} D_n &= \sin(k_0 \Omega_{n-1}) \frac{k_0^2 \dot{\Omega}_{n-1}^2 \Delta t^2}{8} + \\ &+ \cos(k_0 \Omega_{n-1}) \frac{k_0^3 \dot{\Omega}_{n-1}^3 \Delta t^3}{48}. \end{aligned} \quad (21)$$

В современных системах навигации и ориентации величина такта Δt выбирается малой и лежит обычно в диапазоне от 0,01с до 0,1с. В связи с этим вторым членом формулы (21) можно пренебречь и записать

$$D_n = \sin(k_0 \Omega_{n-1}) \frac{k_0^2 \dot{\Omega}_{n-1}^2 \Delta t^2}{8}. \quad (22)$$

Величина компенсационной поправки характеризует отклонение средней угловой скорости от угловой скорости, вычисляемой через средний синус. Учитывая тот факт, что для малых углов синус угла равен самому углу, а также арксинусу этого угла, величина D_n определяет отклонение вычисленной угловой скорости в соответствии с алгоритмом (8) от средней. Например, для $k_0=1с$, $\Omega_0=1\text{рад/с}$, $\Omega=0,1\text{рад/с}^2$, $\Delta t=0,1с$ получим отклонение равное 2 град/ч. Для высокоточных систем ориен-

тации и навигации такая величина не является приемлемой. Поэтому возникает задача построения алгоритмов вычисления угловой скорости и приращения угла $\nabla \theta_n$ с учетом компенсационной поправки. Для этого выражение (20) необходимо переписать в виде

$$\frac{\nabla \xi_n(\Omega_{\text{срн}})}{\Delta t} = \frac{\nabla \xi_n}{\Delta t} - D_n. \quad (23)$$

Вычисление величины $\nabla \xi_n(\Omega_{\text{срн}})/\Delta t$ осуществляется на основании количества импульсов ΔN_n , а для определения компенсационной поправки D_n используется оценка углового ускорения. Ее можно вычислить, зная приращения углов на текущем и предыдущем тактах съема информации

$$\dot{\Omega}_n = \frac{\nabla \theta_n - \nabla \theta_{n-1}}{\Delta t^2}. \quad (24)$$

На основе представленных математических соотношений можно записать три алгоритма оценки выходных параметров ВОГ.

1. Линейный алгоритм.

Основан на использовании выражения (10) и включает следующую последовательность действий.

1.1. На основе приращения количества импульсов ΔN_n вычисляется оценка угловой скорости

$$\Omega_{\text{DLn}} = \frac{1}{k_0 k_d} \frac{\Delta N_n}{\Delta t}. \quad (25)$$

1.2. Вычисляется приращение угла

$$\nabla \theta_{\text{DLn}} = \Omega_{\text{DLn}} \Delta t. \quad (26)$$

Достоинством алгоритма является простота, а недостатком низкая точность. Поэтому такой алгоритм можно применять только в области малых угловых скоростей, для которых с высокой точностью выполняется условие равенства синуса фазы Саньяка самой фазе Саньяка.

2. Алгоритм на основе арксинуса без компенсации.

В основе этого алгоритма лежат соотношения (7), (8) и (15). Выполняются следующие операции.

2.1. Вычисляется вспомогательная величина

$$\frac{\nabla \xi_n}{\Delta t} = \frac{1}{k_d} \frac{\Delta N_n}{\Delta t}. \quad (27)$$

2.2. Вычисляется оценка угловой скорости с использованием этой величины

$$\Omega_{\text{DAn}} = \frac{1}{k_0} \arcsin\left(\frac{\nabla \xi_n}{\Delta t}\right). \quad (28)$$

2.3. Вычисляется приращение угла

$$\nabla \theta_{\text{DAn}} = \Omega_{\text{DAn}} \Delta t. \quad (29)$$

Данный алгоритм дает более высокую точность по сравнению с предыдущим и применим в широком диапазоне угловых скоростей, при этом модуль фазы Саньяка может достигать величины 1 рад. Недостатком алгоритма является погрешность при наличии углового

ускорения по оси чувствительности ВОГ.

3. Алгоритм на основе арксинуса с вычислением компенсационной поправки.

При разработке этого алгоритма использованы формулы (7), (15), (19), (22), (23), (24), а последовательность шагов алгоритма следующая.

3.1. Вычисляется среднее значение фиктивного угла

$$\frac{\nabla \xi_n}{\Delta t} = \frac{1}{k_d} \frac{\Delta N_n}{\Delta t}. \quad (30)$$

3.2. Вычисляется оценка углового ускорения по формуле

$$\dot{\Omega}_n = \frac{\nabla \theta_n - \nabla \theta_{n-1}}{\Delta t^2}. \quad (31)$$

3.3. Вычисляется величина компенсационной поправки

$$D_n = \sin(k_0 \Omega_{n-1}) \frac{k_0^2 \dot{\Omega}_{n-1}^2 \Delta t^2}{8}. \quad (32)$$

3.4. Вычисляется значение фиктивного угла, соответствующего

$$\frac{\nabla \xi_n(\Omega_{cpn})}{\Delta t} = \frac{\nabla \xi_n}{\Delta t} - D_n. \quad (33)$$

3.5. Вычисляется оценка угловой скорости

$$\Omega_{DAPn} = \frac{1}{k_n} \arcsin\left[\frac{\nabla \xi_n(\Omega_{cpn})}{\Delta t}\right]. \quad (34)$$

3.6. Вычисляется приращение угла

$$\nabla \theta_{DAPn} = \Omega_{DAPn} \Delta t. \quad (35)$$

Алгоритм на основе арксинуса с вычислением компенсационной поправки является самым точным из рассмотренных и позволяет обеспечить заданные характеристики ВОГ в широком диапазоне угловых скоростей и угловых ускорений. Данный алгоритм может быть рекомендован к применению в бесплатформенных инерциальных навигационных системах высокоманевренных объектов.

Заключение

В статье получен способ повышения точности обработки выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа без обратной связи с дискретным выходом. Рассмотрены три варианта алгоритмов, отличающихся вычислительной сложностью и достигаемой точностью. Анализ этих алгоритмов показывает, что в условиях воздействия углового ускорения возникает погрешность вычисления угловой скорости, величина которой может достигать нескольких градусов в час. Предложен алгоритм вычисления угловой скорости, позволяющий улучшить точность вычисления оценки угловой скорости в условиях действия угловых ускорений объекта.

Отличительная черта этого способа состоит в том, что он использует вычисляемую компенсационную поправку на основе информации о приращениях углов в предыдущие моменты времени.

Литература

1. Шереметьев А.Г. Волоконный оптический гироскоп. М.: Радио и связь, 1987. – 152 с.
2. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992. – 280 с.

Материал поступил в редакцию 21. 09. 2014 г.