

07,12

Методика определения погрешности статического волоконно-оптического гироскопа

© И.А. Матисов, В.Е. Стригалева, В.А. Николаев, Ю.В. Иванов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича, 191186 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 4 сентября 1996 г.)

Проведен теоретический анализ зависимости влияния собственного шума и дрейфа сигнала ВОГ на точность статической схемы гироскопа и предложена методика экспериментального определения погрешности гироскопа и выбора оптимального алгоритма измерения сигнала ВОГ и расчета угла относительно направления на север. Реально измеренная точность действующей модели гироскопа составила величину порядка 1° (СКО).

Введение

Существует схема гироскопа, использующая волоконно-оптический гироскоп (ВОГ), которую условно можно назвать статической [1,2]. Высокочувствительный ВОГ регистрирует проекцию вектора вращения Земли на вектор чувствительности ВОГ, и по этому сигналу определяется угол относительно направления на север. ВОГ устанавливается на поворотную платформу так, что его вектор чувствительности при любом повороте платформы лежит в плоскости горизонта. Угол поворота платформы контролируется с точностью, большей чем требуемая точность определения угла относительно направления на север. Платформа и установленный на ней ВОГ разворачиваются по специальному алгоритму на фиксированные углы. После каждого поворота осуществляется измерение сигнала ВОГ и с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) измеренное значение вводится в компьютер, где вычисляется угол относительно направления на север.

Нами опубликован сравнительный анализ алгоритмов вычисления угла относительно направления на север [3]. Сравнение алгоритмов проводилось теоретически по параметру среднеквадратичной ошибки вычисления угла с учетом влияния на точность только собственного шума ВОГ. При этом дрейф выходного сигнала ВОГ предполагался либо отсутствующим, либо предполагалось, что его можно аппроксимировать линейной или квадратичной функцией, а значит, можно рассчитать отдельно, используя дополнительные измерения сигнала ВОГ, а затем учесть в вычислениях угла. Дрейф выходного сигнала ВОГ в общем случае — непредсказуемая функция времени, неподдающаяся однозначной аппроксимации, а значит, точный расчет его невозможен.

Целью данной работы было исследование совместного влияния собственного шума и дрейфа сигнала ВОГ на точность статической схемы гироскопа и предложение методики определения погрешности действующей схемы.

Влияние характеристик ВОГ на точность статической схемы гироскопа

Известны несколько алгоритмов измерения сигнала ВОГ и расчета угла относительно направления на север [1,4], позволяющих учесть наличие постоянного смещения выходного напряжения высокочувствительного ВОГ. Для этого предлагается последовательное измерение сигнала ВОГ три раза с поворотом ВОГ между измерениями. В первом методе шаг поворота 90° [1], во втором 120° [4]. В работе [3] показано, что при учете только собственного шума ВОГ первый алгоритм позволяет получить большую точность вычисления угла. Очевидно, что использование этого метода предпочтительнее с точки зрения уменьшения полного времени измерения, что означает также уменьшение влияния на точность измерения дрейфа сигнала ВОГ. Угол относительно направления на север Θ_p для этого метода рассчитывается по следующей формуле:

$$\Theta_p = \arctg \frac{S_2 - S_3}{S_2 - S_1} - 45^\circ, \quad (1)$$

где S_1, S_2, S_3 — значения сигнала ВОГ, измеренные последовательно с поворотом ВОГ на 90° , т.е.

$$S_1 = U_0 \sin \Theta, \quad S_2 = U_0 \cos \Theta, \quad S_3 = -U_0 \sin \Theta, \quad (2)$$

Θ — угол между вектором чувствительности ВОГ и проекцией вектора вращения Земли на плоскость горизонта; U_0 — максимальная амплитуда сигнала ВОГ, регистрирующего вращение Земли в данной точке земной поверхности.

Согласно нашим теоретическим расчетам, методика которых приведена в работе [3], зависимость среднеквадратичной ошибки вычисления угла Θ_p от значения собственного шума ВОГ выражается следующим образом:

$$\sigma_{\Theta_p} = \frac{\sigma U}{U_0} \sqrt{1 - 0.5 \cos 2\Theta} \text{ (рад)},$$

где σU — среднеквадратичная ошибка измерения сигнала ВОГ в одной позиции, определяемая собственным шумом ВОГ.

Как видно из этой формулы, ошибка вычисления Θ_p зависит от истинного значения Θ . Она достигает минимума при $\Theta = 0$.

Получить точную аналитическую зависимость погрешности вычисления Θ_p от значения дрейфа сигнала ВОГ нельзя. Можно, задавшись каким-либо близким к реальности поведением дрейфа, получить достаточно точные зависимости ошибки вычисления Θ_p как функции Θ и скорости изменения дрейфа сигнала ВОГ. Это было сделано для двух типичных случаев поведения дрейфа. В первом случае дрейф в течение полного времени измерения является линейно изменяющейся функцией; второй случай предполагает, что в течение полного времени измерения производная по времени от дрейфа сигнала изменяет свой знак так, что к концу измерения абсолютное значение дрейфа сигнала имеет то же значение, что и в начале измерения. Абсолютная ошибка вычисления Θ_p в первом и втором случаях составит соответственно

$$\Theta - \Theta_p \approx \frac{DT}{2U_0} \cos \Theta,$$

$$\Theta - \Theta_p \approx \frac{DT}{2U_0} \sin \Theta \text{ (рад),}$$

где D — производная по времени дрейфа сигнала ВОГ в начале цикла измерения, T — полное время измерения сигнала ВОГ.

Относительная погрешность этих формул меньше отношения $DT/2U_0$. В общем случае оптимальное значение Θ , относительно которого лучше проводить измерения сигнала ВОГ, а затем расчет Θ_p , определяется реальными характеристиками ВОГ, т.е. его собственным шумом и дрейфом его выходного сигнала.

Экспериментальное исследование точности статического волоконно-оптического гироскопа

Использованный нами образец ВОГ, созданный на основе одномодового волокна с сохранением поляризации, имел следующие характеристики: масштабный коэффициент $270 \text{ мВ}/(^\circ/\text{ч})$, собственный шум $0.2 (^\circ/\text{ч})/\sqrt{\text{Гц}}$, дрейф выходного сигнала $0.2^\circ/\text{ч}$. Первый этап разработки статической схемы волоконно-оптического гироскопа должен включать моделирование расчета угла относительно направления на север на компьютере. Методика моделирования описана в работе [5]. Согласно этой методике, для используемого ВОГ нами были сняты долговременные файлы (до 2 ч) поведения его выходного сигнала в условиях виброизоляции. Затем эта выборка разбивалась на интервалы равной длительности t , соответствующие времени однократного измерения сигнала ВОГ, на которых производилось усреднение, причем эти интервалы строго чередовались с интервалами времени, необходимыми на поворот ВОГ из одной позиции в другую и на завершение переходных

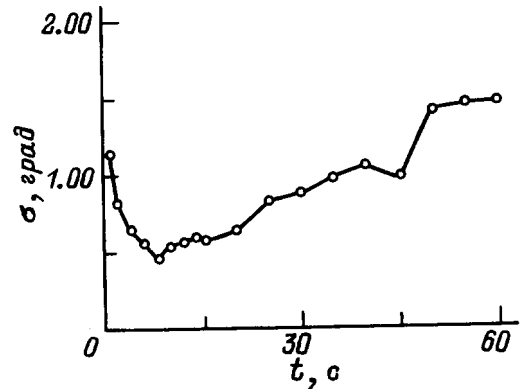


Рис. 1. Ошибка расчета Θ_p при моделировании гироскопа.

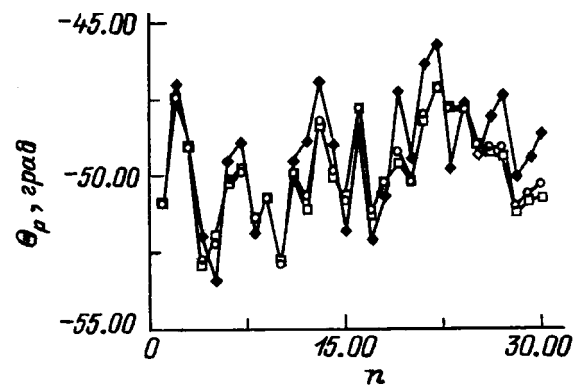


Рис. 2. Сравнение алгоритмов расчета Θ_p . Способы: \circ — 1, \square — 2, \blacklozenge — 3.

процессов, возникающих вследствие наличия вибраций в момент разворота (полное время 5 с). К полученному таким образом сигналу прибавлялся теоретически рассчитанный сигнал по формулам (2) для $\Theta = -45^\circ$. Расчет Θ_p производился по формуле (1). На рис. 1 представлено поведение среднеквадратичной ошибки вычисления угла Θ_p как функции времени t . Видно, что для использованного образца ВОГ ошибка вычисления Θ_p достигает минимума при времени измерения (усреднения) 10 с и составляет величину порядка 0.5° . Очевидно, что для данного образца ВОГ большую точность гироскопа при однократном вычислении Θ_p получить нельзя.

На следующем этапе проводятся измерения на действующем гироскопе. Как указано в работе [3], можно использовать алгоритмы расчета Θ_p , позволяющие предварительно оценить величину дрейфа и затем учесть его в вычислениях Θ_p . Для проверки этой возможности однопериодный цикл измерений сигнала ВОГ повторили 30 раз. Цикл состоял из четырех измерений сигнала ВОГ в течение 15 с каждое. Между измерениями ВОГ поворачивался в одну сторону на угол 90° относительно предыдущего измерения (время между измерениями сигнала ВОГ 5 с). Вектор чувствительности ВОГ во всех измерениях оставался примерно под углом 45° к

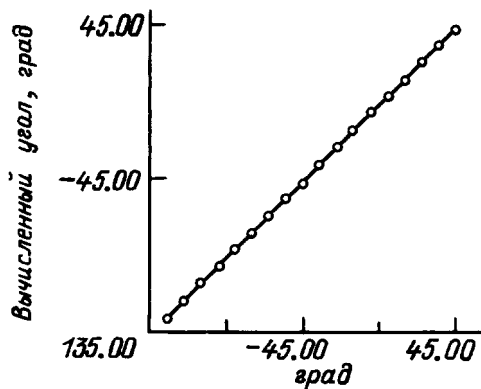


Рис. 3. Расчет Q_p как функции угла разворота первой позиции ВОГ.

оси север-юг. Результаты измерений накапливались в компьютере. Затем были проведены вычисления угла Θ_p по формуле (1) тремя способами (рис. 2). В первом способе использовались для расчета Θ_p только первые три измеренных значения сигнала ВОГ каждого цикла; во втором способе были использованы только второе, третье и четвертое измеренные значения сигнала ВОГ; в третьем способе по четырем измерениям сигнала ВОГ в одном цикле сперва оценивался дрейф сигнала ВОГ в предположении линейного характера его изменения $d = 0.5(S_2 + S_4 - S_1 - S_3)$. Затем проводился расчет угла Θ_p по скорректированным на эту рассчитанную величину d значениям сигнала ВОГ. Среднеквадратичная ошибка расчета угла Θ_p составила примерно в первом и втором способах 1.5° , в третьем способе 2° . Это означает, что для использованного ВОГ лучшим алгоритмом расчета Θ_p является простой алгоритм, использующий три измерения сигнала ВОГ с поворотом ВОГ на 90° . Повороты ВОГ вносят дополнительную нестабильность в температурный режим работы данного образца ВОГ, что увеличивает его собственный шум и дрейф. Этим можно объяснить увеличение ошибки вычисления Θ_p в сравнении с ошибкой, полученной ранее в процессе моделирования.

Третьим этапом исследования точности giroкомпыаса должно быть измерение его погрешности как функции значения рассчитываемого угла Θ_p . Для этого были проведены измерения сигнала ВОГ подобно описанному ранее, за исключением того, что каждый новый цикл измерений четырех значений сигнала ВОГ начинался со сдвигом первой позиции предыдущего цикла измерений. Таким образом, последовательно осуществлялось 9 циклов измерений, после чего первая позиция измерения возвращалась в исходное положение, вновь проводились 9 циклов измерений и так 30 раз. Результаты измерений также накапливались в компьютере.

Затем по результатам измерений были проведены вычисления угла Θ_p по формуле (1) для 18 ориентаций вектора чувствительности ВОГ в первой позиции

измерений относительно оси север-юг. Половина этого диапазона значений рассчитывалась по первым трем измеренным значениям сигнала ВОГ каждого цикла, вторая половина по второму, третьему и четвертому значениям сигнала ВОГ. На рис. 3 и 4 представлены графики, построенные по 30 расчетам среднего значения угла Θ_p среднеквадратичного отклонения рассчитанного угла соответственно. Для рассчитанных значений угла Θ_p , представленных на рис. 3, была проведена линеаризация зависимости. Отличие рассчитанных значений от прямой составило величину меньшую среднеквадратичного отклонения, представленного на рис. 4. График, представленный на рис. 4, имеет явный экстремальный характер. Минимальное значение погрешности вычисления угла Θ_p составило величину порядка 0.6° при полном времени измерения порядка 1 мин. Аналогичные результаты, приведенные в работе [1], составляют 0.2° при том же времени измерения. Характер зависимости на рис. 4 подтверждает выводы, сделанные в первой части этой работы. Меньшая ошибка вычисления угла Θ_p в области значений $-30^\circ - 0^\circ$ объясняется меньшим влиянием на точность расчета угла Θ_p собственного шума ВОГ в этом диапазоне углов. Уменьшение ошибки вычисления в области $-120^\circ - 90^\circ$ можно объяснить меньшим влиянием на точность расчета в этом диапазоне углов дрейфа сигнала ВОГ. Из этого графика можно сделать вывод о предпочтительной ориентации данного образца ВОГ по отношению к оси север-юг таким образом, чтобы рассчитываемый угол Θ_p приходился на значение, близкое к -30° . Такое ориентирование ВОГ в процессе работы giroкомпыаса можно осуществить после первого предварительного измерения сигнала ВОГ и расчета угла относительно направления на север, возможно, по упрощенному алгоритму или с меньшим временем измерения. Меньшая ошибка расчета Θ_p при угле -45° в сравнении с результатом, полученным в предыдущей серии измерений, объясняется тем, что эта тестовая серия имеет существенно большее время измерений (порядка 6 ч), что привело к уменьшению собственного шума и дрейфа сигнала после прогрева данного образца ВОГ в процессе измерений.

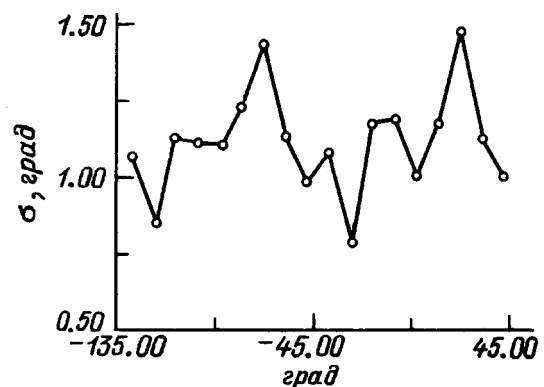


Рис. 4. Ошибка расчета Q_p как функции угла разворота первой позиции ВОГ.

Заключение

В результате проделанной работы можно представить методику определения погрешности статического волоконно-оптического гироскопа.

Первым этапом ее является определение предельной точности гироскопа для используемого образца ВОГ и оптимального времени однократного измерения сигнала ВОГ. Для используемого нами образца ВОГ соответственно получена точность порядка 0.5° (СКО) и время измерения 10 с. На втором этапе определяется оптимальный алгоритм измерения сигнала ВОГ и расчета угла относительно направления на север. Для используемого нами образца ВОГ сделан вывод о необходимости использования алгоритма без компенсации дрейфа с минимальным числом измерений сигнала ВОГ, равным трем. На третьем этапе определяется значение угла относительно направления на север с минимальным значением погрешности расчета этого угла. Для используемого нами образца ВОГ таким оптимальным углом является -30° .

В процессе проведения тестовых измерений и расчетов определяется точность вычисления угла относительно направления на север. Для данного образца волоконно-оптического гироскопа она составила величину порядка 1° (СКО) и меньше.

Список литературы

- [1] *Dyott R.B., Allen D.E.* // Proc. of 10th Optical Fibre Sensors Conf. Glasgow (Scotland), 1994. P. 442.
- [2] *Tanaka T., Igarashi Y.* // Appl. Opt. 1994. Vol. 33. N 1. P. 120–123.
- [3] *Матисов И.А., Николаев В.А., Стригалева В.Е.* // Тр. учебных институтов связи. Вып. 162. СПб., 1996. С. 92–95.
- [4] *Logozinski V.N., Solomatina V.A.* // Тр. II Междунар. конф. по гироскопической технике и навигации. СПб., 1995.
- [5] *Иванов Ю.В., Стригалева В.Е., Николаев В.А., Матисов И.А.* // Тр. учебных институтов связи. Вып. 162. СПб., 1996. С. 87–91.