

УДК 531.383.11.681.7

Ю. Н. КОРКИШКО, В. А. ФЕДОРОВ, В. Е. ПРИЛУЦКИЙ, В. Г. ПОНОМАРЕВ, В. Г. МАРЧУК,
И. В. МОРЕВ, С. М. КОСТРИЦКИЙ, Е. М. ПАДЕРИН,
Л. П. НЕСЕНОК, А. С. БУРАВЛЕВ, Л. Г. ЛИСИН

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП НАВИГАЦИОННОГО КЛАССА ТОЧНОСТИ

Описан интерференционный волоконно-оптический гироскоп ОИУС-1000 с замкнутым контуром обратной связи навигационного класса точности, разработанный и изготавливаемый в Научно-производственной компании «ОПТОЛИНК». Представлены результаты измерений основных параметров гироскопа, проведенные в ЦНИИ «Электроприбор». Результаты измерений показали, что волоконно-оптический гироскоп ОИУС-1000 удовлетворяет требованиям, предъявляемым к гироскопам, используемым для построения точных навигационных систем.

Введение

В настоящее время волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) с замкнутым контуром обратной связи широко применяются в системах инерциальной навигации. В ВОГ с замкнутым контуром механизм обратной связи сохраняет нулевой уровень сигнала путем компенсации фазового сдвига Саньяка дополнительным фазовым сдвигом. Величина этого дополнительного фазового сдвига позволяет получить информацию о скорости вращения объекта.

В данной работе описывается одноосный ВОГ ОИУС-1000, разработанный и изготавливаемый в Научно-производственной компании «ОПТОЛИНК», с длиной волоконного контура 500 м. Габариты прибора: $\varnothing 150 \times 40$ мм, масса 0,8 кг.

Конфигурация прибора

Волоконно-оптические гироскопы изготавливаются в так называемой минимальной конфигурации с одинаковыми оптическими путями для двух лучей,

Коркишко Юрий Николаевич (1960). Доктор физико-математических наук, профессор, директор ООО НПК «ОПТОЛИНК» (Зеленоград Моск. обл.).

Федоров Вячеслав Александрович (1967). Доктор физико-математических наук, профессор, технический директор ООО НПК «ОПТОЛИНК»

Прилуцкий Виктор Евстафьевич (1947). Директор Саратовского отделения ООО НПК «ОПТОЛИНК».

Пономарев Владимир Григорьевич (1945). Кандидат технических наук, ведущий конструктор ООО НПК «ОПТОЛИНК».

Марчук Владимир Григорьевич (1946). Ведущий инженер ООО НПК «ОПТОЛИНК».

Морев Иван Владимирович (1959). Ведущий инженер ООО НПК «ОПТОЛИНК».

Кострицкий Сергей Михайлович (1958). Кандидат технических наук, руководитель отдела ООО НПК «ОПТОЛИНК».

Падерин Евгений Михайлович (1964). Кандидат физико-математических наук, главный технолог ООО НПК «ОПТОЛИНК».

Несенок Леонид Петрович (1960). Доктор технических наук, профессор, начальник отдела ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Действительный член Академии навигации и управления движением.

Буравлев Адександр Сергеевич (1900). Инженер I категории ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор».

Лисин Леонид Григорьевич (1900). Инженер I категории ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор».

Статья по докладу на XIV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам Публикуется по рекомендации Программного комитета.

распространяющихся в волоконном контуре. Прибор состоит из источника света – суперлюминесцентного диода с центральной длиной волны 1550 нм, волоконного разветвителя, кольцевого интерферометра Саньяка для измерения угловой скорости и электронных схем обработки сигналов [2, 3]. Кольцевой интерферометр состоит из многофункционального интегрально-оптического элемента (МИОЭ) и из сохраняющего состояние поляризации света волоконного контура (ВК). МИОЭ представляет собой интегрально-оптическую схему на кристалле ниобата лития, изготовленную с помощью технологии высокотемпературного протонного обмена [4, 5] и выполняющую три функции: 1) поляризация проходящего света в целях уменьшения нестабильности смещения нуля вследствие поляризационной невязанности; 2) расщепление световых волн на распространяющиеся по часовой стрелке и против нее в ВК с равными мощностями с последующей рекомбинацией на Y-разветвителе; 3) внесение фазового сдвига между встречными волнами с помощью электрооптического фазового модулятора.

Применение волокна, сохраняющего состояние поляризации, обусловлено необходимостью уменьшения как дрейфа, вызываемого перекрестной поляризационной связью, так и дрейфа, вызываемого внешними магнитными полями вследствие эффекта Фарадея.

Структурная схема ОИУС с цифровой обработкой сигналов (ЦОС) представлена на рис 1.

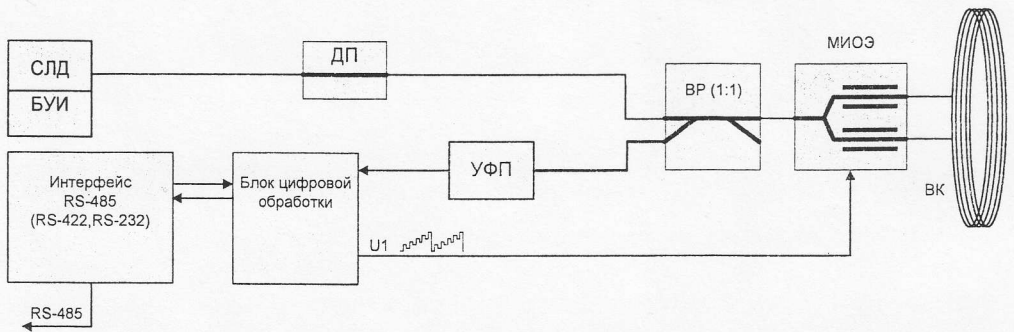


Рис. 1. Структурная схема ОИУС-1000:

СЛД – суперлюминесцентный диод, БУИ – блок управления излучателем, ВР – волоконный разветвитель, ВК – волоконный контур, МИОЭ – многофункциональный интегральный оптический элемент, УФП – устройство фотоприемное, ДП – деполяризатор, RS-485 – последовательный интерфейс

В ОИУС-1000 применена схема с замкнутым контуром обратной связи с импульсной вспомогательной и ступенчато-пилообразной компенсирующей фазовыми модуляциями света. Схема предполагает наличие стабильного значения фазы и амплитуды компенсирующей модуляции. Это достигается с помощью дополнительной следящей системы в схеме обработки.

Блок цифровой обработки (БЦО) формирует напряжения, поступающие на МИОЭ для формирования постоянного фазового сдвига между встречными световыми волнами, равного $\pi/2$ рад, и компенсации разности фаз Саньяка. Тем самым обеспечивается работа прибора в компенсационном режиме.

Структурная схема БЦО представлена на рис 2.

Аналоговый сигнал, пропорциональный угловой скорости (сигнал рассогласования), поступает на АЦП с УФП, где предварительно усиливается. Высоко-скоростной АЦП под управлением цифрового автомата, реализованного на про-

граммируемую логическую интегральную схему (ПЛИС), преобразует аналоговый сигнал в цифровой и передает в ПЛИС.

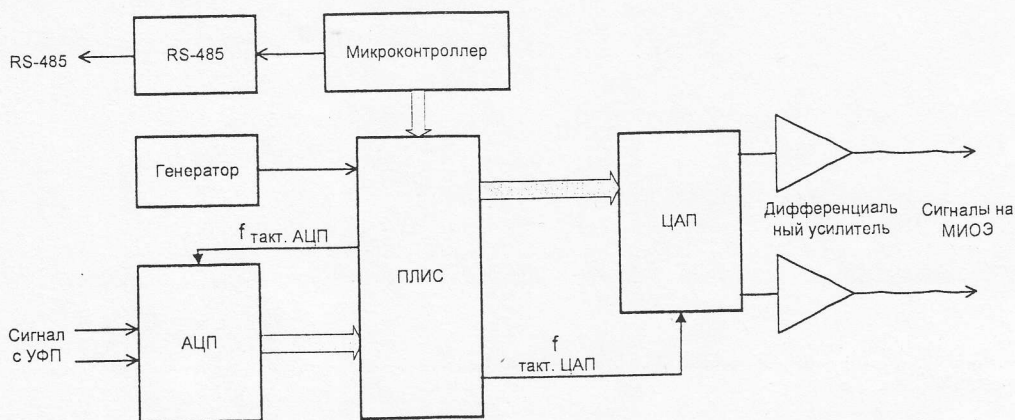


Рис. 2. Структурная схема БЦО:

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь, ЦАП – цифроаналоговый преобразователь, ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема

В ПЛИС цифровой сигнал с АЦП демодулируется и поступает на цифровой интегратор со знаком, соответствующим знаку сигнала рассогласования. Код с интегратора используется для определения наклона фазового пилообразного сигнала, соответствующего скорости вращения. Преобразованный в ЦАП сигнал поступает на МИОЭ. При амплитуде сброса фазового пилообразного сигнала, равной 2π рад, как известно, разность фаз Саньяка компенсируется сигналом с частотой f , определяемой соотношением

$$f = \frac{D}{\lambda n} \Omega,$$

где Ω – скорость вращения, D – диаметр ВК, n – эффективный показатель преломления моды в волокне, λ – длина волны в вакууме.

В приборе используются два способа определения скорости вращения. В первом способе происходит непосредственное измерение частоты следования спадов пилообразного сигнала. При этом каждый спад соответствует приращению угла поворота канала ОИУС вокруг оси, перпендикулярной ВК, на $\lambda n / D$ рад.

Для увеличения разрешающей способности прибора применяется способ измерения скорости вращения по наклону фазового пилообразного сигнала.

БЦО представляет собой схему, построенную на ПЛИС фирмы ALTERA, к которой подключены высокоскоростной АЦП и два быстрых ЦАП фирмы Analog Devices. Тактовые синхроимпульсы для ЦАП и АЦП вырабатываются ПЛИС. Работа ПЛИС синхронизируется высокостабильным генератором.

Микроконтроллер фирмы Atmel является загрузчиком для ПЛИС, а также обеспечивает обмен по интерфейсу RS-485 с внешними устройствами. На нем реализован монитор для настройки прибора. Кроме загрузки ПЛИС, контроллер по последовательному каналу считывает с ПЛИС данные измерений.

Функциональная схема цифрового автомата, реализованного на ПЛИС, представлена на рис 3.

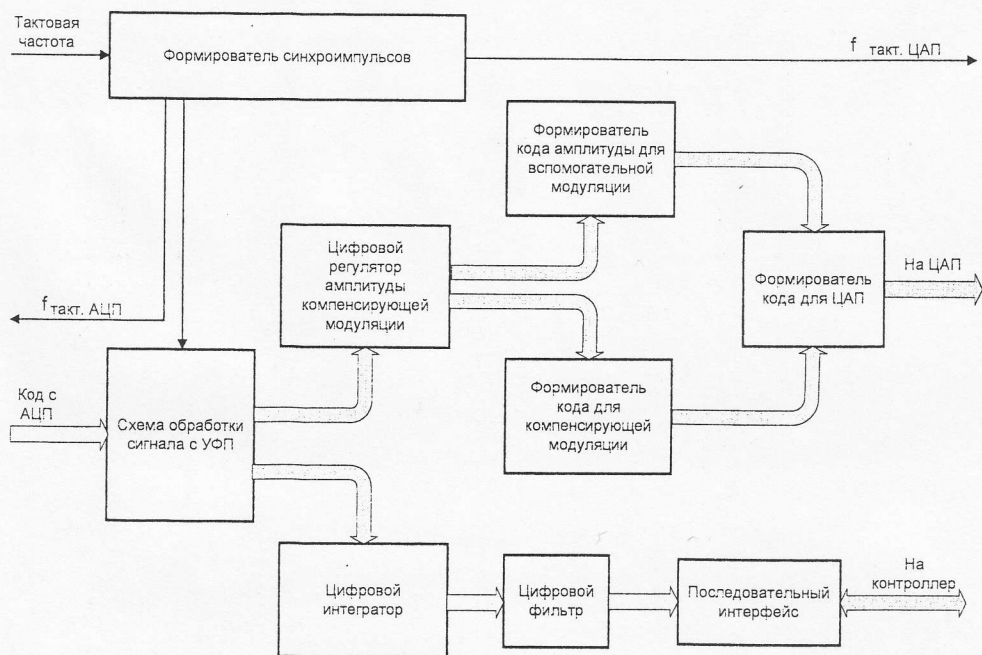


Рис. 3. Функциональная схема цифрового автомата, реализованного на ПЛИС

Формирователь синхроимпульсов преобразует тактовую частоту в набор импульсов для синхронного управления работой всех устройств и узлов. Тактовая частота $f_{\text{такт}}$ выбирается кратной частоте вспомогательной модуляции (ВМ) $f_{\text{ВМ}}$. Тактовые импульсы для ЦАП формируются по фронтам ВМ. Тактовые импульсы для АЦП формируются так, чтобы исключить измерения на фронтах сигнала с УФП.

Схема обработки сигнала с УФП состоит из сумматора, буфера для хранения измеренного значения, схемы вычитания. На сумматоре накапливаются значения сигнала рассогласования на текущей фазе ВМ. В буфере хранится сумма значений сигнала, измеренных на предыдущей фазе ВМ. По окончании измерения числа с сумматора и с буфера поступают на схему вычитания. В зависимости от текущей фазы ВМ одно число подается как вычитаемое, другое – как уменьшаемое. Таким образом, выделяется амплитуда переменного сигнала с учетом знака.

Код со знаком, соответствующий знаку сигналу рассогласования, поступает на цифровой интегратор, который состоит из умножителя и сумматора со схемой ограничения. С помощью умножителя задается постоянная времени цифрового интегратора. Сумматор используется в качестве интегратора. Код с интегратора поступает на формирователь кода для компенсирующей модуляции и через цифровой фильтр – на последовательный интерфейс связи с контроллером. Формирователь кода для компенсирующей модуляции состоит из сумматора, с помощью которого формируется код пилообразного сигнала, и второго сумматора, который используется в контуре цифрового регулятора амплитуды компенсирующей модуляции. Сигналом рассогласования для цифрового регулятора амплитуды компенсирующей модуляции служит сигнал со схемы обработки сигнала с УФП, снятый в моменты спадов пилообразного сигнала. Этот же сигнал используется и для подстройки амплитуды вспомогательной модуляции.

Для достижения максимальной чувствительности необходимо устранить все источники невязности, кроме тех, которые возникают в результате эффекта Саньяка при распространении волн по часовой стрелке и против нее. Возникновение дополнительных фазовых сдвигов из-за недостаточного качества оптических компонентов или внешних возмущений на фоне фазового сдвига Саньяка приводит к дополнительному дрейфу нулевого сигнала [1].

Рассмотрим основные факторы, ограничивающие точность ВОГ, влияние которых удалось ослабить при разработке ВОГ ОИУС-1000.

Оптические потери. Погрешность ВОГ ограничена дробовым шумом, который вычисляется как величина, обратная квадратному корню из мощности, которая уменьшается с увеличением длины волокна, в то время как эффект Саньяка увеличивается. Эти два конкурирующих эффекта определяют длину волокна для данной чувствительности.

Тепловые воздействия. Зависящий от времени температурный градиент вдоль длины волокна может привести к ложным фазовым сдвигам вследствие температурной зависимости показателя преломления волокна. Для минимизации этого эффекта необходимо использовать волокна с меньшим значением dn/dT . Квадрупольная намотка, в которой равноотстоящие от центра точки волокна расположены в физически равных условиях, также значительно уменьшает этот эффект.

Обратное рассеяние света. Обратное рассеяние на входных-выходных соединителях и других неоднородностях ВОГ может являться причиной возникновения паразитных интерференций. Иммерсионные элементы для уменьшения разностей показателей преломления, а также использование наклонных поверхностей в МИОЭ снижают обратное рассеяние.

Оптический эффект Керра. Электрические поля распространяющихся в противоположных направлениях лучей могут привести к таким изменениям показателя преломления, которые будут невязными, если свет расщепляется на неравные части [6]. Невязность, вызванная нелинейным эффектом Керра, может быть существенно снижена путем использования низкокогерентного источника излучения.

Магнитооптический эффект. Магнитооптический эффект Фарадея приводит к паразитному дрейфу гироскопа. Значительное уменьшение его влияния достигается путем использования волокна, сохраняющих поляризацию излучения, а также за счет использования оболочек из пермаллоя.

Для ВОГ с идеальными компонентами (идеальным расщепителем, без обратного рассеяния и т.д.) предел измерений угловой скорости зависит от дробового шума в пучке света при измерении фотодетектором [7]. Недостоверность $\delta\Omega_\pi$, создаваемая колебанием в пучке света, которое вызвано дробовым шумом, можно выразить так [8]:

$$\delta\Omega_\pi = \frac{c}{L \cdot D} \frac{\lambda/2}{(n_p n_D \tau)^{\frac{1}{2}}},$$

где n_p – количество фотонов в секунду, попадающих на фотодетектор, n_D – квантовая эффективность детектора, τ – среднее время.

Результаты испытаний прибора ОИУС-1000

Испытания ОИУС-1000 проводились в ЦНИИ «Электроприбор» на стенде АС1120Е фирмы Acutronic, установленном в термокамере VT7004 фирмы Voetsch Industrietechnik. Оценка характеристик шума и смещения нуля проводилась в при температуре в термокамере $20 \pm 0,4^\circ\text{C}$. При этом записывалась реализация длиной не менее 10 ч [9]. Характеристики шума ВОГ рассчитывались с помощью метода вариаций Аллана. Стабильность смещения нуля и шумовые характеристики ВОГ проверялись при выключенном двигателе контроллера поворотного стола при вертикальном направлении оси чувствительности прибора. Частота съема данных составляла 100 Гц. Запись данных как с испытуемого ВОГ, так и с поворотного стенда производилась с помощью специальной программы на пультовом компьютере.

На рис. 4 приведен график исходной реализации ОИУС-1000.

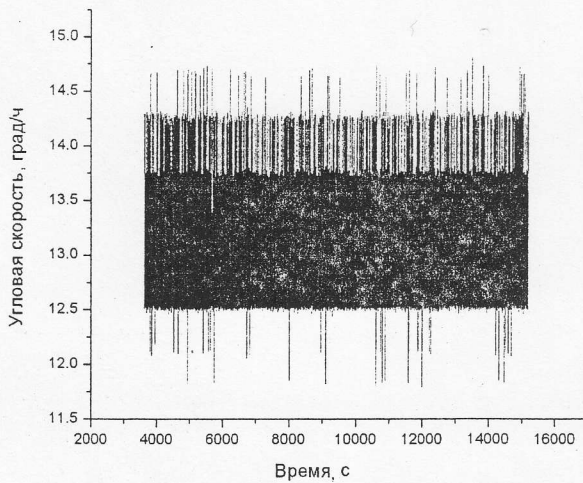


Рис. 4. Исходная реализация ОИУС-1000

Сглаженная исходная реализация с помощью фильтра 1-го порядка с постоянной времени 100 с приведена на рис. 5.

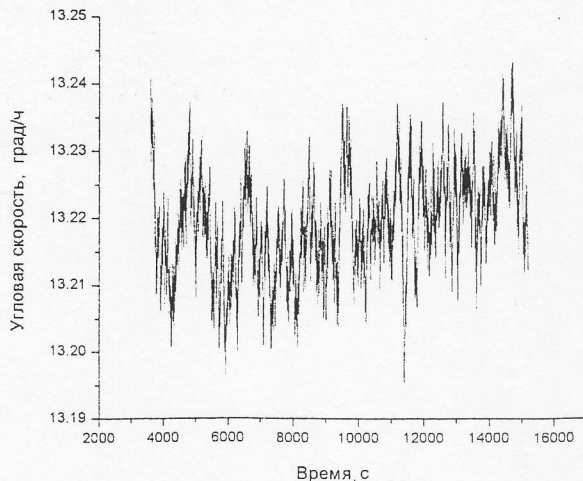


Рис. 5. Графики сглаженной угловой скорости

СКО приведенного на рис. 5 сглаженного сигнала составляет 0,0075 град/ч.

Для определения изменения смещения нуля прибора ОИУС-1000 от пуска к пуску было обработано 10 реализаций. По каждой было рассчитано среднее значение и СКО шума. Результаты сведены в таблицу.

Смещение нулевого сигнала от пуска к пуску

№	Среднее значение, град/ч	СКО, град/ч
1	13,184	0,008
2	13,059	0,007
3	13,106	0,007
4	13,238	0,007
5	13,180	0,007
6	13,057	0,008
7	13,055	0,008
8	13,046	0,007
9	13,049	0,007
10	13,044	0,007

Из данных, приведенных в таблице, видно, что нестабильность смещения нуля в одном пуске составляет величину $0,007 \div 0,008$ град/ч, а нестабильность смещения нуля от пуска к пуску составляет 0,072 град/ч. На рис. 6 и 7 приведены графики изменения средней угловой скорости и СКО по этим реализациям.

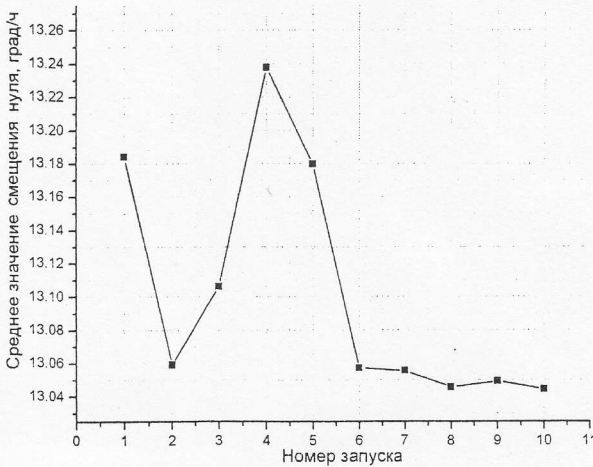


Рис. 6. График средней угловой скорости на выходе ВОГ от пуска к пуску

На рис. 6 видно, что средняя угловая скорость по последним 5 пускам находится в диапазоне $\pm 0,01$ град/ч, поскольку в этом случае поворотный стол стоял в одном положении. Разброс в первых пяти пусках связан с поворотами стэнда в горизонтальной плоскости и вызван неточностью выставки оси ВОГ в вертикальное положение. Был проведен дополнительный эксперимент по измерению в неподвижном положении стола на румбах через 45° . График измерений угловой скорости приведен на рис. 8. Разброс совпадает с разбросом на рис. 6. Отсюда следует, что реальная стабильность смещения нуля прибора ОИУС-1000 находится на уровне 0,01 град/ч, что соответствует наклону $43'$ оси чувствительности ВОГ относительно вертикали места.

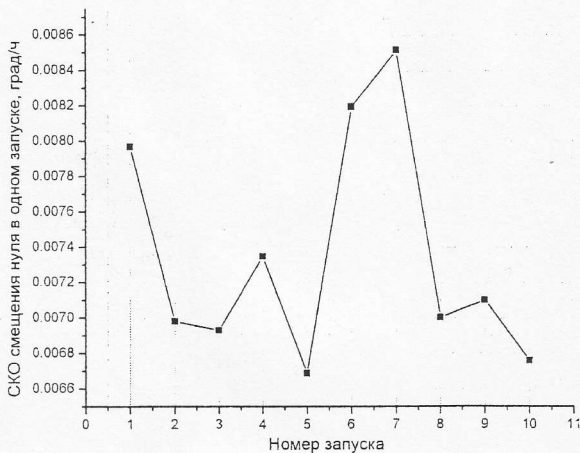


Рис. 7. График SKO шума от пуска к пуску

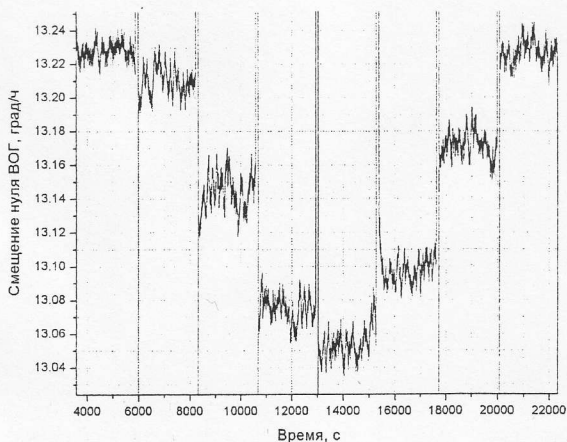


Рис. 8. График средней угловой скорости на выходе ВОГ на разных румбах

На рис. 9 приведена зависимость смещения нуля от температуры, показывающая, что смещение нуля изменялось в пределах $\pm 0,15$ град/ч при изменении температуры в диапазоне от -20 до $+50^{\circ}\text{C}$.

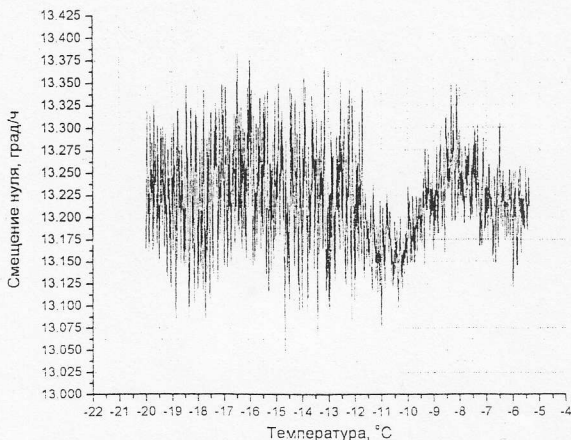


Рис. 9. Зависимость смещения нуля от температуры

Был рассчитан параметр нестабильности масштабного коэффициента ВОГ ОИУС-1000 и произведена оценка его температурной зависимости.

Масштабный коэффициент ВОГ определялся на стенде АС1120Е при вертикальной оси чувствительности путем поворота на фиксированный угол с постоянной угловой скоростью по часовой стрелке и против нее. При этом масштабный коэффициент определялся как

$$K = \frac{4\pi}{U_+ - U_-},$$

где $U_+ = \frac{\sum_{i=1}^n U_{+i}}{n} T$ – интеграл от выходного сигнала за время оборота T при вращении по часовой стрелке, $U_- = \frac{\sum_{i=1}^n U_{-i}}{n} T$ – интеграл от выходного сигнала за время оборота T при вращении против часовой стрелки.

Для определения зависимости масштабного коэффициента и смещения нуля прибора от температуры его показания записывались при плавном изменении температуры от минимального допустимого значения до максимально допустимого и обратно. Скорость изменения температуры выбрана $5^\circ\text{C}/\text{ч}$.

График изменения масштабного коэффициента при постоянной заданной температуре по этой же реализации приведен на рис. 10.

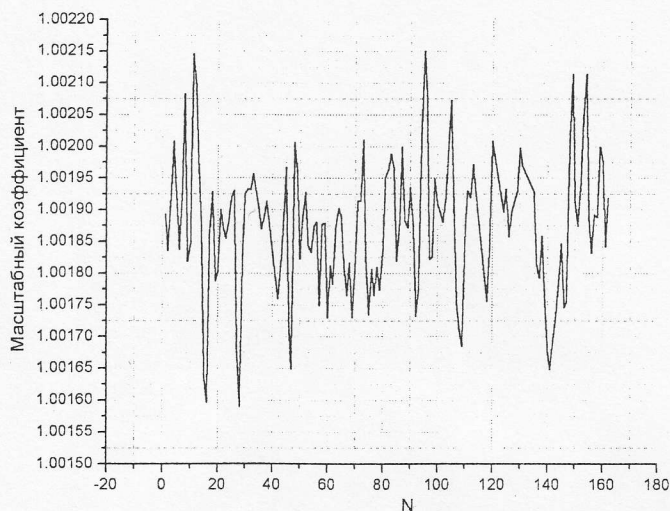


Рис. 10. График зависимости масштабного коэффициента от номера измерения

Нестабильность СКО масштабного коэффициента по графику на рис. 10 составила 0,01%.

Масштабный коэффициент зависит и от температуры (рис. 11). При изменении температуры в диапазоне от -20 до 50°C изменения масштабного коэффициента составили 0,2%.

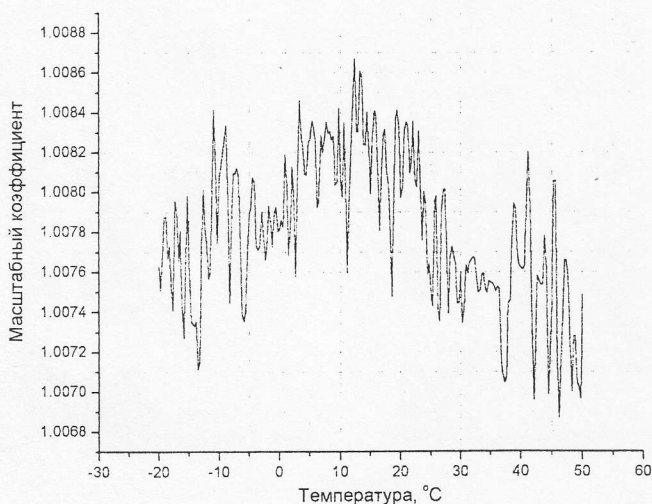


Рис. 11. График зависимости масштабного коэффициента от температуры

Нелинейность выходной характеристики. Нелинейность выходной характеристики прибора определялась с помощью задания ряда угловых скоростей, определения выходных угловых скоростей, аппроксимации выходной характеристик линейной зависимостью и отнесением максимального отклонения от нее к максимальной угловой скорости.

Для оценки нелинейности выходной характеристики ОИУС-1000 на поворотном столе задавались угловые скорости вращения в диапазоне от -20 до $+20$ град/с с шагом 1 град/с. График зависимости выходной угловой скорости ОИУС-1000 от заданной приведен на рис. 12.

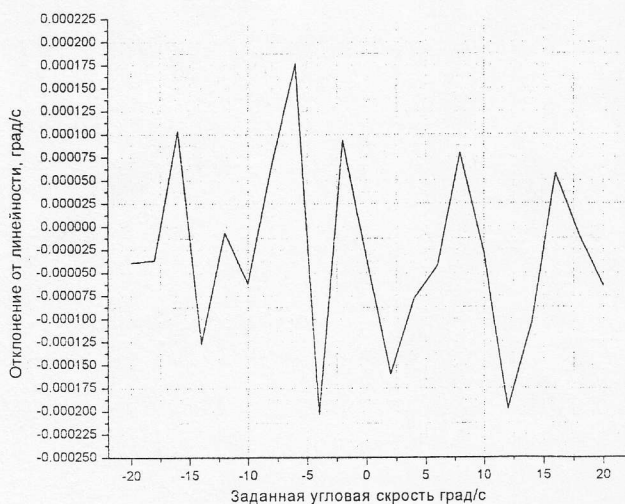


Рис. 12. График отклонения выходной характеристики ВОГ от линейной

Оценка нелинейности выходной характеристики ВОГ составляет 0,001%. Относительная погрешность нестабильности угловой скорости стенда Acutronic 1120E не превышает 0.001% в задаваемом диапазоне угловых скоростей.

Влияние магнитного поля. Измерение влияния постоянного магнитного поля производилось следующим образом. ВОГ помещался в постоянное магнитное поле так, чтобы вектор напряженности поля был параллелен одной из

трех осей гироскопа. Измерения показали, что чувствительность ОИУС-1000 к магнитному полю следующая:

- для оси X (оси чувствительности гироскопа) не более 0,05 град/ч/Э.
- для осей Y и Z (плоскость катушки) не более 0,13 град/ч/Э.

Чувствительность прибора. Для определения порога чувствительности ВОГ задавали ряд различных угловых скоростей в обе стороны. Минимальная задаваемая угловая скорость устанавливается меньшей априорного значения минимально обнаружимой угловой скорости. Та минимальная угловая скорость, ступенька на которой видна после сглаживания с постоянной времени 100 с фильтром первого порядка считалась порогом чувствительности ВОГ.

Чувствительность прибора ОИУС-1000 измерялась путем задания ряда угловых скоростей в диапазоне от $\pm 0,001$ до ± 10 град/ч с использованием проекции угловой скорости Земли. Время усреднения – 100 с. При этом ось чувствительности ОИУС-1000 выставлялась перпендикулярно оси вращения стенда и перпендикулярно плоскости меридиана. Задавая небольшие отклонения от перпендикуляра к плоскости меридиана в обе стороны, можно измерять малые угловые скорости. График реализации ОИУС-1000 приведен на рис. 13. Видно, что отчетливо видны угловые скорости до 0,01 град/ч.

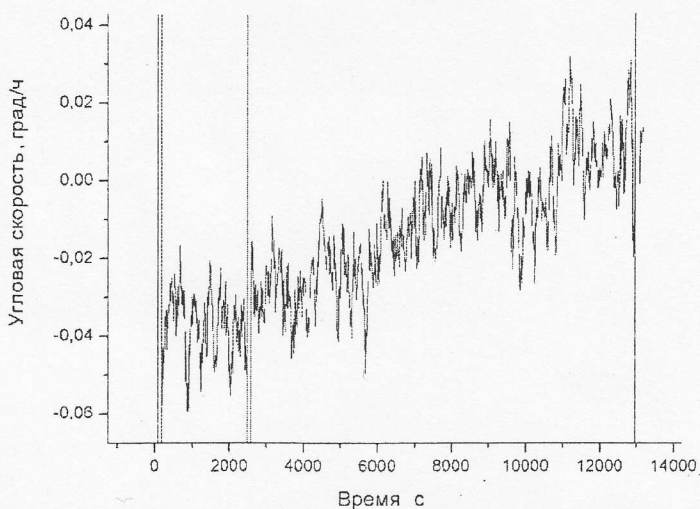


Рис. 13. График реализации для оценки чувствительности ВОГ с использованием проекции угловой скорости Земли от -0,04 до 0,01 град/ч

Заключение

1. При стабилизированной внешней температуре с точностью $\pm 0,2^\circ\text{C}$ СКО смещения нуля ВОГ ОИУС-1000 в одном пуске составило 0,007-0,008 град/ч, а от пуска к пуску 0,01 град/ч.
2. Стабильность масштабного коэффициента ВОГ составила 0,01% при скорости вращения 2 град/с;
3. Температурные изменения масштабного коэффициента ВОГ не превысили 0,2% в температурном диапазоне $-20 \dots +50^\circ\text{C}$;
4. Температурные изменения смещения нуля ВОГ составили $\pm 0,15$ град/ч в температурном диапазоне $-20 \dots +50^\circ\text{C}$;
5. Нелинейность выходной характеристики ВОГ составляет $\sim 0,001\%$.
6. Чувствительность ВОГ ОИУС-1000 не хуже 0,01 град/ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lefevre, H. The Fiber – Optic Gyroscope, Artech House, 1993.
2. **Высокоточный** волоконно-оптический гироскоп с линейным цифровым выходом / Ю.Н.Коркишко др. // Гироскопия и навигация.- 2004.- N 1.- С.69-82.
3. Интерферометрические волоконно-оптические гироскопы с линейным выходом / В.Е. Прилуцкий и др. // Гироскопия и навигация.- 2004.- N3. - С.62-72.
4. **Korkishko, Yu. N.** LiNbO₃ Optical Waveguide Fabrication by High-Temperature Proton Exchange / Yu.N. Korkishko V.A. Fedorov, O.Y. Feoktistova // J. Lightwave Technology, 2000. Vol.18 - P.562-568.
5. Multifunctional integrated optical chip for fiber optical gyroscope fabricated by high temperature proton exchange / Yu.N. Korkishko et al. // in Integrated Optical Devices: Fabrication and Testing, G.C. Righini, Editor, Proc. SPIE, 2003. V.4944 - P.262-267.
6. **Frigo, N.J., Taylor, H.F., Goldberg, L., Weller, J.F., Rashleigh, S.C.** Opt.Lett. 1983. - Vol. 8. - P.119.
7. **Lin, S., Giallorenzi, T.G.** Appl.Optics 1979, Vol. 18 – P.915.
8. **Davis, J.L., Ezekiel, S.** Proc.SPIE1978. Vol. 157 - P.131.
9. **Программа и методика** исследования характеристик волоконно-оптических датчиков вращения. Проект ЦНИИ «Электроприбор», 2004.

Abstract. Optolink's navigation-grade (0.01 deg/h) closed-loop interferometric fiber optical gyroscope (FOG) is described. FOG is based on the Sagnac effect, which produces a phase difference $\Delta\Phi_s$ proportional to rotation rate Ω in the ring interferometer. Test results obtained at CSRI «Electroприбор» are presented.

УДК 621.3

Т. А. БЕЛЯЕВА, Я. А. НЕКРАСОВ, Я. В. БЕЛЯЕВ, С. В. БАГАЕВА

**ПОДАВЛЕНИЕ КВАДРАТУРНОЙ ПОМЕХИ
В МИКРОМЕХАНИЧЕСКОМ ГИРОСКОПЕ RR-ТИПА
С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОДОВ,
РАСПОЛОЖЕННЫХ НАД ЗУБЦОВОЙ ЗОНОЙ**

Предлагаются различные конфигурации электродов для микромеханического гироскопа (ММГ), разрабатываемого в ЦНИИ «Электроприбор», за счет которых обеспечивается формирование моментов, компенсирующих квадратурную помеху. Приводятся результаты экспериментальной проверки этого ММГ, в котором подтверждается возможность подавления квадратурной помехи на уровне чувствительного элемента. Оценен максимально возможный уровень квадратурной помехи, который может быть скомпенсирован.

Введение

Проблема подавления квадратурной помехи в ММГ не нова. Этой проблемой занимаются разработчики ММГ уже более 10 лет. То, что окончательного решения этой проблемы еще нет, подтверждают последние патенты [1–3] и работы ведущих американских фирм (Analog Devices) и университетов (Berkley).

Беляева Татьяна Александровна (1983). Аспирантка, младший научный сотрудник ГНЦ ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

Некрасов Яков Анатольевич (1945). Кандидат технических наук, начальник группы ГНЦ ЦНИИ «Электроприбор».

Беляев Яков Валерьевич (1978). Аспирант ГНЦ ЦНИИ «Электроприбор».

Багаева Светлана Владимировна (1983). Аспирантка ГНЦ ЦНИИ «Электроприбор».

Статья по докладу на XXV конференции памяти Н. Н. Острякова. Публикуется по рекомендации Программного комитета.