Шарков, Илья Александрович. Исследование и пути компенсации тепловых воздействий на сигнал волоконно-оптического гироскопа : диссертация ... кандидата технических наук : 05.11.01 / Шарков Илья Александрович; [Место защиты: С.-Петерб. нац. исслед. ун-т информац. технологий, механики и оптики].- Санкт-Петербург, 2013.- 112 с.: ил. РГБ ОД, 61 14-5/742

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики



О'201453323 *На правах рукописи*

Шарков Илья Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ И ПУТИ КОМПЕНСАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СИГНАЛ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО

ГИРОСКОПА

05.11.01 - Приборы и методы измерения (тепловые и оптические величины)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

д.т.н., профессор

Мешковский Игорь Касьянович

Санкт-Петербург - 2013

2 ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ 5

ВВЕДЕНИЕ 6

ГЛАВА 1. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП В УСЛОВИЯХ  
ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ 11

1. Принцип работы волоконно-оптического гироскопа 11
2. Обобщенная модель шумов и нестабильностей 12
3. Фазовый модулятор 13
4. Волоконно-оптический контур 19
5. Источник излучения 26
6. Алгоритмические методы компенсации выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа 27
7. Выводы по главе 30

ГЛАВА 2. ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ 35

1. Система измерения пространственно-временных градиентов в волоконно-оптическом гироскопе 35
2. Программно-аппаратный комплекс для создания тепловых пространственно-временных градиентов 38
3. Стенд для исследования изменения сигнала волоконно-оптического гироскопа при оказании тепловых воздействий на его отдельные элементы 40

**з**

ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВОЗМУЩЕННОЙ  
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСХЕМЫ  
НА ВЫХОДНОЙ СИГНАЛ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА 43

1. Стабилизация масштабного коэффициента 43
2. Дрейф нуля в сигнале ВОГ, связанный с термическим возбуждением многофункциональной интегрально-оптической схемы 50
3. Выводы по главе 57

ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВОЗБУЖДЕННОГО  
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО КОНТУРА НА ВЫХОДНОЙ СИГНАЛ  
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА 58

1. Механизм возникновения ошибки в сигнале волоконно-оптического гироскопа при тепловых воздействиях на волоконно-оптический контур 58
2. Экспериментальное исследование дрейфа показаний ВОГ при тепловом воздействии на ВОК 66
3. Методы уменьшения влияния нестационарных тепловых полей в ВОК на сигнші ВОГ 71
4. Выводы по главе 74

ГЛАВА 5. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВОЗМУЩЕННОГО ИСТОЧНИКА  
ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЫХОДНОЙ СИГНАЛ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО  
ГИРОСКОПА 75

1. Расчет влияния стабильности центральной длины волны на стабильность масштабного коэффициента 75
2. Экспериментальное исследование влияния источника излучения на сигнал ВОГ 76

**4**

1. Экспериментальное исследование влияния остальных элементов на сигнал ВОГ 78
2. Вывод по главе 79

ГЛАВА 6. ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ КАК ОСНОВА АЛГОРИТМИЧЕСКОГО  
МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ДРЕЙФА ВОГ 81

1. Факторный анализ 81
2. Классификация методов факторного анализа 82
3. Общий алгоритм факторного анализа 84
4. Метод главных компонент 88
5. Алгоритм метода главных компонент 91
6. Практическое применение метода факторного анализа для компенсации сигнала ВОГ при тепловых воздействиях 93

6.7. Выводы по главе 99

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 100

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ 103

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 104

СПИСОК РАБОТ АВТОРА 112

5

СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АЦП - аналогово-цифровой преобразователь

ВОГ - волоконно-оптический гироскоп

ВОК - волоконно-оптический контур

ИВОГ - интерференционный волоконно-оптический гироскоп

МИОС — многофункциональная интегрально-оптическая схема

МК - масштабный коэффициент

ПК - персональный компьютер

СКО - среднеквадратическое отклонение

ФА - факторный анализ

**6**

ВВЕДЕНИЕ Уже три десятилетия волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) успешно используются в системах навигации, ориентации и стабилизации. За это время технологии изготовления оптических компонентов были значительно улучшены, что позволило ВОГ перейти из ниши датчиков угловой скорости средней точности к классу датчиков навигационной точности. На сегодняшний день прецизионные ВОГ вытесняют кольцевые лазерные гироскопы класса точности 0,01 -0,001°/ч и используются в навигационных системах морского, наземного и аэрокосмического

базирования [1, 2, 3]. Потенциальная точность такого ВОГ составляет 7 10 °/ч .

Основная проблема заключается в том, что при кажущейся простоте прибора и высокой чувствительности его к угловой скорости вращения он в то же время чрезвычайно подвержен различным внешним воздействиям, что приводит к паразитным дрейфам и, как следствие, к снижению точности измерений. К таким воздействиям относятся: нестационарные температурные поля, акустические шумы и вибрации, переменные электрические и магнитные поля и т.д. В процессе эксплуатации в рабочем диапазоне температур ВОГ испытывает широкодиапазонную и динамическую тепловую нагрузку, которая оказывает значительное влияние на его выходную характеристику. Так в [4] автор отмечает, что в ВОГ при длине оптического волокна в 1км от колебаний температуры в пределах 0,01°С может возникать дрейф показаний, соизмеримый со скоростью вращения земного шара, т.е. порядка 12 — 13°/ч. Известно [5, 6], что технология квадрупольной намотки волокна на катушку в совокупности с выбором материала каркаса, температурной экранировкой оптического контура и применением специальных типов пропиточных компаундов должна давать надежные результаты по минимизации дрейфа ВОГ, возникающего из-за изменения температуры.

Однако, как показала теория и практика [7, 8, 9, 10], одних только широко известных пассивных методов борьбы с температурной зависимостью выходного сигнала ВОГ недостаточно для обеспечения точности показаний ВОГ на уровне 0,01°/ч, требуемой для использования приборов в системах навигационного класса точности. Наиболее очевидным путем повышения точности прибора в этом случае является термостатирование [11]. С другой стороны применение компенсационных методов уменьшения влияния температурных воздействий на полезный сигнал

**7**

волоконно-оптического гироскопа, в отличие от термостатирования, не требует увеличения массово-габаритных характеристик, энергопотребления, а также позволяет значительно сократить время готовности прибора и снизить его себестоимость [А2].

В настоящее время ВОГ производятся многими индустриально развитыми странами (США (Northrop Grumman [12, 13], KVH Industries [14, 15], Honeywell [16]), Франция (IXSEA [17] [18]), Израиль (Cielo [19]), Япония [20] (Mitsubishi Precision Company Ltd, Tokimec Inc. and Japan Aviation Electronics Industry Ltd) и др.). В нашей стране создание прецизионных ВОГ является весьма молодым направлением. В этой области работают компании НПО «Оптолинк», ОАО ПНГПТК, НИИ ПМ [21, 22, 23, 24], ООО «Физоптика»[25, 26] , ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор» [27] С 2005 г. на кафедре «Физики и Техники Оптической Связи» Санкт-Петербургского НИУ ИТМО ведутся работы по созданию прецизионных ВОГ, построенных по схеме с обратной связью и неучтенным уходом не более 0,01°/ч, а также навигационных приборов на их основе [9]. Существует множество публикаций, в которых обсуждается проблема теплового дрейфа [28, 3, 24, 29, 30, 31] и т.д. На основе этих материалов можно с уверенностью сказать о невозможности создания ВОГ навигационного класса точности без учета влияния температурного дрейфа. Поэтому тема диссертационной работы, посвященная исследованию и поиску путей компенсации тепловых воздействий на сигнал волоконно-оптических гироскопов отечественного производства, является весьма актуальной.

**Целью работы** является улучшение точностных характеристик ВОГ за счет уменьшения дрейфа нуля и ухода масштабного коэффициента в выходном сигнале, возникающих при тепловом воздействии на волоконно-оптический гироскоп.

Для достижения цели необходимо решение следующих задач:

* теоретическое исследование влияния температурных воздействий на отдельные элементы ВОГ, вызывающих изменение сигнала гироскопа; выявление среди них элементов, которые оказывают наибольшее влияние на сигнал ВОГ;
* создание математических моделей, описывающих влияние температуры на сигнал ВОГ;

8

* разработка и внедрение системы измерения температуры многофункциональной интегрально-оптической схемы (МИОС) и пространственно-временных градиентов температуры, возникающих в ВОК;
* разработка экспериментальных методов исследования влияния температурных воздействий на отдельные элементы ВОГ;
* проведение исследований с целью установления влияния температурных воздействий на отдельные элементы ВОГ, вызывающие дрейф нуля и уход масштабного коэффициента;
* разработка методов, позволяющих уменьшить тепловой дрейф нуля и уход масштабного коэффициента в сигнале ВОГ.

**Научная новизна работы** заключается в том, что в ней впервые:

1. Предложен новый метод стабилизации масштабного коэффициента, путем введения алгоритма компенсации влияния температуры на значение полуволнового напряжения электрооптического модулятора.
2. Предложен новый метод и создана аппаратура для исследования влияния температурных воздействий на отдельные элементы конструкции ВОГ.
3. Исследованы механизмы появления дрейфа нуля в сигнале ВОГ при воздействии температуры на источник излучения и МИОС.
4. Предложен метод компенсации температурного дрейфа нуля ВОГ при помощи методов факторного анализа и создан оригинальный программно-аппаратный комплекс для набора массива данных влияния ассиметричных тепловых воздействий на сигнал ВОГ.

**Практическое значение работы** состоит в следующем:

Предложенный метод стабилизации масштабного коэффициента позволил исключить ошибку, вызванную влиянием друг на друга первой и второй обратной связи, используемых в цифровой системе обработки сигнала ВОГ. Применение данного метода позволяет производить подстройку величины полуволнового напряжения во всем диапазоне угловых скоростей, позволяет уменьшить время готовности прибора вплоть до момента взятия первого отсчета температуры.

Данные, полученные в результате исследований влияния температуры активных элементов ВОГ на выходной сигнал прибора, позволили выявить основные причины влияния тепловых полей на сигнал ВОГ. На основе этих данных

9

предложены новые конструктивные решения и рекомендации по внесению изменений в технологию изготовления ВОГ.

Применение методов факторного анализа позволило уменьшить дрейф нуля в сигнале ВОГ, вызванный влиянием температурных пространственно-временных градиентов на ВОК.

**Защищаемые положения:**

1. Метод стабилизации масштабного коэффициента путем введения алгоритма компенсации влияния температуры на значение полуволнового напряжения.
2. Получены экспериментальные зависимости влияния элементов волоконно-оптического гироскопа на выходной сигнал прибора при тепловом воздействии. Установлено, что наибольший вклад в отклонение выходного сигнала ВОГ при тепловых воздействиях оказывают в порядке убывания: МИОС, ВОК, источник излучения.
3. Построена модель влияния тепловых воздействий на сигнал ВОГ, которая показывает хорошее соответствие с экспериментальными данными.
4. Метод уменьшения теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа при помощи методов факторного анализа, позволяющего вычислить наиболее важные факторы, оказывающие влияние на сигнал гироскопа и позволяющий рассчитать поправочные коэффициенты, используемые в алгоритмах компенсации в реальном времени.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на VIII Всероссийской межвузовской конференция молодых ученых 2011 г., на I и II Всероссийском конгрессе молодых ученых. (Санкт-Петербург, Россия, 2012, 2013); доклад на последней был удостоен дипломом за лучший доклад на секции «Информационно-измерительные технологии»; на XLI, XLII научных и учебно-методических конференциях НИУ ИТМО (Санкт-Петербург, Россия, 2012, 2013); на VI международной конференции XXVIII конференция памяти Н.Н.Острякова в ОАО "Концерн "ЦНИИ Электроприбор.

**Объектом исследования** являются образцы ИВОГ компенсационного типа с цифровой схемой обработки и оптической схемой, работающей на одной поляризационной моде в составе одноосного гироскопа.

**10**

**Достоверность научных положений.** При проведении исследований применялись общепринятые способы статистического анализа случайных процессов. Математическое моделирование и обработка данных осуществлялись с использованием пакетов прикладных программ для решения задач технических вычислений MatLab и MathCad. Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными, а также подтверждены испытаниями на аттестованном стендовом оборудовании. Стендовое оборудование сертифицировано, по результатам испытаний выпущены протоколы испытаний.

**Внедрение результатов.** Результаты настоящего исследования используются при разработке и производстве ВОГ навигационного класса точности.

Полученные результаты могут быть использованы в аналогичных интерферометрических датчиках, таких как волоконно-оптический датчик тока, напряжения и др.

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 3 статьях, входящих в список ВАК. Полный список публикаций по теме диссертации приведен в конце автореферата и составляет 5 наименований.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести оригинальных глав и заключения, изложена на 112 страницах машинописного текста, содержит 74 рисунка и 4 таблицы, список цитированной литературы содержит 97 наименований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проведен литературный обзор и анализ решений, используемых в ВОГ, направленных на уменьшение влияния тепловых воздействий на сигнал ВОГ. Дано описание и обоснование используемых технических решений в исследуемом ИВОГ навигационного класса точности. Материал диссертационной работы посвящен исследованию ИВОГ навигационного класса точности, с целью уменьшения чувствительности разрабатываемого ВОГ к тепловым воздействиям.

При рассмотрении погрешности выходного сигнала ВОГ, вызванной температурой, необходимо производить ее разделение на две составляющие: мультипликативную и аддитивную. Основными источниками погрешностей ВОГ, вызванных изменением температуры являются:

* искажение МК, вызванное изменением площади оптического контура;
* искажение МК, вызванное нестабильностью длины волны источника оптического излучения;
* искажение МК, вызванное изменением показателя преломления волокна;
* искажение МК, вызванное изменением электрооптического коэффициента электрооптического модулятора;
* сдвиг нуля, вызванный нестабильностью характеристик электронных компонент ВОГ при изменении температуры;
* термооптический сдвиг нуля (эффект Shupe), возникающий из-за того, что при растяжении участка волокна под действием тепла в контуре встречные волны приобретают разные фазовые набеги;
* эластооптический сдвиг нуля, вызванный зависимостью показателя преломления от напряженно-деформированного состояния волокна.

Для повышения стабильности МК предложен и внедрен метод вычисления полуволнового напряжения в режиме реального времени на основании данных, получаемых с датчика температуры позволил устранить взаимное влияние первой и второй обратных связей имеющее место в классическом подходе, уменьшить время прогрева прибора вплоть до времени взятия первого отчета температуры МИОС. При этом данный метод показал работоспособность во всем диапазоне допустимых скоростей вращения ВОГ.

101

Экспериментальные исследования влияния температуры МИОС показали наличие значительного дрейфа нуля, связанного с появлением паразитных интерферометров, что требует введения дополнительных механизмов компенсации.

Для исследования ошибки, возникающей при тепловом воздействии на ВОК, разработана модель, на основании которой было проведено исследование влияния нестационарных тепловых полей внутри катушки на сигнал ВОГ. Исследование показало, что возникающая тепловая ошибка пропорциональна производной температуры ВОК по времени. Так же при помощи модели была выявлено наличие анизотропной чувствительности ВОК к тепловым воздействиям.

Данные, полученные в результате эксперимента, показали корректность построенной модели, а так же было выявлено, что в штатном режиме работы прибора дрейф нуля, связанный с ВОК, значительно меньше теплового дрейфа, связанного с МИОС.

Исследование температурной нестабильности источника излучения показало, что при больших скоростях вращения наибольшее влияние оказывается на изменение масштабного коэффициента, но при малых скоростях вращения более значимым становится экспериментально обнаруженный дрейф нуля. Возникающая при этом ошибка показаний волоконно-оптического гироскопа (из-за дрейфа нуля и изменения масштабного коэффициента) не позволяет достичь необходимой точности волоконно-оптического гироскопа в 0,0і"/ч (la) уже при незначительном изменении температуры источника. Для стабилизации МК необходимо произвести доработку источника с целью повышения стабильности центральной длины волны. Как альтернативный вариант, возможно введение алгоритмической компенсации ухода центральной волны от температуры. Введение механизма нормировки в алгоритм обработки оптического сигнала, детектируемого фотоприемником, позволило уменьшить влияние нестабильности характеристик источника на дрейф нуля ВОГ.

На основании проведенных в работе экспериментов можно сказать, что наибольшее влияние на дрейф нуля оказывает, прежде всего, температурная нестабильность характеристик МИОС и ВОК, а изменение МК связано с уходом полуволнового напряжения и центральной длины источника излучения (таблица 4) .

102

*Таблица 4* - *Термически индуцированные ошибки выходного сигнала ВОГ.*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Элемент | Параметр | Ошибка |
| искажение МК | | |
| МИОС | изменение полуволнового напряжения | 5 ■ 10"4 *"К'1* |
| источник оптического излучения | изменение центральной длины волны источника оптического излучения | 5- Ю-6 *"К'1* |
| волоконно-оптический контур | изменение геометрических размеров (длина волокна, радиус ВОК) | ~5 + 10 • Ю-7 *"К-1* |
| дрейф нуля | | |
| МИОС | изменение параметров стыковки и возникновение паразитных интерферометров | 1,5 • Ю-2 (°/ч) • "Я"-1 |
| волоконно-оптический контур | невзаимные эффекты | 4 ■ 10~3 (°/ч) • °К/ч |
| источник оптического излучения | изменение оптической  **»ЛГЧТТТЧГ\Г"ГЪ1** | 3 ■ Ю-4 (°/ч) • *"К-1* |

В связи с высокой сложностью протекающих в ВОГ физических процессов также предложен метод, алгоритмической компенсации температурного дрейфа показаний ВОГ, основанный на использовании ФА, позволяющий уменьшить СКО в 2 - 3 раза.

Результаты настоящего исследования используются при разработке и производстве ВОГ навигационного класса точности. Полученные результаты могут быть использованы в аналогичных интерферометрических датчиках, таких как волоконно-оптический датчик тока, напряжения и др.

103

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ В ходе настоящего исследования получены следующие основные результаты:

• Предложена и апробирована методика исследования влияния теплового  
воздействия на элементы **ВОГ.** Выявлены основные механизмы влияния  
этих воздействий на выходной сигнал ВОГ. Установлено, что

о при температурном воздействии ВОГ наибольший вклад в дрейф нуля

вносят в порядке убывания: МИОС, катушка, источник излучения о электроника при тепловом воздействии практически не оказывает

влияния на сигнал ВОГ; о изменение температуры МИОС оказывает влияние на МК из-за

чувствительности электрооптического коэффициента к температуре; о на дрейф нуля оказывают воздействие паразитные интерферометры,

обусловленные отражением света от границ состыкованных элементов

оптической схемы; о изменение температуры ВОК оказывает влияние на сигнал ВОГ,

пропорциональное изменению производной температуры катушки по

времени; о изменение масштабного коэффициента в сигнале ВОГ при тепловых

воздействиях на источник происходит из-за смещения центральной

длины волны источника излучения; о тепловые воздействия на источник приводят также к дрейфу нуля

пропорциональному изменению температуры источника.

* Предложенный метод стабилизации масштабного коэффициента путем расчета и корректировки значения полуволнового напряжения позволил исключить взаимодействие первой и второй обратных связей, используемых в цифровой системе обработки сигнала ВОГ. Применение данного метода позволяет производить подстройку величины полуволнового напряжения во всем диапазоне измеряемых прибором скоростей.
* Предложенный алгоритм компенсации тепловых воздействий на ВОГ, основанный на факторном анализе, позволяет уменьшить СКО выходного сигнала ВОГ в 2-3 раза. Кроме того, метод показал повторяемость получаемых результатов от пуска к пуску.

104

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филатов Ю.В. *Оптические гироскопы: Учебное пособие* — СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭ-ТИ», 2005. — 139 с.
2. Lefevre Н.С. 16th OptoElectronics and Commu-nications Conference // Ultimate-performance Fiber-optic Gyroscope: A Reality. — Kaohsiung, Taiwan, 2011. — с 78-75.
3. Lefevre H.C. Proceedings of 19th Saint Peters-burg International Conference on Integrated Navigation Systems // The Fiber-Optic Gyroscope: Achievement And Perspective, 2012. — с 122-126.

4. Окоси Т. *Волоконно-оптические датчики* — Л.: Ленинград,  
Энергоатомиздат, 1990. — 256 с.

1. Киселев С.С, Мешковский И.К., Куликов А.В., Новиков Р.Л. *Дефекты намотки оптического волокна при изготовлении чувствительного элемента волоконно-оптического интерферометра II* Изв. ВУЗов. Приборостроение. — №53, — Выпуск 2. — Санкт-Петербург, 2010. — с. 47-51.
2. Мешковский И.К., Унтилов А.А., Киселев С.С, Куликов А.В., Новиков *Качество намотки чувствительного элемента волоконно-оптического II* Приборостроение. — №54, — Выпуск 7. — 2011. — с. 76-79.
3. Удд.Э *Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников* — М.: Техносфера, 2008. — 500 с.
4. Джашитов В.Э. [и др.] *Иерархические тепловые модели бесплатформенной инерциальной навигационной cue-темы с волоконно-оптическими гироскопами и акселерометрами II* Гироскопия и навигация. — №1., Выпуск 80. — 2013. — с. 49-63.

9. Мешковский И.К. и др. *Трехосный волоконно-оптический гироскоп для  
морских навигационных систем II* Гироскопия и навигация. — №3, — 2009. — с. 3-9.

1. Коркишко Ю.Н. [и др.] XIV Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным на-вигационным системам // Волоконно-оптический гироскоп навигационного класса точности. — СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2007. — с. 141-150.