

Е. В. ДРАНИЦЫНА, Д. А. ЕГОРОВ, А. А. УНТИЛОВ, Г. Б. ДЕЙНЕКА,
И. А. ШАРКОВ, И. Г. ДЕЙНЕКА

СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЫХОДНОЙ СИГНАЛ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Рассматриваются вопросы влияния изменений температуры на выходной сигнал волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) разработки ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», построенного по схеме с обратной связью. Предложены аппаратные и алгоритмические способы снижения этого влияния, а именно: методы компенсации мультипликативной и аддитивной погрешности, вызванной изменением температуры, а также варианты термостабилизации. Применение этих способов позволяет снизить температурный дрейф ВОГ в 10 и более раз.

Введение

Волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) успешно используются в системах навигации, ориентации и стабилизации уже около трех десятилетий. За прошедшее время технологии изготовления всех оптических компонентов ВОГ были значительно улучшены, что позволило ВОГ перейти из класса датчиков угловой скорости низкой и средней точности к классу датчиков навигационной точности [1–3]. Мировыми лидерами в области разработки и производства ВОГ,



Рис. 1. Общий вид ВОГ разработки ЦНИИ «Электроприбор»

а также инерциальных измерительных блоков (модулей) на их основе являются компании Northrop Grumman, IXSEA, KVH, Honeywell и некоторые другие. В нашей стране создание прецизионных ВОГ является весьма молодым направлением. В этой области работают компании НПО «Оптолинк», ОАО ПНППК, НИИ ПМ [4–7, 21]. С 2005 г. ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» совместно с кафедрой физики и техники оптической связи Санкт-Петербургского НИУ ИТМО ведут работы по созданию прецизионных ВОГ (рис.1), построенных по схеме с обратной связью и неучтенным уходом не более 0,01 град/ч, а также навигационных приборов на их

основе [8, 9].

Драницына Елена Викторовна. Аспирант ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

Егоров Дмитрий Александрович. Инженер 1 категории ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Унтилов Александр Алексеевич. Кандидат технических наук, начальник лаборатории ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Член молодежной секции Академии навигации и управления движением.

Дейнека Геннадий Борисович. Кандидат физико-математических наук, доцент Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (НИУ ИТМО).

Шарков Илья Александрович. Аспирант НИУ ИТМО.

Дейнека Иван Геннадьевич. Аспирант НИУ ИТМО.

Статья по докладу на XXVIII конференции памяти Н.Н.Острякова.

Основная проблема при разработке подобных ВОГ (с потенциально достижимой точностью 0,0007 град/ч) 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. Это приводит к паразитным дрейфам и, как следствие, к снижению точности измерений. К таким воздействиям относятся, в частности, нестационарные температурные поля, акустические шумы и вибрации, переменные электрические и магнитные поля. В процессе эксплуатации в рабочем диапазоне температур ВОГ испытывает широкодиапазонную и динамическую тепловую нагрузку, которая оказывает значительное влияние на его выходную характеристику. Поэтому ключевым вопросом при создании бескарданных систем на ВОГ навигационного класса точности является компенсация дрейфов, вызванных изменением температуры [10, 12–17]. Для обеспечения требуемой точности морских бесплатформенных инерциальных навигационных систем необходима стабильность масштабного коэффициента (МК) входящих в них ВОГ во всем рабочем диапазоне температур на уровне $3 \cdot 10^{-6}$, а дрейф нуля не должен быть хуже 0,01 град/ч.

Целью данной статьи является анализ результатов исследования различных конструктивных и алгоритмических методов борьбы с зависимостью выходного сигнала ВОГ от температуры в применении к ВОГ, разрабатываемому ЦНИИ «Электроприбор».

Основные механизмы влияния изменения температуры на выходной сигнал ВОГ

Состав и особенности построения рассматриваемого ВОГ приведены в [8, 9]. На рис. 2 показаны основные компоненты ВОГ, а также отмечены основные механизмы влияния изменения температуры на его выходной сигнал. На рисунке обозначены: МИОС – многофункциональная интегральная оптическая схема, ВОК – волоконно-оптическая катушка, КЛТР – коэффициент линейного температурного расширения.

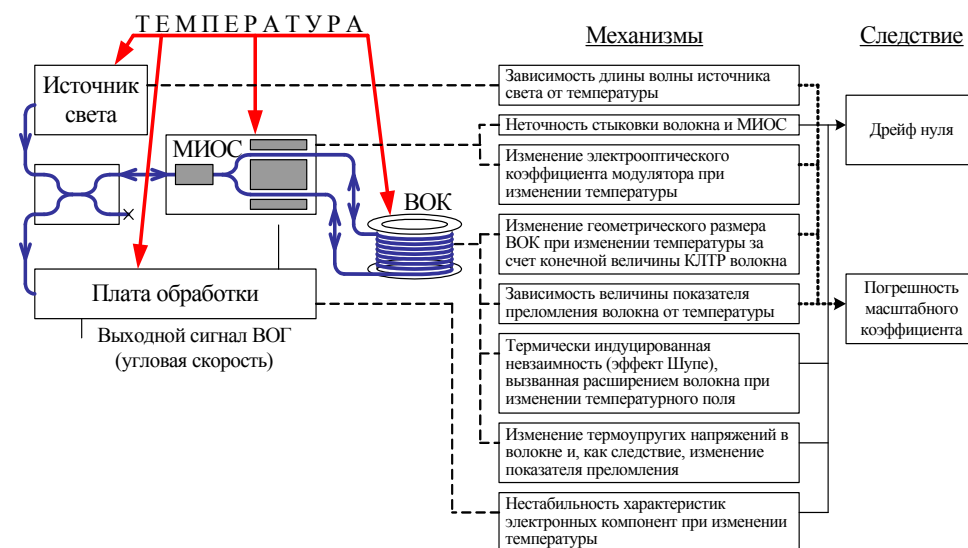


Рис. 2. Основные компоненты ВОГ и механизмы влияния изменения температуры на выходной сигнал ВОГ

Погрешность выходного сигнала ВОГ, вызванную температурой, можно разделить на две части: мультипликативную и аддитивную [10,15]. Основные источники погрешностей ВОГ, вызванных изменением температуры, и механизмы их возникновения, представлены ниже.

Составляющие мультипликативной погрешности, или погрешности масштабного коэффициента (МК), вызванные:

- изменением площади оптического контура;
- нестабильностью длины волны источника света;
- изменением коэффициента преломления волокна;
- изменением электрооптического коэффициента модулятора МИОС.

Составляющие аддитивной погрешности (смещение нуля):

- смещение электрического нуля, вызванное нестабильностью характеристик электронных компонент ВОГ при изменении температуры;
- термооптическое смещение нуля (эффект Шупе) [13,14], возникающее из-за того, что при растяжении участка волокна под действием тепла в контуре встречные волны приобретают разные фазовые набегги;
- эластооптическое смещение нуля, вызванное зависимостью коэффициента преломления от напряженно-деформированного состояния волокна [14].

Проблема влияния изменения температуры на выходной сигнал ВОГ, в дополнении к уже реализованным в гироскопе конструктивным решениям (расположение катушек ВОГ и плат электроники, специальная конструкция корпусных элементов и теплоотводов и т.п.), может быть решена еще двумя способами: *термостатированием прибора и введением температурной компенсации выходного сигнала*. Первый способ является энергетически затратным и приводит к существенному увеличению габаритов и энергопотребления прибора, а также к необходимости ожидания стабилизации температуры при запуске системы термостатирования и, следовательно, к увеличению времени готовности прибора. Второй способ является предпочтительным, так как не приведет к увеличению габаритов и энергопотребления и позволит значительно уменьшить влияние температуры на выходной сигнал, а также сократить время готовности прибора. Необходимо отметить, что возможна и комбинация этих двух способов [10, 20, 22].

Рассмотрим вначале конструктивные способы борьбы с термоиндуцированными погрешностями ВОГ, применяемые в рассматриваемой конструкции.

Применение специального источника света

Для исключения влияния изменения длины волны источника света под воздействием температуры на величину МК был применен эрбиевый волоконный суперлюминесцентный источник света с исправленной спектральной характеристикой. В данном источнике осуществляется стабилизация мощности оптического излучения по току накачки при изменениях температуры. Были проведены исследования зависимости длины волны источника света от температуры в режиме стабилизации. Как видно из графика на рис. 3, при изменении температуры не происходит значимого перераспределения оптической мощности между длинами волн.

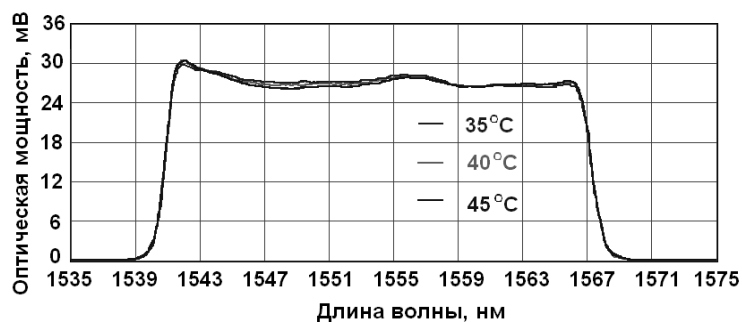


Рис.3. Зависимость оптической мощности источника света от длины волны

Применение специальной намотки оптического волокна

Для минимизации термооптического смещения нуля была применена специальная квадрупольная намотка волокна, которая обеспечивает одинаковую температурную нагрузку участков волокна, равноудаленных от середины оптического контура (рис. 4). Намотку оптического волокна производят, начиная с его середины, попеременно левой и правой его половиной [8, 9]. Для минимизации эластооптического смещения нуля каркас волоконно-оптической катушки выполняют из кварца или керсила, коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР) которого не превышает КЛТР волокна. Также для равномерного распределения температурного поля внутри катушки применяются заливка волокна специальным компаундом и двойное экранирование металлическим экраном.

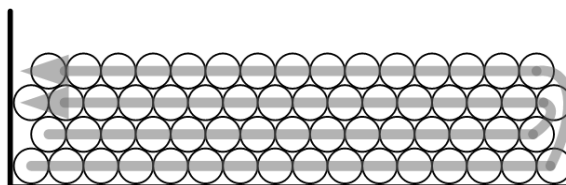


Рис. 4. Квадрупольная намотка оптического волокна на катушку ВОГ

Как показали эксперименты, только конструктивных методов борьбы с температурной зависимостью выходного сигнала ВОГ недостаточно для обеспечения точности показаний ВОГ на уровне 0,01 град/ч [10]. Далее будут рассмотрены вопросы алгоритмической компенсации температурной зависимости и термостатирования.

Компенсация зависимости электрооптического коэффициента модулятора МИОС от температуры

Рассмотрим механизм влияния изменения электрооптического коэффициента модулятора МИОС на выходной сигнал ВОГ.

Как известно, оптическая мощность детектируемого фотоприемником излучения изменяется по косинусоидальному закону. Для получения максимально возможной чувствительности этот сигнал смещается в рабочую область, где зависимость наиболее линейна [11, 16, 17]. Данную задачу в современных гироскопах решает электрооптический модулятор, изготовленный из ниобата лития. Введение обратной связи, заключающейся в линейном нарастании фазового сдвига пропорционально скорости вращения, позволяет вернуть сигнал в рабочую точку. Это достигается путем постоянного увеличения напряжения, подаваемого на модулятор (рис. 5).

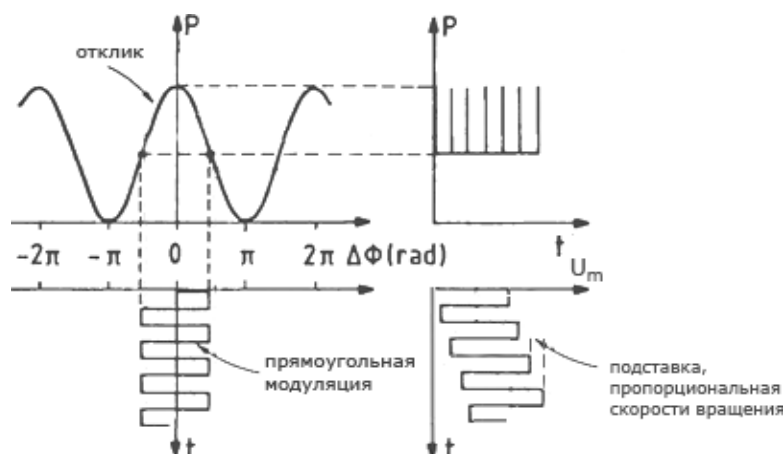


Рис.5. Прямоугольная смещающая модуляция

Однако рост фазы не может быть бесконечным, так как реальный модулятор имеет ограниченный диапазон сдвига фазы. На практике, в соответствии со схемой Лефевра [17], используется пилообразная модуляция, состоящая из двух внешне различных частей – так называемых узкой и широкой «пилы». Переход с узкой на широкую часть «пилы» обеспечивается изменением фазы модулятора на 2π . Напряжение, при котором модулятор обеспечивает сдвиг фаз между двумя световыми волнами, равный 2π , называется волновым и далее обозначается $U_{2\pi}$.

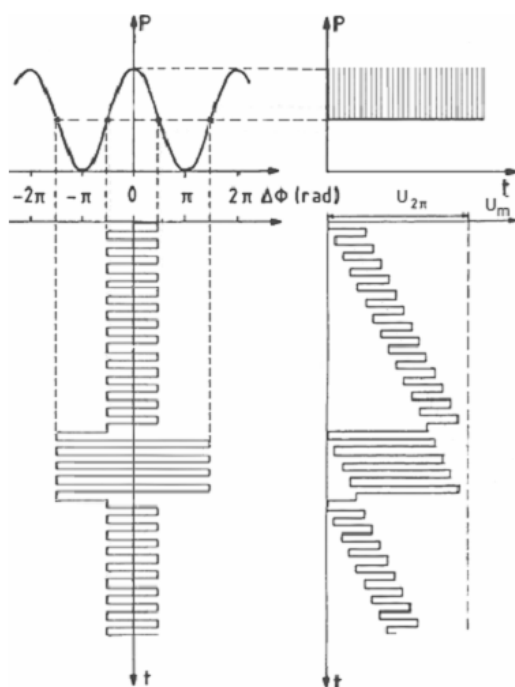


Рис. 6. Сброс модулирующего напряжения на $U_{2\pi}$

При правильном подборе $U_{2\pi}$, разность интенсивности интерференционного сигнала на фотоприемнике должна быть равна нулю. В противном случае упомянутая разность воспринимается как сигнал, который вводится во вторую обратную связь для подстройки напряжения, соответствующего сдвигу фазы на 2π (рис. 6).

Число переходов с узкой на широкую «пилу» возрастает с увеличением скорости вращения и при высоких скоростях частота корректировки напряжения становится близкой к частоте измерения скорости вращения по основной обратной связи. Это приводит к искажению результатов измерений скорости вращения и соответствующего напряжения модуляции. Более того, волновое напряжение $U_{2\pi}$ напрямую входит в формулу определения МК

и оказывает непосредственное влияние на точность показаний гироскопа.

Под воздействием температуры изменяется множество характеристик ис-

пользуемого в модуляторе МИОС кристалла ниобата лития, влияющих на его оптические свойства. Однако на показания ВОГ могут оказать влияние лишь те факторы, которые приводят к изменению разности фаз между встречными лучами. Анализ литературы показал, что таким параметром является зависящий от температуры электрооптический коэффициент Поккельса [11]. Напряжение, которое необходимо приложить к модулятору, чтобы вызвать смещение фазы на π , можно найти по формуле

$$U_{\pi} = \frac{\lambda d}{2n_0^3 r_{33} L}, \quad (1)$$

где λ – длина волны излучения; n_0 – коэффициент преломления; r_{33} – электрооптическая постоянная кристалла; L – длина пути в веществе.

Зависимость электрооптического коэффициента используемой в модуляторе кристаллографической оси от температуры по данным, известным из литературы, имеет линейный вид (рис. 7)

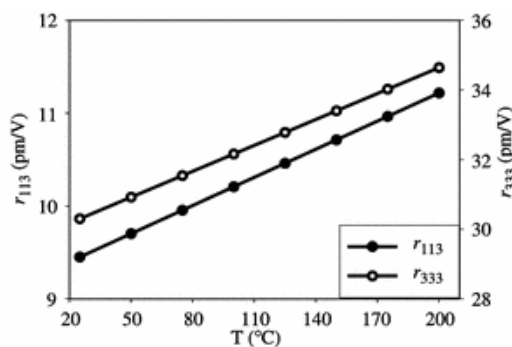


Рис. 7. Зависимость электрооптического коэффициента от температуры из [11].

[11]. Очевидно, что зависимость полуволнового напряжения от температуры также имеет линейный вид [19]. После ряда измерений, была выявлена форма зависимости волнового напряжения от температуры в используемых образцах модуляторов. Температуру определяли как по среднему значению нескольких датчиков температуры, установленных на волоконной катушке (при этом на выходной характеристике наблюдался гистерезис), так и установкой дополнительного датчика температуры непосредственно на поверхности кристалла ниобата лития. В этом случае зависимость приобрела практически линейный вид (рис. 8). Сопоставление полученных результатов с данными, опубликованными в работах [11, 18, 19], подтверждает, что температурная зависимость электрооптического коэффициента Поккельса в модуляторе является основной причиной изменения значения $U_{2\pi}$.

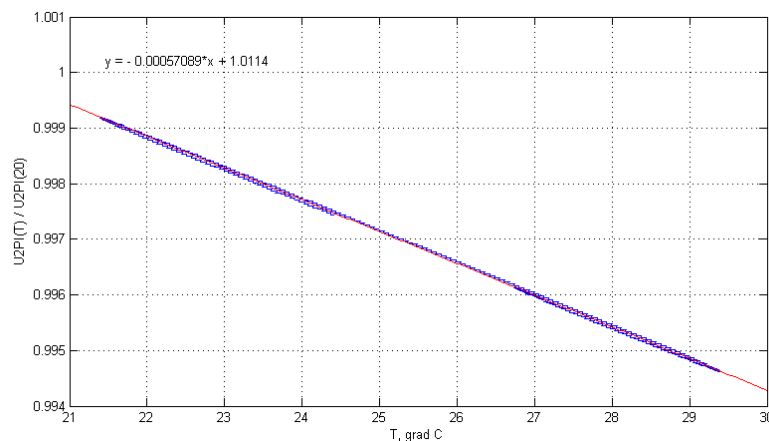


Рис. 8. Вид нормированной зависимости полуволнового напряжения от температуры МИОС

На данный момент полученная зависимость $U_{2\pi}(T)$ используется в плате обработки ВОГ для определения действительного значения $U_{2\pi}$ в реальном времени.

Использование термостатирования

Даже после применения всех вышеперечисленных методов борьбы с термоиндуцированной погрешностью наблюдается зависимость выходного сигнала ВОГ от температуры, которую можно уменьшить путем использования алгоритмической компенсации. Но при резких изменениях температуры, а также при изменении температуры окружающей среды в широких пределах термокомпенсация не всегда может полностью устранить влияние температуры на погрешность ВОГ. Поэтому было бы желательно вначале снизить влияние градиентов температуры, а также уменьшить температурный диапазон работы ВОГ и систем на его основе с помощью термостатирования [10, 20–22].

Одним из способов реализации такого термостатирования является установка бесплатформенного инерциального модуля (БИМ) с ВОГ в устройство стабилизации температуры (УСТ). Применение УСТ позволяет сгладить градиенты температуры внутри прибора при резких изменениях температуры окружающей среды, а также сузить до 0,5–1 °С диапазон работы ВОГ внутри прибора, что, в свою очередь, позволяет повысить эффективность алгоритмической термокомпенсации.

Требуемый диапазон температур работы прибора определяется областью применения и объектом, на котором установлено изделие. В данной статье рассматриваются только результаты исследования для температур, близких к комнатным.

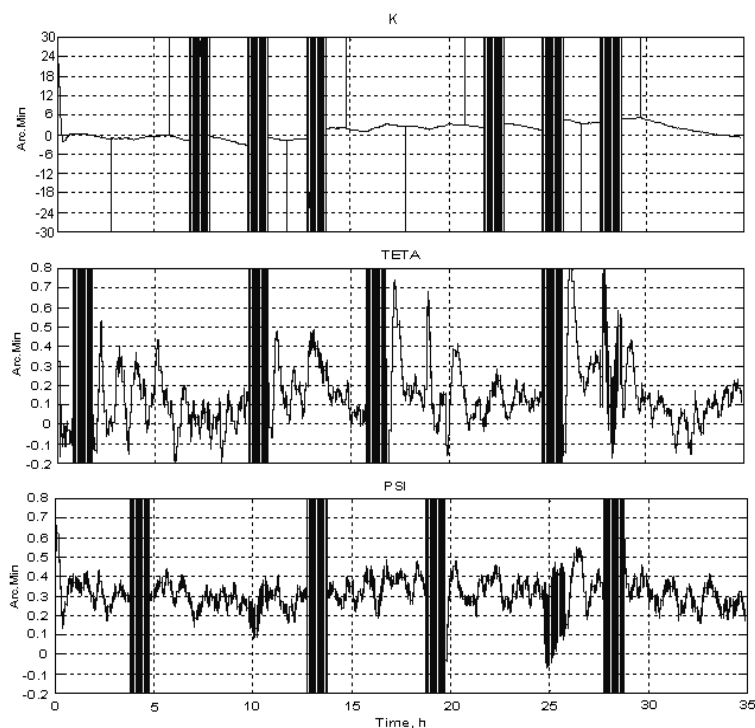


Рис. 9. Результаты испытаний прибора БИМ с системой термостатирования

На рис. 9 приведены результаты испытаний БИНС при термостатировании. В течение 35 ч прибор подвергался различным одноосным и двухосным качкам

со следующими параметрами:

- бортовая качка: амплитуда – до 30°, период – до 8 с;
- килевая качка: амплитуда – до 20°, период – до 7 с;
- рыскание: амплитуда – до 5°, период – до 3 с.

Температура поддерживалась в пределах $(23,0 \pm 0,1)^\circ\text{C}$. Внешняя температура в помещении изменялась естественным образом от 20 до 30°C. При этом погрешность определения курса не превышала 6 угл. мин, а погрешность определения углов качек – 1 угл. мин.

Применение алгоритмической компенсации зависимости выходного сигнала ВОГ от температуры

Рассмотрим варианты алгоритмической компенсации зависимости выходной характеристики ВОГ от температуры.

Если попытаться классифицировать упоминаемые в публикациях методики компенсации температурной зависимости выходного сигнала, то их можно разделить на три типа.

1. Интерполяция параметров калибровки, полученных на нескольких температурах. Она проста в реализации, но не эффективна при динамическом изменении температуры.

2. Динамическая модель зависимости параметров калибровки от температуры и скорости изменения температуры по одному термодатчику, расположенному во внутреннем объеме ВОГ. Она подходит для датчиков среднего и низкого класса точности и не подходит для ВОГ навигационного класса точности, так как не компенсирует термооптическое смещение нуля.

3. Динамическая модель зависимости параметров калибровки от температуры, скорости изменения температуры и пространственного градиента температуры, определяемых по нескольким термодатчикам, расположенным в непосредственной близости к волоконному контуру. Эта модель должна обеспечить высокую точность компенсации, и далее подробно рассмотрим нахождение именно такой модели.

Для построения модели компенсации температурной погрешности смещения нуля и нестабильности МК на волоконно-оптической катушке были размещены равномерно восемь термодатчиков. Во время термокалибровки прибор БИМ с тремя ВОГ размещался на прецизионном трехосном поворотном стенде «Asutronic» АС3367 с термокамерой. В термокамере задавался температурный режим, обеспечивающий максимальное перекрытие значений температур и скоростей изменения температур в рассматриваемом диапазоне. Стендом задавалось сложное движение, включающее стоянки в различных положениях и вращения, предназначенное для разделения зависимостей смещения нуля и МК от температуры.

После термокалибровки прибора БИМ находилась корреляция МК и дрейфа нуля ВОГ с данными о величине температуры, скорости ее изменения, а также пространственного градиента температуры и строилась температурная модель. Результаты применения модели приведены на рис. 10 и 11. На графиках черным цветом показаны значения величин до компенсации, светлым – после компенсации.

На рис.10 приведены результаты испытаний прибора в термокамере в рабочем диапазоне температур, с различными профилями изменения температуры.

Видно, что термоиндуцированная нестабильность дрейфа нуля снижается в 2-8 раза после введения тепловой модели и становится практически незаметной на фоне шума.

На рис.11 приведены результаты компенсации зависимости МК от температуры. По графикам видно, что нестабильность МК снижается на порядок после введения термокомпенсации, но все равно еще на порядок превышает допустимую величину. Это, вероятно, обусловлено колебаниями оптической мощности в местах стыковки волокна и МИОС во время нагрева или охлаждения, поэтому требуются дальнейшие исследования.

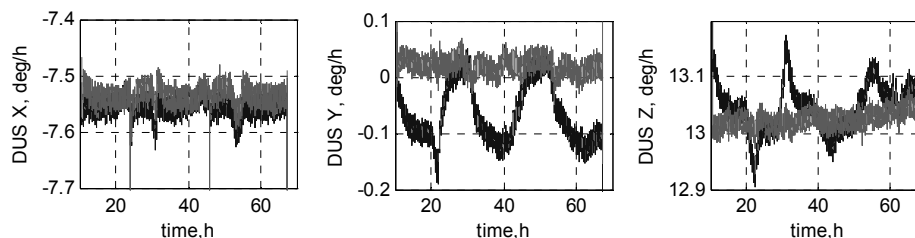


Рис. 10. Компенсация зависимости дрейфа нуля от температуры

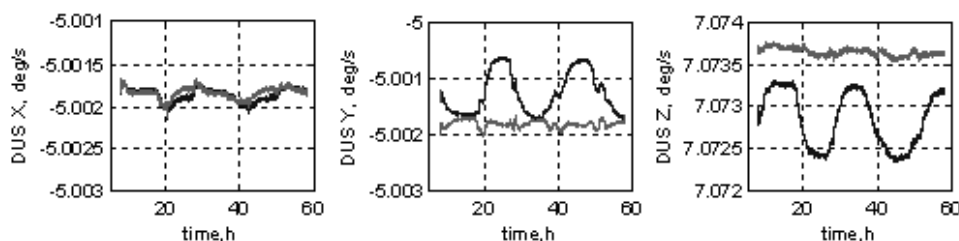


Рис. 11. Компенсация зависимости масштабного коэффициента от температуры

Заключение

1. Проведены исследования механизма влияния изменения температуры на погрешность прецизионного ВОГ. Рассмотрены составляющие погрешности ВОГ – аддитивная и мультипликативная, обусловленные воздействием температуры.
2. Рассмотрены конструктивные методы борьбы с термоиндуцированной погрешностью применительно к ВОГ разработки ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».
3. Рассмотрены способы борьбы с остаточной термоиндуцированной погрешностью: термостатирование прибора и термокомпенсация выходного сигнала как в части смещения нуля, так и в части МК.
4. Термостатирование прибора обеспечивает необходимую точность выходного сигнала ВОГ в рабочем диапазоне температур, но приводит к значительному увеличению габаритов и энергопотребления прибора.
5. Показана важность учета и компенсации температурной зависимости коэффициента передачи модулятора МИОС ВОГ, построенного по замкнутой схеме, и описан способ компенсации этой зависимости для устранения одной из составляющих ошибок МК.

6. Введение термокомпенсации снижает величину дрейфа нуля ВОГ в 2-8 раз, а нестабильность МК – примерно на порядок. Но в настоящее время термокомпенсация не обеспечивает требуемую точность МК ВОГ в диапазоне рабочих температур.
7. Для достижения требуемой точности в рабочем диапазоне температур необходимо более тщательно исследовать влияние пространственного распределения температуры, а также колебания оптической мощности в месте стыковки волокна и МИОС во время нагрева или охлаждения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 10-08-00904-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Lefevre H.C.** Ultimate-performance Fiber-optic Gyroscope: A Reality // 2011 16th OptoElectronics and Communications Conference, Kaohsiung, Taiwan, 2011. P.75-78.
2. **Lefevre H.C.** The Fiber-Optic Gyroscope: Achievement And Perspective // Proceedings of 19th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. 2012. С.122-126.
3. **Лукьянов, Д.П.** Лазерные и волоконно-оптические гироскопы: Состояние и тенденции развития // Гироскопия и навигация. - 1998. - № 4(23). - С. 20-45.
4. **Интерферометрические** волоконно-оптические гироскопы с линейным выходом / В.Е.Прилуцкий [и др.] // Гироскопия и навигация. - 2004. - № 3. - С.62-72.
5. **Разработка** двухрежимного гирогоризонткурсоуказателя на базе трехкомпонентного волоконно-оптического гироскопа / А.П.Колеватов [и др.]// Гироскопия и навигация. - 2007.- № 2 (57).- С. 43-53.
6. **Волоконно-оптический** гироскоп бесплатформенных инерциальных систем навигационного класса. Разработка, термокомпенсация, испытания /А.Колеватов [и др.] // Гироскопия и навигация. - 2010. - № 3. - С. 49-60.
7. **Курбатов, А.М.** Пути повышения точности волоконно-оптических гироскопов / А.М.Курбатов А.М., Р.А. Курбатов // - Гироскопия и навигация. - 2012. - № 1. - С. 102-121.
8. **Мешковский, И.К.**Трехосный волоконно-оптический гироскоп для морских навигационных систем /И.К.Мешковский [и др.] // Гироскопия и навигация. - 2009. - № 3. - С. 3-9.
9. **Мешковский, И.К.** Трехосный волоконно-оптический гироскоп. Результаты разработки /И.К. Мешковский [и др.]// XVIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – Спб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2011. - С. 8-14.
10. **Драницына, Е.В.** Исследование зависимости выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа от температуры в составе бескарданного инерциального измерительного модуля / Е.В. Драницына, Д.А. Егоров // Навигация и управление движением // XIV конференция молодых ученых «Навигация и управление движением». – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор». 2012. – С. 447-452.
11. **Gorski, P., Ledzion, R., Bondarczuk, K., Kucharczyk, W.** Temperature dependence of linear electrooptic coefficients r_{113} and r_{333} in lithium niobate. Opto-Electronics Review. March 2008, Volume 16, Issue 1, pp. 46-48.
12. **Тепловой** дрейф волоконно-оптического гироскопа / Е.И. Вахрамеев // Приборостроение. - 2011. - №1. С. 32-37.
13. **Shupe, D.M.** Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer // Applied optics 19, 1980, 654-655.
14. **Mohr, F., Schadt, F.** Error signal formation in FOGs through thermal and elasto-optical environmental influences on the sensing coil. // Inertial Sensors and Systems, 2011. С. 2.1-2.13.
15. **Голиков, А.В.** Температурные погрешности волоконно-оптических гироскопов: Дис. ... канд. техн. наук. Саратов. 2001. - 197 с.
16. **Филатов, Ю.В.** Оптические гироскопы: Учебное пособие. - СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ЦНИИ «Электронприбор», 2005. - 139 с.
17. **Lefevre, H.** The Fiber-Optic Gyroscope. - Artech House, London, 1992, 314 p.
18. **Wong, K.K.,** Properties of Lithium Niobate, 2002, С. 136-137.
19. **Zook, D.J., Chen, D., and Otto, G.N.** Honeywell Corporate Research Center Hopkins, Minnesota. Temperature Dependence and model of the electro-optic effect in LiNbO_3 . Applied physics letters. - 1967. -Volume 11, Number 5. - С. 159-161.

20. **Джашитов, В.Э.** Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий./Под общ. ред. академика РАН В.Г. Пешехонова / В.Э. Джашитов, В.М. Панкратов. – СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2005.-404 с.
21. **Волоконно-оптический гироскоп** навигационного класса точности / Ю.Н.Коркишко [и др.] //XIV С.- Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам. С.-Петербург, ГНЦ РФ «ЦНИИ «Электроприбор», 2007. - С.141-150.
22. **Обеспечение** термоинвариантности волоконно-оптического гироскопа /В.Э.Джашитова [и др.] //Гироскопия и навигация. – 2011. - №4. - С. 42-56.

Abstract. The article considers the effect of temperature changes on the output of closed-loop fiber-optic gyroscope (FOG) developed by Concern CSRI Elektropribor, JSC. Hardware and algorithmic methods to reduce this effect are proposed, including compensation of multiplicative and additive errors caused by temperature changes, and various thermal stabilization options. These methods reduce FOG temperature drifts by 1-2 orders of magnitude.

Key words: effect of temperature, fiber-optic gyroscope, thermal stabilization options, magnitude