

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА БАЗЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

М.И. КОПТЕНКОВ, *асп. каф. системы автоматического управления МГУЛ, вед. инженер-конструктор филиала ФГУП «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова»,*

mkoptenkov@gmail.com

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса»
141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, д. 1

ФГУП «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры» – «Научно-исследовательский институт прикладной механики имени академика В. И. Кузнецова», 111123, Москва, ул. Авиамоторная, д. 55

Представлены основные сведения о принципах волоконно-оптических гироскопов (ВОГ). Проведен анализ потенциальной точности ВОГ. Рассмотрены источники возникновения шумов в полезном сигнале в волоконно-оптическом гироскопе. Паразитный сигнал возникает из-за разницы температур окружающей среды и чувствительной катушки, равномерности ее нагрева – температурных градиентов. При растяжении участка оптоволокна в контуре встречные световые волны приобретают разные фазовые набег. Такое явление называют эффектом (эффект Шьюпа). Поляризованная электромагнитная волна, проходящая через магнитооптический контур или сквозь магнитное поле, поворачивает плоскость своей поляризации. Такое явление обусловлено невязимным эффектом Фарадея. Нелинейный электрооптический эффект носит название эффекта Керра. Эффект Керра состоит в изменении коэффициента преломления среды под воздействием на нее электромагнитного поля. Показаны принципиальные физико-оптические схемы ВОГ и их основные характеристики. К первому классу точности относятся ВОГ, обеспечивающие нестабильность сдвига нуля в диапазоне 1–10 °/час. Такие гироскопы построены по «минимальной конфигурации», или «open-loop». Ко второму классу точности относятся ВОГ, обеспечивающие нестабильность сдвига нуля в диапазоне 0,01–1 °/час. Такие гироскопы имеют активную обратную связь, или «closed-loop». К третьему классу точности относятся ВОГ, обеспечивающие нестабильность сдвига нуля в диапазоне 0,01–0,0001 °/час. В таких гироскопах помимо активной обратной связи «closed-loop» был применен метод компенсации шума источника излучения. Рассмотрена оптико-физическая схема волоконно-оптического гироскопа на деполаризованном излучении. Деполаризованный ВОГ имеет свободную поляризацию и является наиболее интересным для достижения высокой точности и при невысокой цене.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, деполаризованное излучение, оптико-физическая схема, деполаризатор Лию, интегрально-оптическая схема, эффект Керра, эффект Фарадея, эффект Шьюпа, эффект Саньяка, минимальная схема, закрытая петля.

В настоящее время во всем мире все больше внимания уделяется проектированию измерительных устройств на базе волоконно-оптических гироскопов (ВОГ), ввиду их преимуществ над другими типами гироскопов, прежде всего традиционным механическим гироскопам. Достоинство ВОГ заключается, прежде всего, в широком динамическом диапазоне измеряемых скоростей, отсутствии вращающихся элементов, отсутствии вибрации и акустического шума, высокой точности и низкой себестоимости (при сравнении с лазерным гироскопом), малом энергопотреблении. К достоинствам ВОГ также можно отнести приемлемые массогабаритные характеристики, простоту расчетов параметров и их конструкцию.

В основе принципа действия волоконно-оптического гироскопа лежит «вихревой» эффект Саньяка. Французский физик Жорж Саньяк в 1913 г. открыл «вихревой оптический эффект», позволяющий оптическими способами измерять скорость вра-

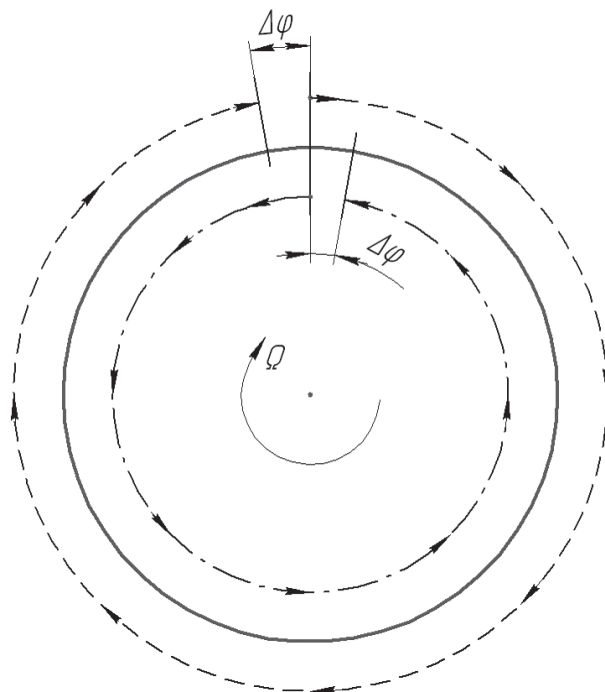


Рис. 1. Кинематическая схема вихревого эффекта Саньяка

Fig. 1. Cinematic scheme of the Sagnac swirling effect

щения [6, 7]. Сущность вихревого эффекта заключается в следующем. Если в замкнутый оптический контур заводится сколлимированная и поляризованная световая волна, которая разделяется на две световые волны, что распространяются в противоположных направлениях, то при неподвижном контуре фазовые набегі обеих световых волн, прошедших весь контур, будут одинаковыми. При вращении контура вокруг оси, нормальной к плоскости контура, фазовые набегі световых волн неодинаковы, а разность фаз лучей пропорциональна угловой скорости вращения контура.

На рис. 1 изображен плоский замкнутый оптический контур произвольной формы, в котором распространяются в противоположных направлениях две световые волны 1 и 2. Плоскость контура перпендикулярна оси вращения, проходящей через произвольную точку О. Угловую скорость вращения контура обозначим Ω .

Если относительное запаздывание встречных световых волн, возникающее при вращении, выразить через разность фаз встречных световых волн, то она составит

$$\Delta\varphi_c = \frac{8 \cdot \pi \cdot N \cdot S}{\lambda \cdot c} \cdot \Omega, \quad (1)$$

где N – число витков оптического контура;

S – площадь контура;

λ – длина волны;

c – скорость света.

Для круглого волоконно-оптического контура выражение (1) примет вид

$$\Delta\varphi_c = \frac{4 \cdot \pi \cdot R \cdot L}{\lambda \cdot c} \cdot \Omega, \quad (2)$$

где L – длина волокна в оптическом контуре;

R – радиус контура.

Разность фаз $\Delta\varphi$ является фазой Саньяка. Как видно, фаза Саньяка пропорциональна угловой скорости вращения контура. Рассмотрев подробно формулу (1), можно сказать об одной особенности ВОГ. Его параметры в основном зависят от длины намотанного волокна и радиуса оптического контура. Тем самым можно изменять точность ВОГ, увеличивая или уменьшая площадь волоконного контура. Такая гибкость в изменении параметров ВОГ путем изменения его

геометрии является важным преимуществом ВОГа, поскольку одни и те же компоненты и технология сборки могут быть использованы для создания гироскопов разного класса точности без значительного изменения конструкции.

Теоретическая чувствительность ограничена фотонным дробовым шумом фотодетектора, его также называют квантовым шумом, анализ которого основывается на утверждении, что суммирование N некоррелированных дискретных частиц, таких как фотоны, является случайным процессом со средним квадратичным отклонением, равным $\sqrt{N}$. Так как уровень фотонных шумов зависит от интенсивности оптического излучения, падающего на фотодетектор, запишем выражение, определяющее мощность падающего излучения

$$P = 2P_0(1 + \cos\varphi), \quad (3)$$

где P_0 – мощность входящего излучения.

При статическом смещении по фазе в рабочую точку характеристики с наибольшей чувствительностью это выражение принимает вид

$$P = 2P_0(1 - \sin\varphi). \quad (4)$$

Если фотодетектор принимает поток фотонов, то число обнаруживаемых фотонов в единицу времени является случайной величиной. Число фотонов, падающих на фотодетектор, за время интегрирования T равно средней энергии, деленной на энергию одного фотона

$$\bar{N} = \frac{2 \cdot P_0 \cdot T}{h\nu}, \quad (5)$$

где h – постоянная Планка;

ν – частота излучения.

Среднеквадратическое значение отклонения числа фотонов для пуассоновского распределения

$$\sigma = \sqrt{\bar{N}}. \quad (6)$$

Учитывая линейность выходной характеристики в районе нуля, найдем среднеквадратическое значение «фазового» шума как флуктуацию мощности и числа фотонов

$$\delta\varphi = \delta P/P_0 = \delta N/N. \quad (7)$$

С учетом выражения (4) получим, что среднеквадратическое отклоне-

ния флуктуации фазы выходного сигнала равно

$$\sigma_{\varphi} = \sqrt{\frac{h \cdot \nu \cdot \Delta f}{2P_0}}, \quad (8)$$

где Δf – полоса пропускания системы обнаружения и обработки сигнала (фильтрация), $\Delta f = 1/T$.

Рассмотрим одно из распространенных значений $P_0 = 1 \cdot 10^{-4}$ Вт, $\nu = 3 \cdot 10^{14}$ Гц. Тогда

$$\frac{\sigma_{\varphi}}{\sqrt{\Delta f}} \approx 3 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\sqrt{\text{Гц}}}; \quad \sigma_{\varphi} \approx 3 \cdot 10^{-8} \sqrt{\frac{1}{T}}. \quad (9)$$

Отсюда следует вывод, что при полосе пропускания 1 Гц предел чувствительности по измеряемой фазе имеет порядок, равный 10^{-7} рад. Полоса пропускания 1 Гц соответствует времени усреднения 1 с.

Для определения среднеквадратической ошибки измерения угловой скорости вращения, обусловленной фотонным шумом, воспользуемся выражением для фазы Саньяка (1), подставим в него выражения (8), получим выражение

$$\Omega_{\min} = \frac{c}{2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot L \cdot R} \cdot \sqrt{\frac{h \cdot \nu \cdot \Delta f}{2P_0}}. \quad (10)$$

Масштабный коэффициент ВОГа связывает сдвиг фазы выходного сигнала со скоростью вращения

$$K = \frac{\Delta \varphi_c}{\Omega} = \frac{4 \cdot \pi \cdot R \cdot L}{\lambda \cdot c}. \quad (11)$$

Возьмем следующие параметры для расчета $L = 1 \cdot 10^6$ мм, $R = 50$ мм, $P_0 = 1 \cdot 10^{-4}$ Вт, $\nu = 3 \cdot 10^{14}$ Гц, $\lambda = 3 \cdot 10^{-6}$ мм. Рассчитаем масштабный коэффициент

$$K = \frac{\Delta \varphi_c}{\Omega} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot 10^3 \text{ м}}{10^{-6} \text{ м} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}} \approx 2 \text{ рад} / \frac{\text{с}}{\text{с}}. \quad (12)$$

Вычислим минимальную скорость вращения, которую можно почувствовать на фоне фотонного шума фотодетектора. Для этого из выражения (8) с учетом выражения (9) выразим $\Omega = \Omega_{\min}$

$$\Omega_{\min} \approx 3 \cdot 10^{-8} \sqrt{\frac{1}{T}} \cdot \frac{1}{K} \approx 3 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{1}{T}} \text{ рад} / \frac{\text{с}}{\text{с}}. \quad (13)$$

При полосе пропускания в 1 Гц, что соответствует времени усреднения 1 с, для оптического контура с площадью $LR = 5 \cdot 10^7$ мм² порог регистрации скорости вращения составляет

$$\Omega_{\min} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ рад} / \frac{\text{с}}{\sqrt{\text{с}}}. \quad (14)$$

При усреднении в течение часа получаем выражение для минимального случайного дрейфа ВОГ

$$\Omega_{\min} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ рад} / \frac{\text{с}}{\sqrt{\text{час}}}. \quad (15)$$

По полученным результатам минимальной чувствительности фотодетектором скорости вращения ВОГ следует отнести к высокоточным гироскопическим приборам.

Однако на практике не получается реализовать такую точность. Для реализации высокой точности необходимо обеспечить высокую стабильность и чувствительность, учесть влияние шумов. Рассмотрим источники шумов, возникающие в ВОГ.

Влияние температурных градиентов

В волоконно-оптической катушке вследствие тепловых градиентов происходит неравномерное расширение оптоволокон. При растяжении участка волокна в контуре встречные световые волны приобретают разные фазовые набег. Это приводит к невзаимным паразитным эффектам. Такое явление называют термооптическим эффектом (эффект Шьюпа).

Эффекту влияния температурных градиентов на волоконную катушку уделено много внимания во многих работах [8]. Перейдем к рассмотрению выражения, описывающего температурное влияние на фазу Саньяка

$$\varphi_T = \frac{\pi \cdot L^2 \cdot n \cdot \Delta T}{\lambda \cdot c} \left(\frac{dn}{dT} + \alpha n \right), \quad (16)$$

где L – длина волокна в оптическом контуре;
 n – коэффициент преломления волокна;
 α – линейный коэффициент теплового расширения;

ΔT – изменение температуры.

Проанализировав уравнение (16), можно сделать вывод, что температурное воздействие на волокно вносит большие фазовые набег, соизмеримые со скоростью вращения Земли. Поэтому необходимо держать температуру в заданном режиме и с высокой точностью. Величина термооптического эффекта зависит от коэффициента температурного расширения материала. Применение специальных видов намотки волокна на каркас катушки является одним из методов уменьшения влияния температурных погрешностей.

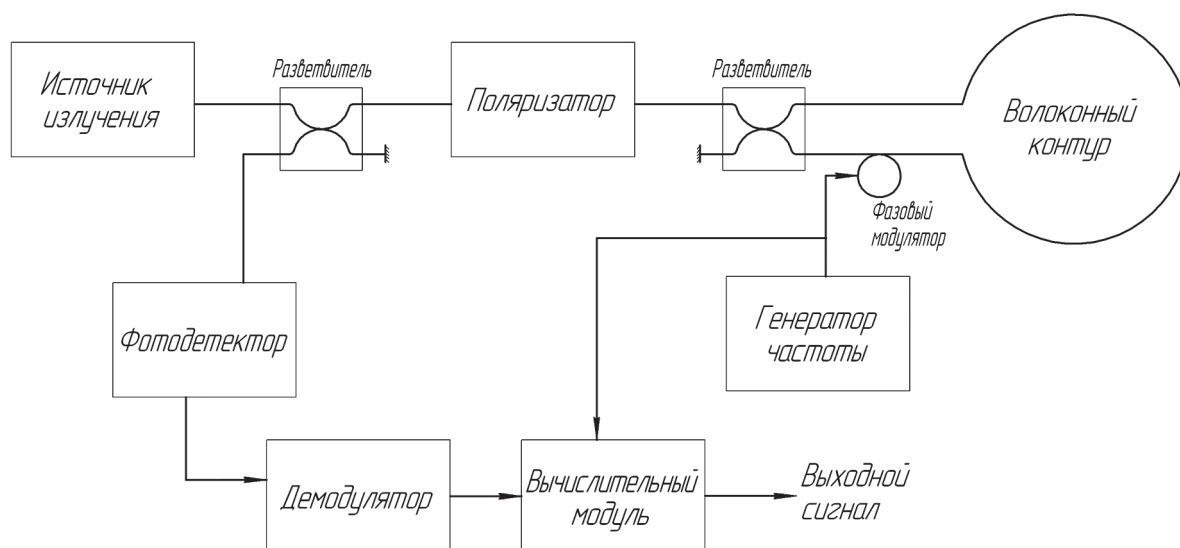


Рис. 2. Схема «минимальной конфигурации»
Fig. 2. A scheme of «minimum configuration»

Магнитооптический эффект Фарадея

Данный эффект заключается в том, что поляризованная электромагнитная волна при прохождении магнитного поля поворачивает плоскость поляризации.

Когда поляризованные встречные световые волны распространяются в магнитооптическом контуре и проходят сквозь магнитное поле, они приобретают разные набеги фаз. Это обусловлено невязимостью эффекта Фарадея. Вращение плоскости поляризации обусловлено разностью коэффициентов преломления ортогональной круговой поляризациями n_+ и n_- , на которые можно разложить линейно поляризованную световую волну. Формула, описывающая угол поворота плоскости поляризации

$$\rho = \pi d / \lambda \times (n_+ - n_-) = V H d, \quad (14)$$

где ρ – угол поворота плоскости поляризации;

d – толщина (диаметр) магнитооптического материала;

n_+ и n_- – коэффициент преломления;

V – постоянная Верде;

H – напряженность внешнего магнитного поля.

Влияние нелинейного оптического эффекта Керра

Нелинейный электрооптический эффект носит название эффекта Керра. Эффект

Керра состоит в изменении коэффициента преломления среды под воздействием на нее электромагнитного поля.

При исследованиях ВОГ было замечено, что эффект Керра вносит значительный вклад в паразитный дрейф гироскопа. Поскольку коэффициенты преломления волокна для встречных световых волн оказываются разными, разбалансировка мощностей встречных световых волн в волоконно-оптической катушке в результате дает разность набегов фаз и соответствующий сдвиг нуля. Применение широкополосного источника излучения уравнивает нелинейности встречных волн и уменьшает паразитный сдвиг фаз.

Влияние обратного рассеяния

Обратное рэлеевское рассеяние является одним из основных механизмов потерь в волокне, а также является источником шума в ВОГ, ограничивающим его чувствительность. Встречные волны, проходя волоконно-оптический контур, рассеиваются на микронеоднородностях волокна, в результате чего возникают рассеянные волны, которые распространяются в противоположных по отношению к основным волнам направлениях и интерферируют со встречными волнами. Фаза рассеянной волны есть случайная величина. Интерференция основных встреч-

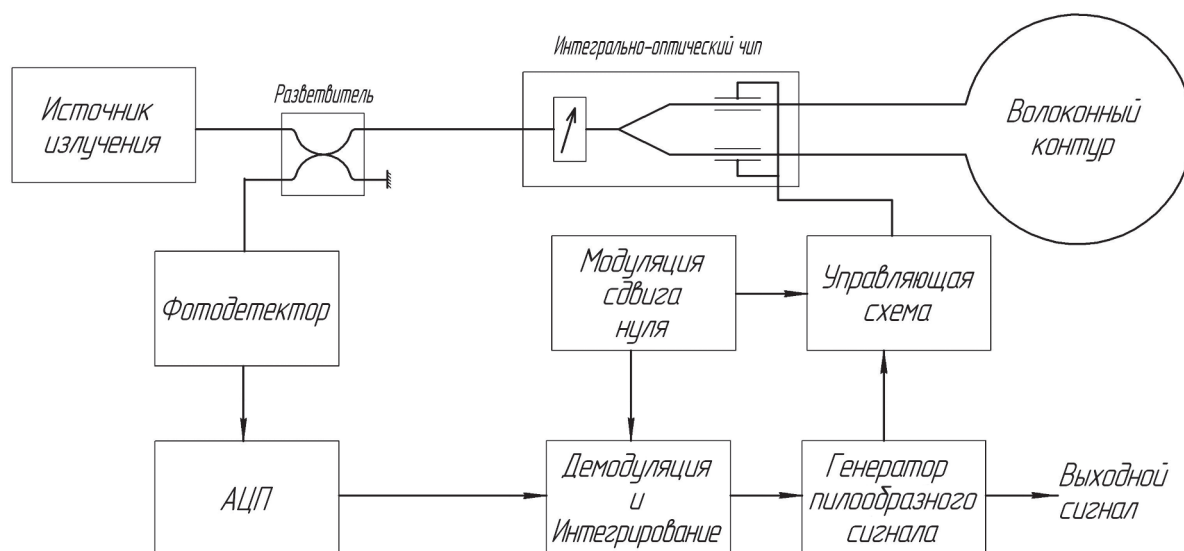


Рис. 3. Схема с обратной связью

Fig. 3. A feedback scheme

ных волн с рассеянными волнами приводит к изменению разности фаз встречных волн, в результате которой возникают флуктуации сдвига фаз полезного сигнала.

Наиболее эффективный способ борьбы с влиянием обратного рассеяния – применение источников излучения с низкой когерентностью и широкополосным излучением. В этом случае рассеянные волны не интерферируют с основными волнами и, следовательно, вносят существенно меньшую погрешность.

Электронный сдвиг нуля

Сдвиг нуля вызван смещением операционных усилителей, динамической ошибкой детектирования и взаимовлиянием аналоговых цепей. Частично зависит от напряжения.

Рассмотрим оптические схемы волоконно-оптических гироскопов. Интерференционные волоконно-оптические гироскопы можно разделить на три категории, за критерий оценки взяв точностной параметр. К первому классу точности относятся ВОГ, обеспечивающие нестабильность сдвига нуля в диапазоне 1–10 °/час.

Такие гироскопы построены по «минимальной конфигурации» или «open-loop» (рис. 2). Данная схема отличается высокой надежностью, низкой стоимостью, длитель-

ным сроком эксплуатации, простой волоконной технологией, малым масштабным коэффициентом. Недостатком данной схемы является большая зависимость от изменения температуры. Основные области применения ВОГ такого класса: авиационная навигация, системы курсоуказания устройств с высокой маневренностью, таких как тактические ракеты. Минимальная конфигурация содержит следующие элементы: волоконно-оптическую катушку, намотанную оптическим волокном, сохраняющую заданную поляризацию, разветвители, поляризатор, полупроводниковый излучатель, модулятор, фотодетектор.

Основная особенность оптической схемы проявляется в фазовой подставке, которая реализуется с помощью волокна, намотанного на пьезоэлектрическое кольцо. Световые волны, перемещаясь в двух направлениях в волоконно-оптической катушке, после ее прохождения интерферируют на фотодетекторе, сигнал с фотодетектора демодулируется, таким образом, полученное напряжение пропорционально скорости вращения.

Ко второму классу точности относятся ВОГ, обеспечивающие нестабильность сдвига нуля в диапазоне 0,01–1 °/час. Такие гироскопы имеют активную обратную связь или «closed-loop». Схема представлена на

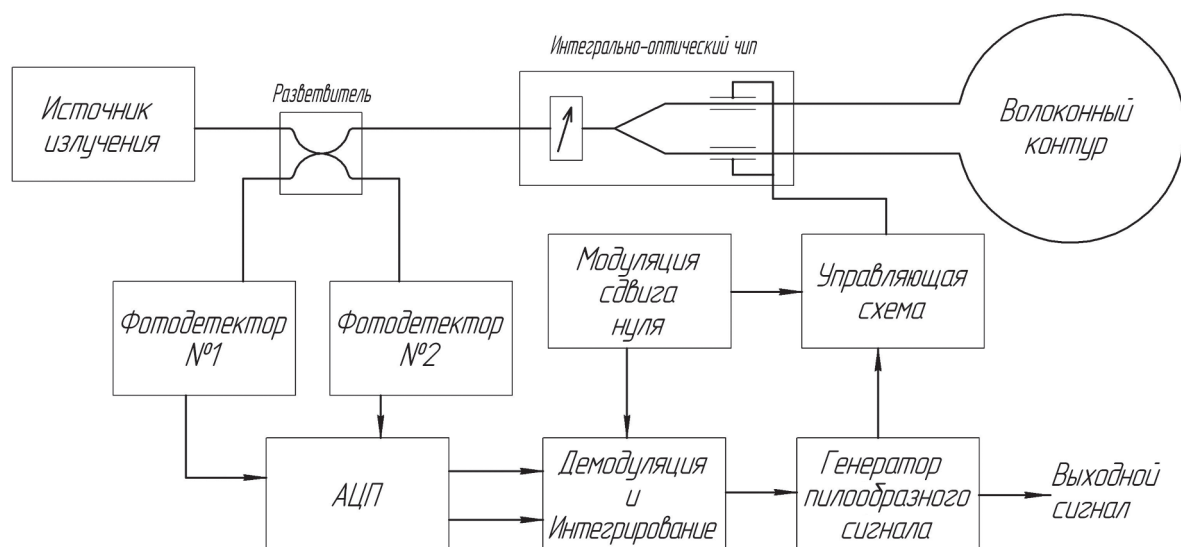


Рис. 4. Схема с обратной связью и дополнительным фотодетектором
Fig. 4. A feedback scheme with an additional photodetector

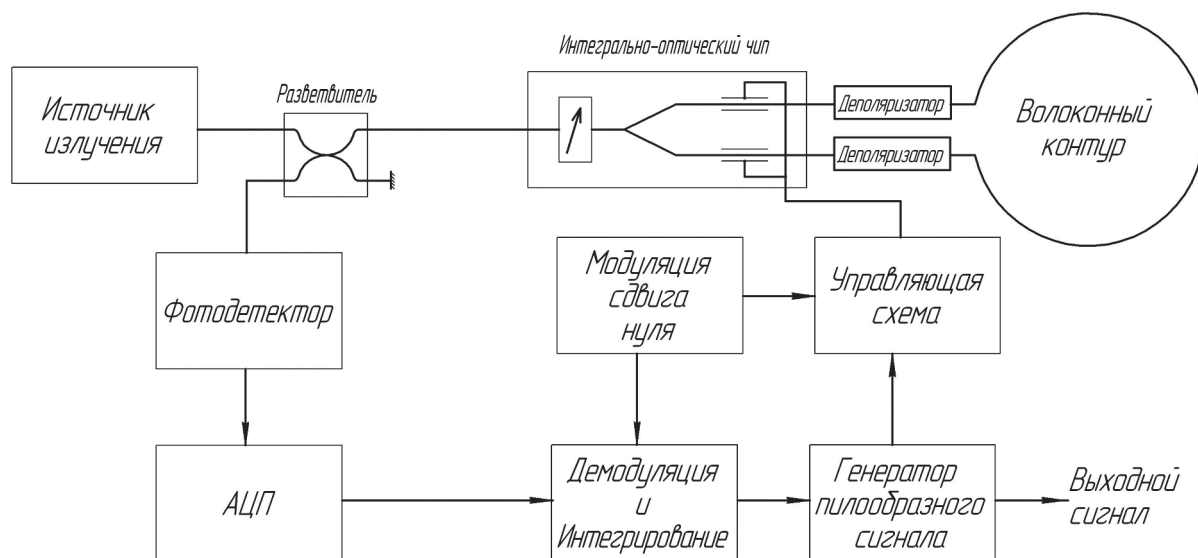


Рис. 5. Схема с деполаризаторами
Fig. 5. A scheme with depolarizers

рис. 3. Такая схема содержит интегрально-оптический чип, сформированный в подложке ниобата лития. Этот чип выполняет роль поляризатора, модулятора и разветвителя. Широкополосный интегрально-оптический фазовый модулятор используется, чтобы внести фазовую подставку и, таким образом, реализовать обратную связь. Выходное напряжение с фотодетектора преобразовывается в цифровой сигнал через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и затем в цифровой форме демодулируется. Выходные данные демодулятора служат сигналом рассогласо-

вания, который эффективно интегрируется и используется для генерации пилообразного сигнала изменения фазы, который поступает в управляющую схему.

К третьему классу точности относятся ВОГ, обеспечивающие нестабильность сдвига нуля в диапазоне $0,01-0,0001^\circ/\text{час}$. В таких гироскопах помимо активной обратной связи «closed-loop» был применен метод компенсации шума источника излучения.

Увеличение мощности излучения не обеспечит увеличение полезного сигнала для достижения низкого уровня дрейфа гироскопа.

Интерференция между независимыми спектральными компонентами широкополосного источника излучения вызывает шум, который становится преобладающим при высоких уровнях мощности излучения. Одним из методов компенсации шума источника излучения было применение в оптической схеме дополнительного фотодетектора, регистрирующего шум самого источника излучения, а затем вычитание его электронного эквивалента из выходного сигнала основного фотодетектора.

Деполаризованный ВОГ

Оптическая схема деполаризованного ВОГ похожа на оптическую схему с обратной связью. Основными отличиями являются волоконная катушка и наличие двух деполаризаторов. На рис. 5 представлена оптическая схема волоконно-оптического гироскопа на деполаризованном излучении. Поляризованный ВОГ и деполаризованный ВОГ имеют много общего, но деполаризованный ВОГ имеет ряд отличий. Рассмотрим их более подробно. После прохождения интегрально-оптического чипа свет попадает в деполаризаторы. На выходе деполаризаторов свет имеет хаотическую поляризацию и распространяется в катушке одномодового изотропного волокна. Деполаризаторы построены по типу деполаризатора Лию. Он состоит из двух плоскопараллельных пластин, соотношение между толщинами которых 2:1, оптические оси в которых нормальны входному излучению и развернуты друг относительно друга на 45°.

В катушках, намотанных волокном, поддерживающим поляризацию, возникает проблема сохранения поляризации от наведенного двулучепреломления.

Деполаризованный ВОГ имеет меньшую чувствительность к эффекту Фарадея и является наиболее интересным для достижения высокой точности при невысокой цене.

Заключение

Несмотря на преимущества ВОГ перед другими гироскопическими приборами

(простота монтажа, технологичность, простота расчетов параметров и их конструкции, зависящих от длины волокна и диаметра катушки, малые размеры и габариты), следует отметить и их недостатки. ВОГ, как и большинство приборов, имеет погрешности из-за нестабильности масштабного коэффициента, повышенной чувствительности к магнитным и электрическим полям, тепловым градиентам, повышенные требования к оптическому волокну для сохранения заданной поляризации, уменьшения двулучепреломления, радиационную стойкость и т. д.

Рассмотрев и проанализировав основные причины возникновения шумов в ВОГ, схемные решения повышения точности и технологичности, можно отметить, что одним из перспективных направлений уменьшения погрешностей ВОГ и повышения точности является использование деполаризованного излучения в волоконной катушке из анизотропного волокна.

Библиографический список

1. Шереметьев, А.Г. Волоконно-оптический гироскоп / А.Г. Шереметьев. – М.: Радио и связь, 1987.
2. Филатов, Ю.В. Волоконно-оптический гироскоп: учеб. пособие / Ю.В. Филатов. – СПб.: ГЭТУ «ЛЭТИ», 2003.
3. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / ред. Э. Удда. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.
4. Малыкин, Г.Б. Эффект Саньяка. Корректные и некорректные объяснения / Г.Б. Малыкин // Успехи физических наук, 2000. – Т. 170. – № 12. – С. 1325–1349.
5. Ландсберг, Г.С. Оптика: учеб. пособие для вузов / Ландсберг Г.С. – М.: ФИЗМАЛИ, 2003.
6. Sagnac M G C.R. Acad. Sci 157 708 (1913); engl. – Sagnac G., The Luminiferous Ether is Detected as a Wind Effect Relative to the Ether Using a Uniformly Rotating Interferometer, THE ABRAHAM ZELMANOV JOURNAL, p.74, Vol.1, 2008.
7. Sagnac M G C.R. Acad. Sci 157 1410 (1913); engl. – Sagnac G., Regarding the Proof for the Existence of a Luminiferous Ether Using a Rotating Interferometer Experiment, THE ABRAHAM ZELMANOV JOURNAL, p.77, Vol.1, 2008.
8. Shupe D.M. Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer // Applied optics 19, 1980, 654–655p.
9. Optical Gyros and their Applications, NATO RTO AGARDograph 339, May 1999.
10. B. Szafraniec. Theory of Polarization Evolution in Interferometric Fiber-Optical Depolarized Gyros: JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY. 1999, Vol.17. № 4. p.579–590.

PRINCIPLES OF MEASURING DEVICES DESIGN BASED
ON FIBER-OPTIC GYROSCOPES

Koptenkov M.I., pg. MSFU, a leading design engineer branch, filial of «TsENKI» - «NII PM named after Academician V.I. Kuznetsov»

mkoptenkov@gmail.com

Moscow State Forest University (MSFU), 1st Institutskaya st., 1, 141005, Mytischy, Moscow reg., Russia
«Center for Operation of Space Ground-Based Infrastructure»—«Scientific and Research Institute of Applied Mechanics named after Academician V.I. Kuznetsov», Aviamotornaya st., house 55, Moscow, 111123, Russia

The basic information on the principles of fiber-optic gyroscope (FOG) is given. The analysis of the potential accuracy of the FOG has been carried out. The sources of noise in the useful signal in a fiber optic gyroscope have been calculated. Spurious signal arises from the difference in temperature of the environment and sensitive coil, uniformity of its temperature – temperature gradients. When stretching the area of optical fiber in the circuit counter light waves acquire different phase shifts. This phenomenon is called an effect (Shupe effect). Polarized electromagnetic wave passing through the magneto-optical circuit or magnetic field rotates the plane of its polarization. This phenomenon is due to the nonreciprocal Faraday effect. Non-linear electro-optic effect is named the Kerr effect. The Kerr effect is a change in the refractive index of the environment under the influence of electromagnetic fields on it. The fundamental physical and optical schemes of FOG and their main characteristics are shown. The first precision class includes FOG providing instability of zero offset in the range of 1-10 ° / hour. These gyroscopes are built on the «minimum configuration» or «open-loop». The second precision class includes FOG providing instability of zero offset in the range of 0,01-1 ° / hour. These gyros are active feedback or «closed-loop». The third precision class includes FOG providing instability of zero offset in the range of 0,01-0,0001 ° / hour. In these gyros active feedback «closed-loop» was used together with a method to compensate for the noise of the polarizing source. The optical-physical scheme of fiber-optic gyroscope with a depolarized radiation has been considered. Depolarized FOG has a free polarization, is most interesting for high accuracy achievement, and is not a high-price device.

Keywords: Fiber-optic gyroscope, depolarized radiation, optical-physical scheme, Leo depolarizer, integrated-optical design, Kerr optical effect, Faraday effect, Shupe effect, Sagnac effect, the minimum circuit, closed loop.

References

1. Sheremet'ev A.G. *Volokonno-opticheskiy giroskop* [Fiber-optic gyroscope]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1987.
2. Filatov Yu.V. *Volokonno-opticheskiy giroskop* [Fiber-optic gyroscope]. St. Petersburg: GETU «LETI» Publ., 2003.
3. *Volokonno-opticheskie datchiki. Vvodnyy kurs dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Fiber Optic Sensors. Introductory course for engineers and scientists] red. E. Udda. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2008. 520 p.
4. Malykin G.B. *Effekt San'yaka. Korrektne i nekorrektne ob'yasneniya* [The Sagnac effect. Correct and incorrect explanations.] *Uspekhi fizicheskikh nauk* [The successes of the physical sciences], 2000. T. 170, № 12. p. 1325–1349.
5. Landsberg G.S. *Optika* [Optics] Tutorial: For universities. 6 th ed. stereotypes. Moscow, FIZMALI Publ., 2003.
6. Sagnac M G C.R. Acad. Sci 157 708 (1913); engl. Sagnac G., The Luminiferous Ether is Detected as a Wind Effect Relative to the Ether Using a Uniformly Rotating Interferometer, THE ABRAHAM ZELMANOV JOURNAL, p.74, Vol. 1, 2008.
7. Sagnac M G C.R. Acad. Sci 157 1410 (1913); engl. Sagnac G., Regarding the Proof for the Existence of a Luminiferous Ether Using a Rotating Interferometer Experiment, THE ABRAHAM ZELMANOV JOURNAL, p. 77, Vol. 1, 2008.
8. Shupe D.M. Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer. *Applied optics* 19, 1980, pp.654-655.
9. Optical Gyros and their Applications, NATO RTO AGARDograph 339, May 1999
10. B. Szafraniec. Theory of Polarization Evolution in Interferometric Fider-Optical Depolarized Gyros: JOURNAL OF LITHTWAVE TECHNOLOGY. 1999, Vol.17. № 4. pp. 579-590.