

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СИГНАЛА В ОБЫЧНОМ ОПТОВОЛОКНЕ И ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Введение

Проектирование волоконно-оптического гироскопа требует хорошего понимания теоретических принципов, а также знания компонентов и технологий, используемых для производства гироскопов. Эта работа обобщает теоретические требования и возможности технологии проектирования гироскопа.

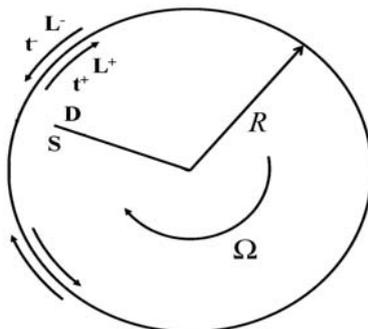


Рис. 1. Изменение времени прохода из-за вращения

В задачах, требующих точности измерения угловой скорости от 0,001 до 1 град/ч, волоконно-оптические гироскопы вытеснили кольцевые лазерные гироскопы (КЛГ). Эти приборы используются в инерциальных навигационных системах для управления движением тактических ракет, наземных транспортных средств, стабилизации и навигации летательных аппаратов, стратегических ракет и т.д. [1]. По сравнению с микроэлектромеханическими (МЭМС) гироскопами они являются более точными, более легкими и компактными, чем КЛГ, имеют более длительный срок службы. Опволоконный гироскоп представляет собой волоконно-оптический интерферометр. Принцип работы этого гироскопа основан на эффекте Саньяка [2]. Эффект Саньяка – фазовый сдвиг встречных электромагнитных волн, возникает во вращающемся кольцевом интерферометре (рис. 1). Источник света S представляет собой светоделитель на две волны, распространяющиеся в противоположных направлениях по траектории радиуса R . Источник света и детектор D вращаются с угловой скоростью Ω так, что световой луч проходит в направлении вращения большее расстояние L^+ за большее время t^+ , в то время как встречный световой луч проходит более короткое расстояние для L^- короткое время t^- . На рис. 2 показан фазовый сдвиг эффекта Саньяка при изменении длины волн.

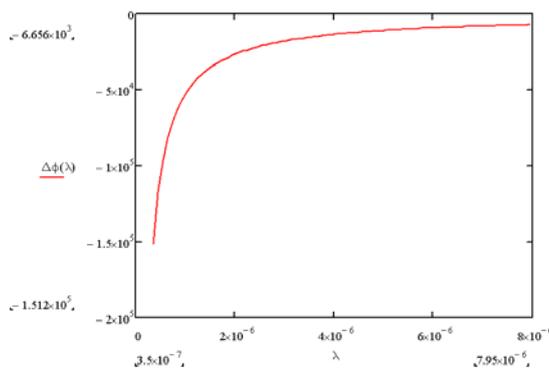


Рис. 2. Фазовый сдвиг эффекта Саньяка

Эта разность фаз пропорциональна охватываемой площади и угловой скорости. Для очень малых скоростей вращения и относительно небольшой площади контура эффект Саньяка уменьшается, в результате чего лучи сохраняют эффект синхронизации, следовательно, интерферометр не показывает фазового сдвига. Ограничение фазового расщепления зависит от конструкции интерферометра. Метод, известный как дизеринг, подмешивание в первичный сигнал псевдослучайного шума специально подобранного спектра, может быть использован для уменьшения негативного эффекта квантования сигнала (дробового шума). После определенного порога интерферометр Саньяка чувствителен к различиям в фазах из-за вращения [3].

Чувствительность интерферометра Саньяка

Рассмотрим интерферометр Саньяка без потерь, с идеальным 3-dB (дБ) лучевым расщепителем. Амплитуда освещенности на детекторе равна сумме амплитуд лучей, прошедших по и против часовой стрелки, со сдвигом фаз ϕ из-за эффекта Саньяка:

$$E_D = E^+ e^{j0} + E^- e^{-j\phi}$$

Предположим, что амплитуды одинаковы:

$$E^+ = E^- = E,$$

тогда

$$E_D = E(\cos 0 + j \sin 0 + \cos \phi - j \sin \phi) = E(1 + \cos \phi - j \sin \phi),$$

Уровень сигнала на детекторе

$$I_D = |E_D|^2 = 2|E|^2 (1 + \cos \phi) = 2I(1 + \cos \phi),$$

где $I = |E|^2$

Чувствительность

$$\left| \frac{dI}{d\phi} \right| = 2I \sin \phi$$

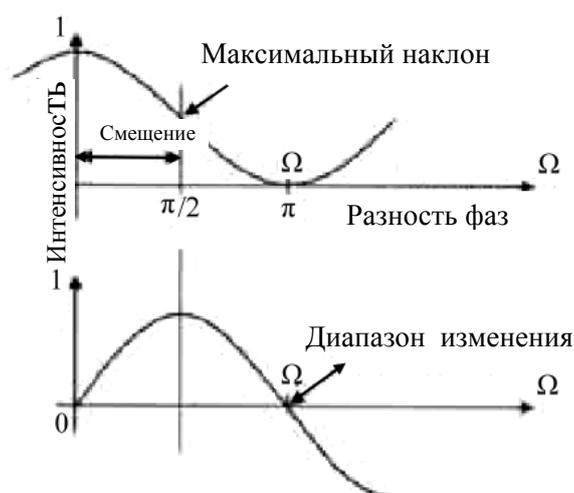


Рис. 3. Чувствительность интерферометра Саньяка

Как видно из рис. 3, минимальная чувствительность наступает при отсутствии вращения, когда фазовый сдвиг равен нулю, а максимальное значение наступает, когда сдвиг фазы равен π . В этих условиях сигнал имеет минимальное значение. Если интерферометр находится в неподвижном состоянии в инерциальном пространстве, то наблюдается максимальный уровень сигнала на детекторе. По мере нарастания скорости вращения интерферометра уровень сигнала снижается, достигая нуля, тогда разность фаз из-за эффекта Саньяка достигает π . Максимальная угловая скорость для разности фаз равной π

$$\Omega = \frac{\phi \lambda c}{8\pi AN} = \frac{\pi \lambda c}{8\pi AN} = \frac{\lambda c}{8AN} . \quad (1)$$

Для повышения чувствительности гироскопа необходимо сместить рабочую точку интерферометра в зону максимального наклона в точке $\Phi = \pi/2$. В этом случае достигается максимальная чувствительность гироскопа при низких угловых скоростях. Максимальный диапазон угловой скорости ограничивается диапазоном фазового сдвига $a \pm \pi/2$:

$$\Omega_{\max} = \pm \frac{\lambda c}{16AN} . \quad (2)$$

Например, если диаметр катушки 100 мм, количество витков $N = 1000$ ($L \approx 314$ м) и длина волны источника света $l = 1330$ нм, то:

$$\Omega_{\max} \approx \pm 3.7 \text{ rad} / \text{s} \approx \pm 212 \text{ }^\circ / \text{s} .$$

Характеристика гироскопа в рабочем диапазоне не является линейной, то есть значения сигнала не являются линейными и зависят от сдвига фаз, как показано на рис. 3. Для решения проблемы чувствительности гироскопа используют фазовую модуляцию, обеспечивающую сдвиг рабочей точки в зону максимальной чувствительности.

Теория

Выходной сигнал обычного волоконно-оптического гироскопа выражается как

$$P_1(t) = K \{1 + \nu \cos[\phi_s + \phi_e \cos(\omega_m t)]\}, \quad (3)$$

где ν – интерференционный коэффициент, который является параметром контраста полос; K – параметр, учитывающий потери интерферометра Саньяка; ω_m – частота модуляции ($\omega_m = 2\pi f_m$); ϕ_e – эффективная глубина фазовой модуляции, которая выражается в виде

$$\phi_e = 2\phi_m \sin(\pi f_m \tau_s), \quad (4)$$

ϕ_s – сдвиг фаз эффекта Саньяка, вызванный вращательным движением:

$$\phi_s = \frac{4\pi RL\Omega}{\lambda_0 c}. \quad (5)$$

Здесь τ_s – время распространения волны через петлю Саньяка выражается в виде $\tau_s = \frac{nL}{c}$;

L – длина петли; ϕ_m – глубина фазовой модуляции; Ω – скорость вращения; R – радиус петли; c – скорость распространения света в свободном пространстве.

Общий сигнал на фотодетекторе представляет собой сумму числа указанных выше помех и выражается в виде

$$P_{\text{total}}(t) = P_1(t) + K. \quad (6)$$

При $\omega_m \tau = 2n\pi$, выходной сигнал на фотодетекторе необходимо настроить регулировкой частоты модуляции, чтобы соответствовать времени прохождения,

$$P_{total}(t) = \frac{K \{1 + v \cos[\phi_s + \cos(\omega_m t)]\}}{AK' \{1 + v \cos[\phi_s + \phi_e \cos(\omega_m t)]\}}, \quad (7)$$

где K – коэффициент фотодетектора.

Так как общий сигнал представляет собой серию коротких импульсов, пиковое значение может быть определено с помощью следующего уравнения:

$$P'_{total}(t) = 0. \quad (8)$$

Тогда

$$Kv \sin[\phi_s + \phi_e \cos(\omega_m t) = 0], \quad (9)$$

и

$$[\phi_s + \phi_e \cos(\omega_m t)] = 2n\pi, \quad n=0,1,2,3... \quad (10)$$

Приведенное уравнение показывает, что необходимо найти положение пика выходного импульса, который действует для обоих случаев – вращения и покоя (следует отметить, что только четные значения p соответствуют положению пика). Из этого уравнения и условия можем видеть, что выходной импульс сдвигается, если происходит вращение [4].

Моделирование

Вначале проведем эксперимент с волоконно-оптическим гироскопом с обычным волокном и зафиксируем результаты, а затем сравним результаты с использованием фотонно-кристаллического волокна. Принцип работы гироскопа с обычным волокном и фотонно-кристаллическим волокном один и тот же, но выходные сигналы будут отличаться, поскольку волокна имеют различные характеристики. Волокно является фактически одномодовым при передаче излучения (1330 нм). Мы рассчитали необходимую частоту контура Саньяка $f_0 \approx 36$ кГц. Поэтому модулируем гироскоп при $f=36$ кГц. Глубина модуляции выбрана $\pi/4$, что близко к оптимальному значению для максимальной чувствительности. Измеряемый выходной сигнал f пропорционален скорости вращения до максимального значения 12 °/с. Коэффициент пропорциональности был использован для калибровки уровня шума гироскопа в единицах скорости вращения волоконно-оптического гироскопа, основанного на эффекте Саньяка [5]. Во вращающейся петле оптоволокна (оптический путь) из-за эффекта Саньяка возникает оптическая разность фаз $\Delta\phi$ между двумя встречно распространяющимися волнами (ИК 1330 нм) [6]. На рис. 4 представлена схема волоконно-оптического гироскопа с фазовой модуляцией по принципу прямой связи. Они широко используются в коммерческих приложениях, где их динамические ограничения диапазона и линейности не критичны.

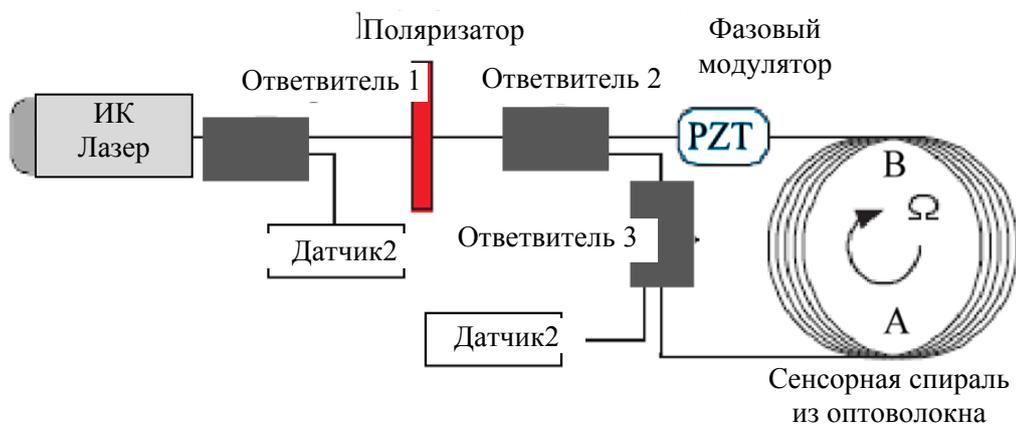


Рис. 4. Схема оптоволоконного гироскопа

Для четкого и точного определения угловой скорости на основе измеренного значения разности фаз встречных волн необходимо исключить возможные аддитивные и мультипликативные эффекты других физических воздействий. Основной задачей при измерении разности фаз с высокой точностью является дрейф нуля, проявляющийся в выходном сигнале физически стационарного гироскопа, не связанном с вращением контура. В оптоволокне практически невозможно получить устойчивые колебания оптической фазы. Поэтому в волоконно-оптических гироскопах может возникать аддитивный фазовый шум. Одной из причин появления этих сигналов является рассеяние и отражение в волоконном тракте. Во время прохождения сенсорной спирали вращения Ω происходят кажущиеся изменения расстояния между точками А и В для встречных лучей. Этот свет попадает через оптический изолятор (поляризатор) и аттенюатор мощности – 3-dB (дБ) в волоконный расщепитель. Для волны, распространяющейся из точки А в точку В, то есть, в направлении, совпадающем с направлением вращения контура, расстояние увеличивается, за момент времени dt точка В сместится на угол $d\varphi = \Omega \cdot dt$. Это удлинение пути светового луча пропорционально dt . Так как в каждый момент времени луч направлен по касательной к контуру, то тангенциальная линейная скорость имеет проекцию ($\bar{u} = \bar{u} \cdot \cos a = \Omega r \cdot \cos a$). Таким образом, длина пути, проходимого лучом, равна $Dl + \bar{u} \cdot dt$. Аналогично для встречного светового луча произойдет уменьшение проходимого отрезка пути $Dl - \bar{u} \cdot dt$. Учитывая, что скорость света инвариантна, кажущиеся удлинение и сокращение путей для встречных пучков можно считать эквивалентным расширением и сжатием интервалов времени, т.е. основные перечисленные принципы работы волоконно-оптического гироскопа не позволяют понять накладываемые ограничения на точность выполняемых им измерений. До сих пор в волоконно-оптических гироскопах применяется кварцевое оптоволокно, используемое для оптической связи. В этом оптоволокне, являющимся аморфной, почти однородной и изотропной средой, могут распространяться поперечные оптические волны. Свет, отраженный от границы раздела «ядро-оболочка» в результате полного внутреннего отражения распространяется вдоль сердечника, как своей собственной волны оптического волновода. Эффекты двулучепреломления, Керра, Фарадея и т.д. неблагоприятно влияют на регистрацию сдвига фаз световых волн при вращении петли волоконно-оптических гироскопов, где электромагнитная волна распространяется вдоль волокна с фазовой скоростью, обратно пропорциональной показателю преломления. Даже слабая неоднородность может привести к кумулятивному эффекту и исказить результат измерения. Такие физические явления воздействуют на сигнал, так как оптическое излучение распространяется в материальной среде оптического волокна, которое изготовлено из кварца или кварцевого стекла. Эти эффекты связаны с процессом распространения оптического излучения в материале оптической среды, что приводит к сдвигу фаз встречных волн, не связанному с вращением замкнутого контура. Негативные эффекты также связаны с процессами рассеяния и отражения света на оптическом пути, эффектом поляризационной невязности, связанном с несимметричным расположением анизотропных элементов по отношению к центру волокна, или анизотропными свойствами волокна. Тем не менее, основной проблемой волоконно-оптического гироскопа является то, что точность измерения и снижение сигнала при малых угловых скоростях в большей степени зависят от оптических эффектов, не связанных с угловым смещением оптической петли (волоконно-оптического гироскопа). Так как оптическое излучение распространяется в материальной среде оптического волокна, изготовленного из кварца или кварцевого стекла, такие физические явления, как эффект двулучепреломления, эффект Керра, эффект Фарадея и т.д., отрицательно влияют на регистрацию сдвига фаз световых волн при вращении петли волоконно-оптических гироскопов. Эти эффекты связаны с процессом распространения оптического излучения в материале оптической среды, что приводит к сдвигу фаз встречных волн, который не связан с вращением замкнутого контура. Отрицательные последствия также связаны с процессами рассеяния и отражения света в оптическом тракте, эффектом поляризационной невязности, связанной с несимметричным расположением анизотропных элементов по отношению к

центру волокна, или анизотропными свойствами волокна. Эта проблема решается использованием частотной и фазовой модуляции оптического излучения для сдвига нулевой точки на участок максимальной чувствительности интерференционного сигнала. Тем не менее, не удастся избавиться от фазовых сдвигов, обусловленных вращением и связанных с локально взаимными, нестационарными изменениями в характеристиках волокна, когда они возбуждаются асимметрично по отношению к оси волокна. Основные эффекты – эффект Фарадея, Френеля – Физо и нелинейный оптический эффект Керра. Использование некогерентного излучения СЛД (супер люминесцентный диод с длиной когерентности 10 – 20 мкм) практически устраняет проблему влияния отраженного и рассеянного излучения на фазу выходного сигнала ВКИ. Тем не менее, использование СЛД устраняет лишь часть проблем, приводящих к дополнительным сигналам.

Выводы

В ближней инфракрасной области (1330 нм) чистый кремний имеет малые потери на поглощение и возрастающие полосы поглощения в дальней инфракрасной области и ультрафиолете. Примеси, в частности воды в форме гидроксильных ионов, являются доминирующими причинами поглощения в коммерческих оптоволоконных кабелях. Последние достижения по повышению чистоты волокна снизили потери на затухание. Лучшие образцы могут иметь затухание порядка 0,1 дБ/км. На рис. 5 показано типичное спектральное поглощение в кремнии.

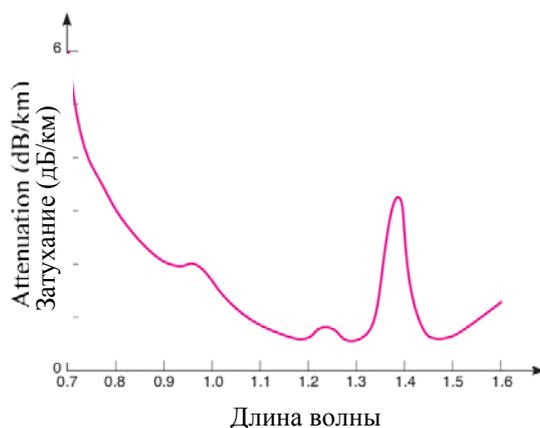


Рис. 5. Типичное спектральное поглощение в кремнии

Рассеяние энергии происходит при прохождении излучения и приводит к потере энергии в оптическом волокне. Есть неизбежные потери рассеяния Рэлея из-за мелкомасштабных флуктуаций плотности волокна при его застывании. Приведена фотография поперечного сечения волокна SMF28(TM), выполненная с помощью сканирующего электронного микроскопа. Это дает затухание, пропорциональное $1/\lambda^4$. Также вызывают рассеяние аномалии в сечении формы сердечника и геометрии направления оси волокна. Любой процесс, который накладывает пространственные аномалии, такие как микронапряжения, вызывает рост рассеяния и, следовательно, ослабление сигнала. Используемое нами фотонно-кристаллическое волокно с воздушным сердечником (1550-02-НС) имеет следующие характеристики согласно спецификации производителя: минимальные потери ~ 19 дБ/км, при длине 235 м ~ 4,5 дБ, всего потери сигнала составляют 10 дБ. Остальные потери ~ 2,7 дБ могут быть отнесены к двум стыковым соединениям. Измеренное двулучепреломление составляло приблизительно 6×10^{-5} . Величина группового индекса основной моды пятиметрового стандартного оптоволоконного (1,44) и для 235-метрового фотонно-кристаллического волокна (1,04), рассчитана для идеального с воздушным сердечником волокна с тем же радиусом сердечника [7]. Расщепитель подобран таким образом, что регистрируемая выходная мощность одинакова для всех измерений (-30 дБм).

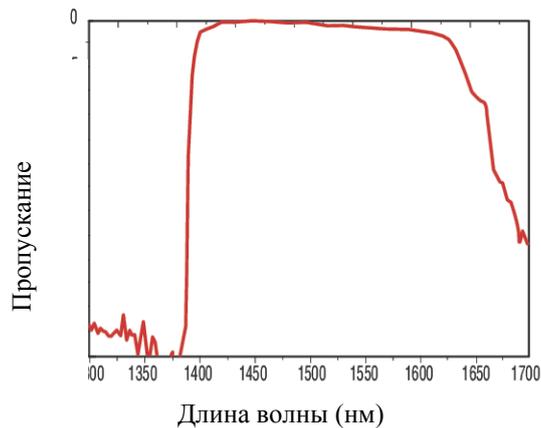


Рис. 6. Типичный спектр пропускания волокна с воздушным сердечником

Эта величина показывает важный результат – сопоставимость фазового шума при использовании в ВОГ волокна с воздушным сердечником и обычного волокна при одинаковой длине, детекторах и электронике. Краткосрочный шум, наблюдаемый в волокне SMF28(TM), объясняется дробовым шумом, шумом рэлеевского обратного рассеяния и электромагнитными помехами. Вклад в фазовый шум от дробового эффекта определен измерением падения мощности на детекторе на 0,01 мВт [8] при принятой квантовой эффективности детектора 0,8 составляет 0,4 мрад. Для оптического гироскопа на волокне с воздушным сердечником, при том же детекторе и уровне сигнала, вклад дробового шума также 0,4 мрад. Шум обратного рассеяния составляет ~ 0,4 мрад (в предположении, что коэффициент обратного рассеяния Рэля для волокна с воздушным сердечником составляет $1,12 \times 10^{-7} \text{ м}^{-1}$, или в 3,5 раза сильнее, чем у волокна SMF28(TM)). Поскольку в обоих испытаниях гироскопы используют одну и ту же электронику и уровни сигнала, вклад электронного шума должен быть таким же, как и для волокна SMF28(TM), а именно 2 мрад. Также для волокна с воздушным сердечником в оптическом гироскопе обратные отражения на двух стыковых соединениях могут являться источником шума. Недавние теоретические исследования показывают, что отражение мощности стыковых соединений волокна с воздушным сердечником составляет $\sim 2 \times 10^{-6}$. Скорректировав примерный расчет фазового шума, представленный в работе [9], на эту величину, мы полагаем, что фазовый шум из-за этих двух некогерентных отражений будет оцениваться в 1 мрад. Близость измеренного и расчетного уровня шумов повышает доверие к расчетным значениям вкладов источников шума, принятому значению коэффициента рассеяния Рэля в волокне с воздушным сердечником и к выводу, что в обоих гироскопах большая часть шума имеет общее электронное происхождение.

Список литературы: 1. Titterton, D.H., Weston, J.L. *Strapdown inertial navigation technology* // IEE RADAR, SONAR, NAVIGATION AND AVIONICS SERIES 5, Peter Peregrinus Ltd, 1997. 2. LAWRENCE, A. *Modern Inertial Technology*, Second Edition, Springer-Verlag New York, 1998. 3. R. Anderson, H. R. Bilger, G. E. Stedman, 1994. “Sagnac” effect: A century of Earth rotated interferometers // *Am. J. Phys.*, Vol. 62, No. 11, November 1994. 4. Shi, C. X., Yuhara T., Lizuka H., and Kajioka H., New Interferometric Fiber Optic Gyroscope with Amplified Optical Feedback // *Applied Optics*, vol.35, no. 3, 1996. 5. Andronova, I. A., Malykin, G. B. (2002). Physical problems of fiber gyroscopy based on the Sagnac effect. *Physics-Uspekhi*, 45 (8), 793–817. doi: 10.1070/pu2002v045n08abeh001073. 6. Shinde, Y. S., Kaur Gahir, H. (2008). Dynamic Pressure Sensing Study Using Photonic Crystal Fiber: Application to Tsunami Sensing // *IEEE Photonics Technology Letters*, 20 (4), 279–281. doi: 10.1109/lpt.2007.913741. 7. Hyang Kyun Kim, Michel J.F. Dignonnet, Gordon S.Kino Air-Core Photonic Bandgap fiber optic gyroscope, 2006. 8. W. Burns. *Optical Fiber Rotation Sensing*. Boston, MA: Academic, 1994, ch. 1.Eq. 1.21. 9. H. Lefevre, *Fiber Optic Gyroscope*. Boston, MA: Artech House. 1993, pp.66-67.