

АЛЬ-СУДАНИ ХАЙДЕР АЛИ

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ГИРОСКОПОВ НА БАЗЕ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С ФОТОННОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНОЙ

Введение

До недавнего времени в инерциальных навигационных системах (ИНС) подвижных объектов применялись исключительно механические гироскопы (МГ), принцип работы которых основан на содержании оси тела вращения (ротора) в одном заданном положении инерциального пространства (СК) [1]. Однако стоимость механических гироскопов достаточно высока, поскольку для их работы требуются высокая точность изготовления формы ротора, обеспечение минимального трения подшипников и т.д. Но даже при выполнении этих требований МГ достаточно недолговечные и ненадежные приборы вследствие износа трущихся поверхностей, движущихся деталей в них. Поэтому со временем в механических гироскопах появляется значительная погрешность измерения углов, что, в конечном счете, влияет на надежность, а значит – на оборонные показатели объектов во время движения. Для этого нужны частые поверки приборов с механическими гироскопами, что требует дополнительных финансовых затрат.

Эти недостатки в значительной степени устраняются за счет применения оптических гироскопов (ОП), которые имеют следующие преимущества по сравнению с МГ:

- отсутствие подвижных деталей (статическая структура);
- устойчивость к механическим ускорениям;
- мгновенный запуск (не нужно дополнительное время для раскрутки ротора);
- простота и надежность конструкции;
- значительно большая чувствительность;
- высокая линейность характеристик;
- низкая мощность потребления.

Эффект Саньяка в волоконных гироскопах

Эффект Саньяка получил свое название в честь французского физика Жоржа Марка Мари Саньяка, который открыл его в 1913 году. С 1970-х годов эффект Саньяка нашел основное применение в навигации в качестве фундаментального принципа проектирования волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) [2, 3]. Интерференция двух волн происходит из-за того, что волны накладываются, образуя одну волну с амплитудой, которая больше или меньше начальных волн. Для пучка света фотоны мешают друг другу, и по мере выявления волн, которые дают результат, появляется картина, иллюстрирующая различные свойства света. Результат меняется с частотой, фазой и амплитудой света. Интерферометр измеряет различия в интерференционной картине для определения некоторых свойств света. Сегодня ВОГ стали высокочувствительными детекторами, измеряющими вращательное движение в навигации [4, 5]. Саньяк обеспечил первую демонстрацию возможностей оптического эксперимента, способного указывать состояние вращения системы отсчета, делая измерения в рамках этой системы координат. На рис. 1 показана схема его интерферометра.

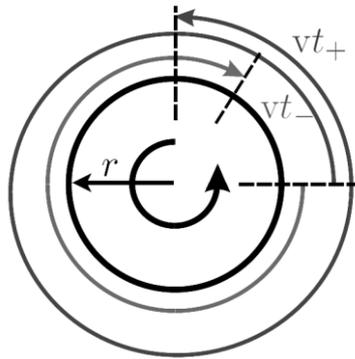


Рис. 1. Влияние вращения на встречные лучи

Физические принципы эффекта Саньяка подробно описаны в работе [6], и их можно разделить следующим образом. Эффект Саньяка может быть легко описан в классических терминах, если предположить, что скорость света равна s по отношению к статическому эфиру.

Эффект Саньяка [7] показывает, что два встречных световых луча, которые имеют различные временные интервалы для прохождения замкнутого пути на вращающемся диске, – это фазовый сдвиг встречных электромагнитных волн, который возникает во вращающемся кольцевом интерферометре (рис. 2). Источник света S выпускает две волны, которые распространяются в противоположных направлениях по траектории радиуса R .

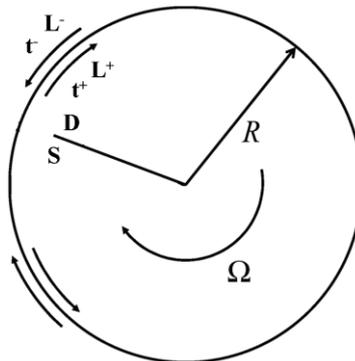


Рис. 2. Изменение времени прохода через вращения

Источник света и датчик D вращаются с угловой скоростью Ω , так что световой луч проходит в направлении вращения большее расстояние L^+ за большее время t^+ . Встречный световой луч проходит более короткое расстояние L^- за более короткое время t^- :

$$L^+ = 2\pi R + R\omega t^+, \quad (1)$$

$$L^- = 2\pi R - R\omega t^-, \quad (2)$$

Скорость света в среде

$$c_m = \frac{c}{n}, \quad (3)$$

где c_m – скорость света в среде; n – показатель преломления данной среды.

Свет дольше идет к исходной точке только потому, что приемник будет перемещаться вперед на некоторое расстояние.

Если $n \sim 1$, $c_m \sim c$, тогда:

$$t^+ = \frac{L^+}{c}, \quad (4)$$

$$t^- = \frac{L^-}{c}, \quad (5)$$

подстановка выражений (4) и (5) в выражения (1) и (2) дает:

$$L^+ = \frac{2R\pi}{1 - \frac{R\omega}{c}}, \quad (6)$$

$$L^- = \frac{2R\pi}{1 + \frac{R\omega}{c}}, \quad (7)$$

из выражений (6) и (7) следует:

$$\Delta L = L^+ - L^- = L^-, \quad (8)$$

$$= \frac{4R\pi \frac{R\omega}{c}}{1 - \frac{R^2\omega^2}{c^2}}, \quad (9)$$

$$\approx \frac{4R^2\pi\omega}{c}, \quad (10)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta L}{c} = \frac{4R^2\pi\omega}{c^2}, \quad (11)$$

если волны пройдут путь N раз:

$$\Delta L = \frac{4NR^2\pi\omega}{c} = \frac{4NA\omega}{c} = \frac{LD\omega}{c}, \quad (12)$$

$$\Delta t = \frac{4NR^2\pi\omega}{c^2} = \frac{4NA\omega}{c^2}, \quad (13)$$

где A – площадь контура; D – диаметр контура; L – общий путь, который пройден.

Для волны частоты f (длина волны $\lambda=c/f$); $T=1/f$ – время, необходимое для изменения фазы на 2π .

С учетом эффекта Саньяка изменение фазы Φ за час Δt составит:

$$\phi = 2\pi \frac{\Delta t}{T} = 2\pi f \Delta t, \quad (14)$$

после подстановки Δt в (14) и (12) изменение фазы составит:

$$\phi = \frac{8\pi AN\omega}{\lambda c}. \quad (15)$$

Это доказывает, что вращение является частным случаем. Полная разность фаз между двумя встречными лучами в петле. Эффект Саньяка для вращения рассматривается как частный случай. Как известно, в экспериментах с движущейся средой типа Физо проявляется относительное движение между движением инфракрасного луча и средой, стеклом или водой. Этот эксперимент зависит от показателя отражения среды, а коэффициент сопротивления равен нулю, когда показатель преломления равен 1. В исследовании мы будем использовать фотонно-кристаллические волокна (с воздушным сердечником). Они не содержат

такой среды как вода или стекло, но содержат воздух. Можем сделать вывод об обобщении эффекта Саньяка, что прохождение в волоконной петле или в волноводе протяженностью Δl со скоростью v добавляет разность фаз в общей разности фаз между двумя встречными пучками в петле. Вклад $\Delta\varphi$ не зависит от показателя преломления волновода, а путь длины движения может быть либо линейным или круговым.

Способ построения и работы волоконных оптических гироскопов с фотонно-кристаллическими волокнами

Фотонно-кристаллические волокна [8], также называемые микроструктурными или дырявыми волокнами, представляют собой оптические волноводы нового типа. В ФКВ излучение может передаваться как пустотелым, так и сплошным твердым сердечником, как показано на рис. 3, состоящими из массива цилиндрических воздушных каналов, проходящих вдоль оси волокна, и охватываемых микроструктурированной оболочкой. Такая микроструктура обычно изготавливается путем вытяжки из пучка капиллярных трубок и твердых кварцевых стержней. Наряду с обычными волноводными режимами обеспечиваются полным внутренним отражением. Фотонно-кристаллические волокна при определенных условиях могут поддерживать управляемые моды электромагнитного излучения через высокую отражательную способность их оболочки в пределах фотонных полосных зазоров или областей с низкой плотностью фотонных состояний, а также через антирезонансный механизм волновода [9].

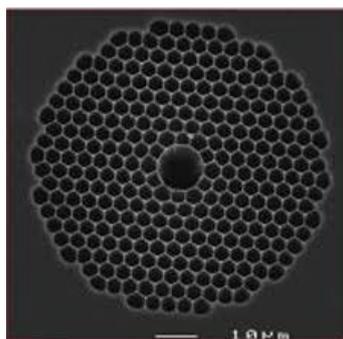


Рис. 3. Изображение поперечного разреза фотонно-кристаллического волокна с фотонной запрещенной зоной (фкв – фзз)

В волоконно-оптическом гироскопе оптическое волокно используется в качестве среды распространения света. ВОГ основаны на эффекте Саньяка. Эффект Саньяка создает разницу оптических фаз $\Delta\varphi$ между двумя противоположно направленными волнами в волоконной катушке, которая вращается (оптический путь). Они широко используются в промышленности, там, где приемлемы их возможности по динамическому диапазону и линейности.

Эффект Саньяка возникает во всем контуре, который вращается с угловой скоростью вращения Ω , расстояние между двумя точками А и В изменяется для противоположно движущихся пучков, как показано на рис. 4.

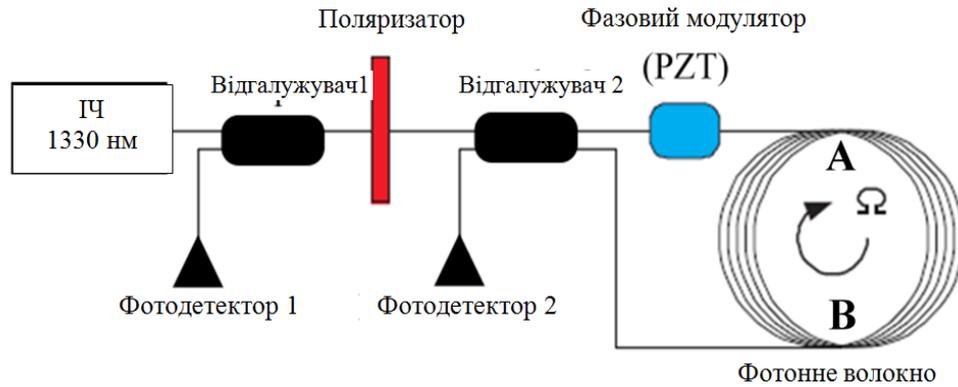


Рис. 4. Схема волоконно-оптического гироскопа

Реакция оптической мощности

$$P = \frac{I_0}{2} (1 + \cos \Delta\phi), \quad (16)$$

где $\Delta\phi$ – разность фаз [10].

Разность фаз максимальна при нуле. Чтобы получить высокую чувствительность, этот сигнал должен быть смещен по отношению к рабочей точке с ненулевым наклоном:

$$P = \frac{I_0}{2} [1 + \cos(\Delta\phi_s + \Delta\phi_b)], \quad (17)$$

где $\Delta\phi_s$ – фазовый сдвиг.

Фазовый сдвиг должен быть таким же стабильным, как и ожидаемая чувствительность, что значительно лучше, чем 1рад [10].

В волне, движущейся с точки А в точку В в направлении, совпадающем с прямым вращением контура, увеличивается расстояние, за время dt точка В смещается на угол $d\phi = \Omega dt$. Увеличивается время движения светового пучка, равное dt , потому что в каждый момент луч направлен вдоль касательной к контуру под одной проекцией с касательной линией скорости:

$$\vec{u} = \vec{u} \times \cos a = \vec{W} \times \vec{r} \times \cos a. \quad (18)$$

Проблема дрейфа фазового сдвига полностью решается с помощью обратного фазового модулятора, расположенного на одном конце катушки, который действует как линия задержки. Волны приобретают сдвиги фаз $\phi_m(t)$, проходя через модулятор в момент времени t . Встречные волны проходят через модулятор в разное время; пока СВ волна проходит через модулятор в момент времени t , ССВ волна проходит через модулятор во времени $t - \tau$, где τ – время прохождения цикла $\frac{nl}{c}$. Это приводит к модуляции смещения $\Delta\phi_m(t)$ разности фаз:

$$\Delta\phi_m(t) = \phi_m(t) - \phi_m(t - \tau), \quad (19)$$

Таким образом, сигнал помехи

$$P = \frac{I_0}{2} \{1 + \cos[(\Delta\phi_s(t) + \Delta\phi_m(t))]\}. \quad (20)$$

Инвариантность скорости света, которая кажется продолжением и сжатием путей для противоположно направленных лучей, можно считать эквивалентной расширению и сужению временных интервалов. Существуют различные механизмы фазовой модуляции. Одним из них является электрооптический модулятор. Пьезоэлектрический преобразователь (PZT) растягивает волокно при приложении внешнего напряжения, удлиняет оптический путь. Инжектированная фаза пропорциональна приложенному напряжению для обоих механизмов. Сигнал на частоты модуляции составляет

$$P(t)|_{\omega} = -I_0 J_1(\alpha) \cdot \sin(\Delta\phi_s) \cdot \cos[\omega_m t - \delta]. \quad (21)$$

Это обобщение показывает принцип проектирования нового волоконно-оптического линейного датчика движения, который имеет высокую чувствительность и высокую стабильность. Датчик состоит из 1 метра фотонно-кристаллического волокна (НС-1330 нм NKT Photonics), которые намотаны вокруг цилиндрической оправки диаметром 8 см. При работе оптического гироскопа волокно, используемое в катушке оптического датчика, является фактически одномодовым при длине волны 1330 нм.

Источник ИК-излучения подключается к различным волокнам, в идеале с малым обратным отражением и малыми потерями.

Сигнал ССW фотодиода состоит из основного сигнала от луча ССW и сигнала, вызванного обратным рассеянием луча СW и отпечатками. Один луч модулируется синусоидально на частоте (36 кГц) с помощью модулятора (ПЗКТМ), которой размещен на волокне, идет к катушке датчика, тогда как другой вход (СW) не модулируется. Общий сигнал на каждом фотодиоде включает модулированный компонент.

Амплитуда модуляции подобрана так, чтобы максимально подавить оптическую частоту, которая является несущей, чтобы сдвигать большую часть низкочастотного дрейфа на кратность сигнала модуляции.

Для начала мы оценили производительность обычного оптического гироскопа с датчиками из фотонно-кристаллического волокна и катушкой из обычного волокна.

Поэтому расчетный дрейф скорости этого волоконно-оптического гироскопа составляет 0,014 °/с, что соответствует минимальному сдвигу частоты вращения ~ 1,8 Гц с полосой детектирования 1 Гц. Необходимо учитывать масштабируемый коэффициент и точность расчетов.

После коррекции различий в масштабируемом коэффициенте и точности измеренный сдвиг между пиками в течение двухминутного интервала составлял 0,027 ° / с, что близко к значению, опубликованном в [11].

Хотя кольцевые резонаторы на базе ФКВ с воздушным каналом, использующим воздушное соединение с основной оптикой системы, показали очень низкий процент потерь, этот метод является непростым. Таким образом, длина пути, который пройден лучом, равна $D1 = R \cdot \cos(\theta + \omega t)$.

Рассуждая аналогично, для встречного луча будет уменьшаться участок пути $D2 = R \cdot \sin(\theta + \omega t)$ (рис. 5).

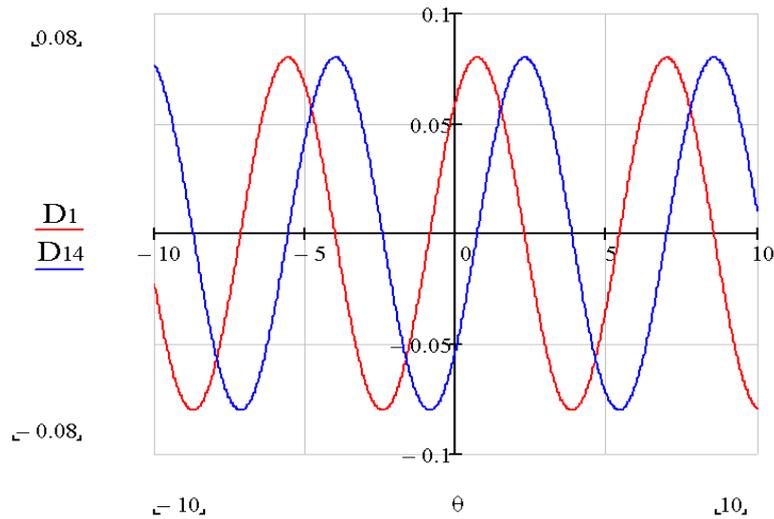


Рис. 5. Длина пути лучей (D_1, D_2)

При неподвижном гироскопе мы регистрируем выходной сигнал вращения для измерения шума. Шум эквивалентной полосы может быть выражен как

$$BW_e = \frac{5}{64 \cdot \tau}. \quad (22)$$

Здесь τ – изменение постоянной времени фотодиода (от 100 до 3 мс).

Тогда измеренный дрейф при $\tau = 3$ мс даст $BW_e = 26.04166$ Гц, и при $\tau = 100$ мс составит $BW_e = 0,78125$ Гц. Диапазон случайных отклонений:

$$R_w = \frac{\sigma}{BW_e^{1/2}}. \quad (23)$$

Для гироскопа с фотонно-кристаллическим волокном (с пустым каналом) $R_w = 0,055^\circ/\text{с}^{1/2}$.

Поэтому максимальный дрейф в 120 с составит $\sim 1^\circ/\text{с}$. Модуляция уменьшает дрейф в 120 с на $\sim 17,5$ дБ. В 3600 с максимальный дрейф составит $2,3^\circ/\text{с}$, и $\sigma = 0,5^\circ/\text{с}$. Измерение выходного сигнала подобного гироскопа показано на рис. 6. При $t = 0$ скорость вращения $\pm 2,3^\circ/\text{с}$.

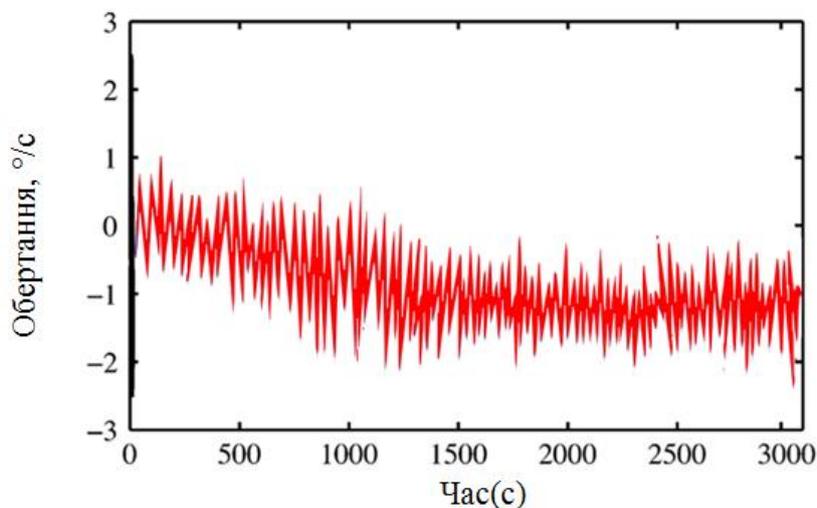


Рис. 6. Максимальный дрейф

Выводы

Гироскопы с фотонно-кристаллическими волокнами являются типом волоконной оптики, содержащей множество новых и улучшенных функций. Ожидается, что благодаря уникальной геометрической структуре использование волокна с воздушной сердцевиной в волоконном гироскопе значительно уменьшит фазовый дрейф и шум, связанные с эффектом Керра, эффектом Фарадея и тепловыми эффектами в чувствительном волокне. Причина в том, что в волокне с воздушным сердечником оптический режим в основном ограничивается воздушным сердечником, тогда как в обычном волокне сигнал полностью перемещается через кремний. Приведенные результаты позволяют ожидать, что использование фотонно-кристаллического волокна вместо обычного обеспечит большую долговременную стабильность, низкую стоимость, более простую конструкцию и меньший уровень шума, что приведет к созданию недорогих инерционных навигационных оптических гироскопов.

Список литературы:

1. Lefevre H. Fiber Optic Gyroscope / M.A. Boston // Artech House. 1993. P. 66–67.
2. Vali V. / R. Shorthill // Appl. Opt. 1977. V.16. P. 290 .
3. W. Leeb, G. Schiffner, and E. Scheiterer. Appl. Opt. 18, 1293 (1979).
4. H. Lefevre. The Fiber–Optic Gyroscope (Artech House, Boston, 1993).
5. Burns, W. K. Optical Fiber Rotation Sensing //Academic Press, Boston, 1994.
6. Post. E.J. Sagnac effect // Rev. Mod. Phys. 1967. Vol. 39. P. 475–493.
7. Sagnac G. / C. R. Acad. // Sci. Paris. 1931. V. 157. P.708.
8. Russell P.S. J. Photonic Crystal Fibres // Science. 2003. V.299. P 358–362.
9. Russell P.S.J. Lightwave Technol. 2006. 24. P.4729.
10. Yablonovitch E. Photonic Band Structure: The Face–Centered–Cubic Case Employing Nonspherical Atoms / T. J. Gmitter, K. M. Leung // Phys. 1991. Rev. Lett. 67. P. 2295–2298.
11. Folkenberg, J. R. Polarization maintaining large mode area photonic crystal fiber / M. D. Nielsen, N. A. Mortensen, C. Jakobsen, H. R. Simonsen // Optics Express, 2004. Vol. 12, №.5. P.956–960. doi: 10.1364/oe.12.000956.

Поступила в редколлегию 07.04.2021

Сведения об авторе:

Аль-Судани Хайдер Али – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, аспирант кафедры физических основ электронной техники (ФОЭТ), факультет электронной и биомедицинской инженерии, Украина; e-mail: hadr_2005@yahoo.com