

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП: ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Исследования по созданию волоконно-оптического гироскопа начались в середине 1970-х годов, открыв путь к полностью твердотельному датчику вращения. Его первоначальное использование было ограничено приложениями средней точности, но сегодня он достигает предельного теоретического уровня точности и превосходит своего традиционного конкурента – кольцевой лазерный гироскоп – по параметрам шума смещения нуля и временной стабильности.

Введение

Оба типа оптических гироскопов – кольцевой лазерный (КЛГ) и волоконно-оптический (ВОГ) – основаны на эффекте Саньяка [1, 2], который проявляется в том, что свет, идущий по замкнутому кольцу в противоположных направлениях, позволяет обнаружить вращение относительно инерциального пространства (рис. 1). В состоянии покоя, встречные пути луча имеют равную длину (a); при вращении со скоростью Ω , M движется к M' за время прохождения луча (b). Тогда путь, направление которого совпадает с направлением вращения, длиннее одного оборота, а путь, направление которого противоположно направлению вращения, короче оборота. Это приводит к разности длин путей $2\Delta L_v$.

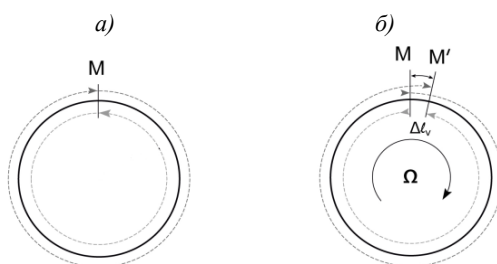


Рис. 1. Принцип действия эффекта Саньяка

Лефевр Эрве. К. Главный научный сотрудник (Chief Scientific Officer) фирмы iXBlue SAS, Марли-ле-Руа (Франция).

Научные редакторы перевода д.т.н. И.К.Мешковский, к.т.н. А.А. Унтилов.

Статья по докладу на XIX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

На одном обороте, как в исходном эксперименте Саньяка [3], эффект чрезвычайно слаб, но его можно усилить за счет циркуляции света в замкнутом контуре объёмного резонатора кольцевого лазера или с использованием многочисленных витков волоконной катушки. КЛГ на гелий-неоновой (He-Ne) технологии был продемонстрирован всего через несколько лет после изобретения лазера в 1960 г. Он успешно развивался в 1980-х годах и с тех пор превосходит классические механические гироскопы с вращающейся массой благодаря более высокому сроку службы и надежности. Кроме того, он имеет превосходные характеристики по масштабному коэффициенту, что сделало возможным создание бесплатформенных навигационных систем. Это был очевидный прогресс по сравнению с механическими гироскопами, но газовые лазеры всё же имеют несколько недостатков, таких как тенденция электродов высоковольтного разряда изнашиваться при длительной эксплуатации, а также необходимость безупречного запаивания газовой камеры.

Появление оптического волокна с низким затуханием и эффективного полупроводникового источника света в 1970-х годах проложило дорогу к полностью твердотельному устройству. Однако позже ВОГ стал рассматриваться как прибор, использование которого ограничено применениями средней точности, и неспособный соперничать с КЛГ в области высокоточных приложений. Как мы увидим, этой проблемы больше нет.

Что мы ищем? Разгадка – одномодовая взаимность

Несмотря на принципиальное различие, КЛГ и ВОГ имеют схожий теоретический уровень шума для той же площади одного оборота и для одного и того же количества циркуляций в замкнутом контуре [4]. Периметр типичного КЛГ составляет от 20 до 30 см при порядке 10^4 рециркуляций в оптическом резонаторе [5] (рис. 2). Катушка ВОГ, имеющая 10^4 витков и диаметр 10 см (т.е. с длиной волокна 3 км), имеет такой же потенциал. Сегодня характеристики кольцевых лазерных гироскопов находятся в диапазоне $0.01 - 0.003$ °/ч по стабильности смещения нулевого сигнала, тогда как характеристики наиболее точных ВОГ находятся в диапазоне 0.0001 °/ч. Переведенная в длину пути разность хода,

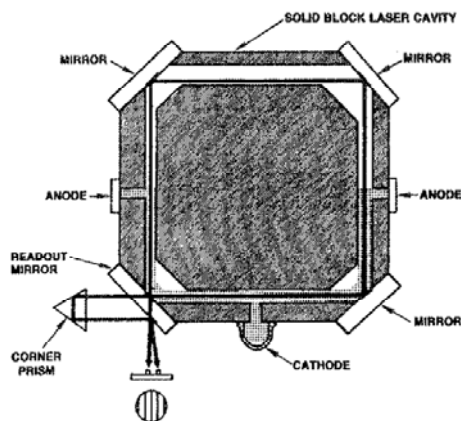


Рис. 2. Конфигурация КЛГ после [5]:
Solid Block Laser Cavity – лазерный резонатор
твердотельного блока, mirror – зеркало
Readout Mirror – считывающее зеркало,
Corner Prism – угловая призма

вызванная эффектом Саньяка, дает ее относительное изменение на 10^{-18} для КЛГ и 10^{-19} для ВОГ! Эти числа могут выглядеть нереальными, но существует фундаментальный принцип взаимности (principle of reciprocity) распространения света, который действует в идеале как ослабление синфазного сигнала между встречными волнами, когда происходит одномодовое распространение. Благодаря одномодовой взаимности время прохождения обеих волн, распространяющихся в противоположном направлении, полностью сбалансировано и остаются только явления, связанные с

эффектом Саньяка. Нестабильность остаточной систематической погрешности (нестабильности нуля) зависит от остаточной невзаимности.

КЛГ имеет естественную “псевдовзаимность”(quasi-reciprocity), так как он работает в режиме одиночной поперечной моды (single transverse mode), а также в режиме одиночной продольной моды (single longitudinal mode). Распространение луча имеет место в газовой плазме низкой плотности, которая, в частности, не имеет никакого двойного лучепреломления, однако его взаимность не идеальна. Электрический разряд создает движение ионов и из-за эффекта увлечения средой Френеля-Физо (Fresnel-Fizeau drag effect). Это движение среды приводит к разнице скоростей между волнами, распространяющимися в противоположных направлениях [5]. Она имеет величину порядка 10^{-15} в единицах относительной скорости и вызывает паразитный невзаимный эффект, эквивалентный примерно $1^\circ/\text{ч}$. Разница компенсируется с помощью общего катода и двух симметричных анодов (рис. 3), но это уравнивание не может быть совершенным, и существует нестабильность остаточной систематической погрешности порядка нескольких тысячных градуса в час.

Может возникнуть вопрос: почему бы не использовать твердотельный лазер, чтобы избежать этого эффекта увлечения средой? Ведь с начала 1960-х годов, когда был изобретен гелий-неоновый лазерный гироскоп, было разработано множество типов лазера. Однако в поведении лазера существует ключевая проблема – конкуренция мод! В принципе непрерывный кольцевой лазер не должен работать, так как оба направления имеют одинаковые условия генерации лазера и конкурируют между собой, то есть лазер является неустойчивым. Гелий-неоновые лазеры работают на очень тонком эффекте благодаря потоку ионов (вследствие эффекта Доплера движущиеся усиливающие ионы работают на различных частотах для противоположных направлений) и использованию изотопов Ne^{20} и Ne^{22} со сдвинутыми амплитудными характеристиками, позволяющими получить два одновременно работающих лазера: один изотоп усиливает одно направление, другой – противоположное, и, таким образом, избежать конкуренции мод [5]. “Волшебство”... но в пределах невзаимности, вызванной эффектом Френеля-Физо!

В случае ВОГ было намного труднее получить взаимность [6], главным образом, из-за остаточного двойного лучепреломления волокна и жестких требований к качеству поляризатора [7] для устранения этой проблемы. В настоящее время по мере усовершенствования компонентов задача решается. Волноводы из ниобата лития выполненные по протонно-обменной технологии (LiNbO_3) обеспечивают отличное подавление паразитной поляризации, радикально уменьшая невзаимности, вызванные двойным лучепреломлением. Дополнительные преимущества дает использование деполаризованного света в волокнах, сохраняющих поляризацию проходящего излучения, и деполаризованного широкополосного источника усиленного спонтанного излучения ASE (amplified spontaneous emission) на основе телекоммуникационной EDFA (волоконный

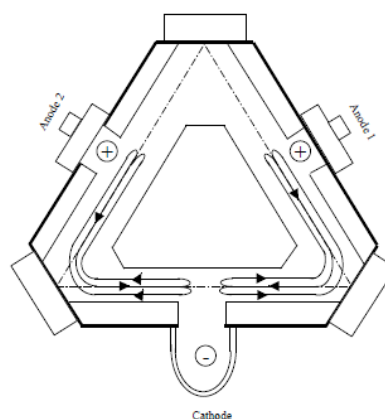


Рис. 3. Симметричный разряд для уравнивания эффекта Френеля-Физо в ионном течении

усилитель, легированный эрбием) техники с диодной накачкой [8].

Следует отметить, что при распространении света большой плотности мощности нелинейные эффекты нарушают принцип взаимности [9], основанный на линейности уравнения распространения, но “чудесным” образом оказывается, что статистический разброс колебаний мощности широкополосного источника уравновешивает этот эффект в полной мере [8]. В наше время ВОГ проявляет себя как уникальный датчик, ограниченный лишь своим теоретическим фотонным шумом, без источников долгосрочного дрейфа.

Однако гироскопам приходится работать в большом динамическом диапазоне, и это требует таких методик обработки сигналов, которые не будут ухудшать присущую гироскопам устойчивость.

Другой ключевой вопрос: методика обработки сигналов

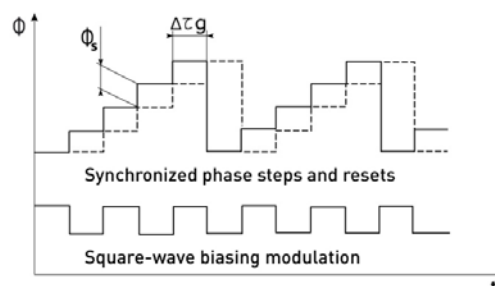
Одним из преимуществ КЛГ является очень простой механизм считывания информации. Как в любом лазере, в нем укладывается целое число длин волны вдоль пути резонатора. Разность длин пути, созданная эффектом Саньяка, вызывает разность длин волн между двумя встречными резонирующими лучами, и, следовательно, разность частот. Лучи на выходе соединяют снова и интерферируют (см. рис. 2), что дает биение частот, пропорциональное скорости вращения [5]. Простой электронный счетчик обеспечивает линейное считывание угловой скорости по очень большому динамическому диапазону.

Заметим, однако, что при низкой угловой скорости существует так называемый эффект захвата мод (lock-in effect). Оба лазерных луча имеют очень близкие частоты: различие в 1 Гц для угловой скорости $1^\circ/\text{ч}$, частоте света 500 THz при гелий-неоновой рабочей длине волны 633 нм. Несмотря на совершенный технологический прогресс, существует остаточное обратное рассеяние зеркал (mirror backscattering), вызывающее захват лучей на одной и той же частоте. Это устраняется механическим возмущением, что теоретически увеличивает величину шума измерения на порядок [5].

ВОГ – это уже не активный резонатор, а пассивный интерферометр с внешним источником света. В нем можно обойтись без входа в синхронизм, и в этом случае не будет необходимости в механическом возмущении, что позволяет избежать связанного с ним ухудшения характеристик шума. Однако предварительный выходной сигнал ВОГ – это смещенная вверх косинусоида. Связанные с этим трудности были преодолены с помощью очень эффективной методики модуляции фазы с обратной связью, приводящей к цифровой демодуляции без дрейфов [10]. Это так называемое полностью цифровое изменение фазы по линейному закону дает комбинацию модуляции смещения прямоугольными импульсами и синхронизированные скачки фазы, выработанные и демодулированные в цифровой форме (рис. 4).

Этот метод обработки сигнала является намного более сложным, чем простое считывание частоты в КЛГ, но он может быть легко реализован с помощью существующей цифровой электроники. Он не приводит ни к ухудшению шумовых характеристик, ни к потере взаимности интерферометра и свободен от шума квантования, несмотря на ограниченное число битов преобразователя, благодаря эффекту усреднения.

Шум смещения нуля и дрейф рассчитываются с использованием вариаций Аллана [11], и для ВОГ с предельными характеристиками дают теоретический наклон степени $-1/2$, соответствующий белому шуму при многодневных измерениях без какого-либо видимого ограничения стабильности смещения (без пульсации, без случайного дрейфа угловой скорости), вплоть до диапазона $0,0001 - 0,00001^\circ/\text{ч}$, и с угловым случайным шумом в диапазоне $0.0001 \text{ }^\circ/\sqrt{h}$. Это совершенно уникально в сравнении с другими инерциальными датчиками, такими как акселерометры или механические и лазерные гироскопы.



Синхронизированные скачки фазы и сбросы
Модуляция смещения прямоугольными импульсами

Рис. 4. Принцип цифровой обратной связи с цифровым пилообразным изменением фазы, где $\Delta\tau_g$ – время прохождения через катушку (5 мкс/км)

Конфигурация ВОГ

Основанный на оптической твердотельной телекоммуникационной технологии ВОГ имеет очень долгий срок службы (рис. 5).

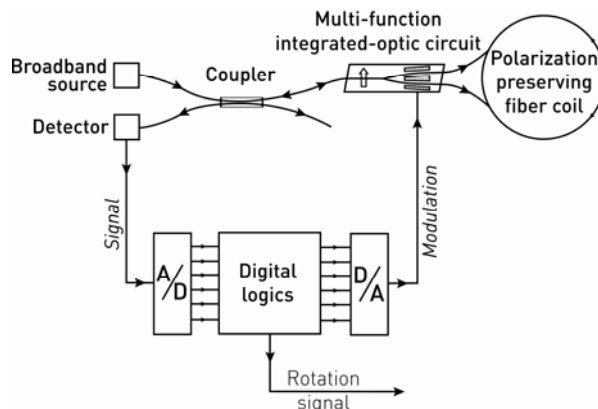


Рис. 5. Конфигурация ВОГ с Y-соединением:

Multi-function integrated –optic circuit – многофункциональная интегрально-оптическая схема, Broadband source – широкополосный источник, Coupler – разветвитель, Polarization-preserving fiber coil – катушка с волокном, Digital logics – цифровая логическая электроника, Rotation signal – сигнал вращения

Он состоит из широкополосного источника на основе технологии EDFA с длиной волны 1550 нм (для высокого класса точности); сохраняющей поляризацию волоконной катушки (от нескольких сотен метров для среднего класса точности до нескольких километров для высокого класса точности); интегрально-оптической схемы на ниобате лития (LiNbO_3) с электродами для модуляции фазы, что обеспечивает превосходную селективность поляризации, с волноводами, выполненными по протонно-обменной технологии; волоконного разветвителя (или циркулятора), направляющего на считывающее устройство свет; аналого-цифрового преобразователя (A/D) для оцифровки сигнала; цифровой логической электроники, проводившей модуляцию фазы и фазовую обратную

связь через цифроаналоговый преобразователь (D/A).



Рис. 6. Инерциальная навигационная система MARINS компании iXBlue (400x 300 x 280 мм³)

Свидетельством качества, точности и надежности волоконно-оптического гироскопа является всё возрастающее их использование в приборах ориентации и навигации для военно-морских (рис. 6) и космических (рис. 7) приложений. На рис. 8 показан график погрешности долготы инерциальной навигационной системы MARINS компании iXBlue, имеющей точность лучше, чем морская миля в сутки. Это соответствует неустойчивости смещения нуля гироскопа 10^{-4} °/ч и стабильности масштабного коэффициента 10 ppm. Здесь можно видеть колебания Шулера с периодом 84 мин, зависящие от погрешностей акселерометров, а также 24-часовые колебания и неограниченный линейный дрейф, зависящие от гироскопов.

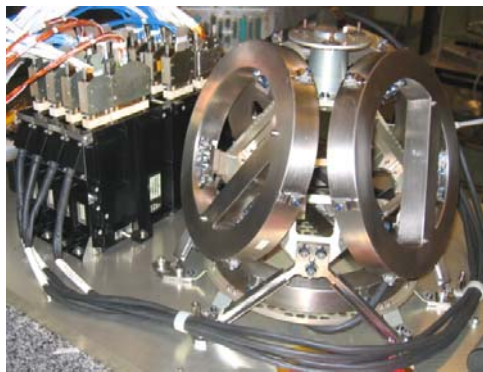


Рис. 7. 4-осный ВОГ, разработанный компанией iXBlue в сотрудничестве с EADS-Astrium для космических приложений

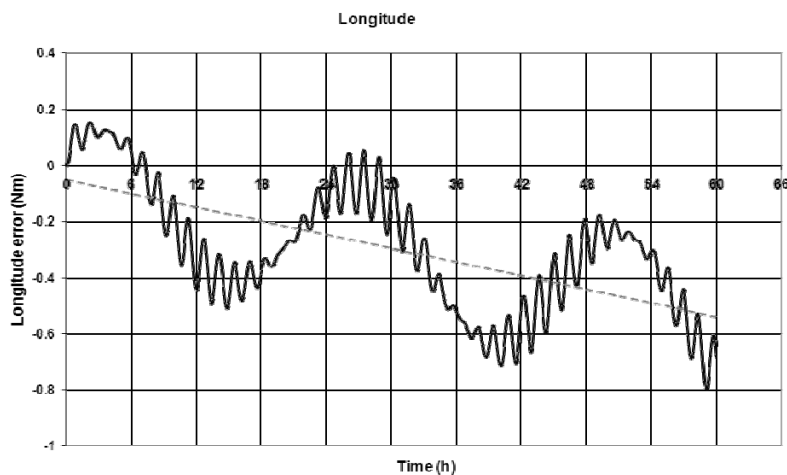


Рис. 8. Погрешность долготы системы MARINS компании iXBlue's (Longitude – долгота, Longitude error (Nm) - погрешность долготы (Нм))

Выводы

Поступивший в производство в 1980-х годах кольцевой лазерный гироскоп совершил коренной перелом в технологии инерциальных систем, и очевидно, что это ведущая технология в наше время. Однако его ограниченный срок службы и необходимость в его механическом возмущении побудили развитие технологии ВОГ, основанной на полностью твердотельном методе.

Теоретические характеристики технологий КЛГ и ВОГ аналогичны, но в последнем случае было труднее добиться их достижения. ВОГ появились в 1990-х годах как приборы для приложений средней точности (уровня $1^\circ/\text{ч}$) [12]. Однако с развитием волоконно-оптических коммуникационных компонентов и методов цифровой обработки сигналов было показано, что он не только дает ожидаемое увеличение срока службы, но и не имеет ограничений рабочих характеристик, как КЛГ в отношении шума и стабильности смещения нуля. Масштабный коэффициент КЛГ остается лучше (1 ppm для высокоточного КЛГ против 10 ppm для ВОГ). Такой уровень выглядит совершенно осуществимым и для ВОГ с усовершенствованным управлением длиной волны источника и коррекцией размеров катушки в зависимости от температуры.

Сегодня ясно, что произошло изменение взглядов, и ВОГ не рассматривается больше как прибор, ограниченный применениями средней точности, а рассматривается как гироскоп, который может превзойти по точности кольцевые лазерные гироскопы на один-два порядка.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Post, E.J.**, "Sagnac effect", Review of Modern Physics, Vol. 39, 475-494 (1967).
2. **Arditty H.J. and Lefèvre H.C.**, "Sagnac effect in fiber gyroscopes", Optics Letters, Vol. 6, 401-403 (1981).
3. **Sagnac G.**, Comptes rendus à l'Académie des Sciences, Vol. 95, 708-710 (1981).
4. **Fabre C.**, "La limite quantique dans les gyromètres optiques", Revue scientifique et technique de la défense, Vol. 7, 109-115 (1990).
5. **Aronowitz, F.**, "Fundamentals of the Ring Laser Gyro", Optical Gyros and their Application, RTO AGARDograph, 339, 3-1 to 3-45 (1999).
6. **Ulrich R.**, "Fiber-optic rotation sensing with low drift", Optics Letters, Vol. 5, 173-175 (1980).
7. **Kintner E.C.**, "Polarization control in optical-fiber gyroscope", Optics Letters, Vol. 6, 154-156 (1981).
8. **Lefèvre H.**, The Fiber-Optic Gyroscope, Artech House, Boston-London (1993).
9. **Ezekiel S., Davis J.L. and Hellwarth R.W.**, "Intensity dependent nonreciprocal phase shift in a fiber optic gyroscope", Springer Series in Optical Sciences, Vol. 32, 332-336 (1982).
10. **Arditty H.J., Graindorge P., Lefèvre H.C., Martin P., Morisse J. and Simonpiétri P.**, "Fiber-optic gyroscope with all-digital processing", OFS 6, Springer-Verlag Proceedings in Physics, 131-136 (1989).
11. **IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros**, IEEE Std 952 (1997).
12. **30th FOG Anniversary Session**, Proceedings of OFS 18 Conference, Cancun (2006).

Abstract. *The fiber-optic gyroscope started to be investigated in the mid 70's, opening the way for a fully solid-state rotation sensor. It was firstly seen as limited to medium-grade applications, but today, it reaches ultimate theoretical performance and surpasses its well-established competitor, the ring laser gyroscope, in terms of bias noise and long-term stability.*

Key words: Fiber-optic gyroscope, Ring-laser gyroscope, inertial navigation.