

М. С. БХУВАНЕСВАРИ, Ш. ПРИНС

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ГИРОСКОПЫ: КОНСТРУКЦИЯ, РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ

Волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) обеспечивают определение угловой скорости носителя и широко применяются для инерциальных измерений и в навигации. В течение последних десятилетий ВОГ успешно конкурируют с наиболее передовыми гиротехнологиями в различных приложениях. Концепция оптических гироскопов возникла уже сто лет назад, однако исследования в этой области, направленные на разработку новых проектных решений и повышение эффективности существующих приборов, продолжают активно развиваться. Среди типов ВОГ следует отметить интерферометрические, которые применяются в большинстве навигационных приложений на земле, в воздухе и на море, а также в оборонных технологиях. Конструктивные особенности ВОГ предполагают выбор источника света, схемы намотки волокна, фазовых модуляторов, методов обработки сигналов и, что наиболее важно, интегральной оптики на различных уровнях. В настоящей статье представлен подробный обзор методов разработки ВОГ и их применения.

Ключевые слова: оптические гироскопы, эффект Саньяка, фотонно-кристаллическое волокно, миниатюризация, эффект Шьюпа, интегральная оптика.

1. Введение

Гироскопы представляют собой датчики, используемые для измерения угловой скорости вращения основания, на котором они установлены. Принцип их действия

Бхуванесвари М.С. Кафедра электроники и связи, Институт науки и технологий SRM, Каттанкулатур (Тамилнад, Индия).

Принс Шанти. Доктор наук, профессор, кафедра электроники и связи, Институт науки и технологий SRM.

Научный редактор перевода к.т.н. А.А. Унтилов

основан на законе сохранения момента импульса, эффектах Саньяка и Кориолиса. Классификация гироскопов по типам функционирования приведена на рис. 1. Согласно закону сохранения момента импульса, любая система с вращающейся массой (в данном случае гироскопическая) обладает физическим свойством сохранения вращательного движения, пока не будет возмущена моментом внешних сил. Это означает, что скорость вращения массы остается постоянной, пока эффективный момент сил равен нулю. При наличии движения в системе устройство сопротивляется любым изменениям ее ориентации.

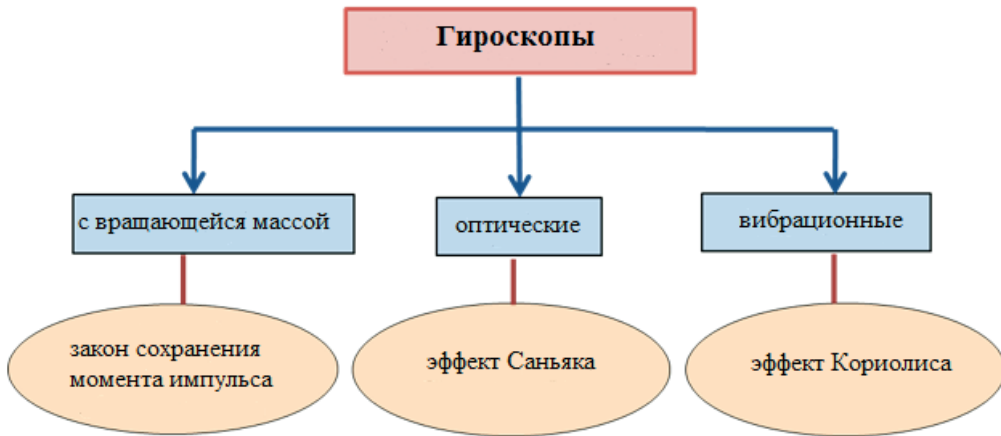


Рис. 1. Классификация гироскопов по принципу работы

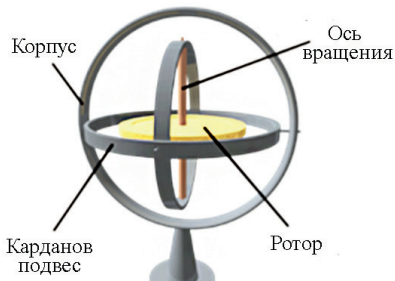


Рис. 2. Гироскоп вращающегося типа [1]

Гироскоп вращающегося типа [1] (рис. 2) содержит ротор, удерживаемый тремя кольцами карданова подвеса. При быстром вращении ротора возникает угловой момент, благодаря которому сохраняется направление вращения оси ротора до появления внешнего момента. Возникающий угловой момент препятствует обусловленному внешним моментом изменению ориентации оси ротора.

Принцип работы оптических гироскопов базируется на эффекте Саньяка [2, 3], который описывает поведение двух встречных световых лучей в замкнутом контуре. В таком гироскопе свет от источника при помощи светоделителя делится на два луча и посылается в противоположных направлениях по замкнутому контуру, образованному кольцевым резонатором или оптоволоком в форме петли [4]. Встречно распространяющиеся в таком контуре лучи интерферируют. Когда система остается в покое, встречные лучи проходят по контуру одинаковое расстояние, как показано на рис. 3, а, и интерферируют синфазно. Эта синфазная интерференция соответствует нулевой скорости вращения системы (состоянию покоя). При вращении системы, когда начальное положение замкнутого контура изменяется по направлению вращения от M к M' (рис. 3, б), длины оптических путей, пройденных встречными лучами, перестают быть одинаковыми, интерференционная картина меняется, при этом фазовый сдвиг соответствует скорости вращения основания, на котором размещен гироскоп.

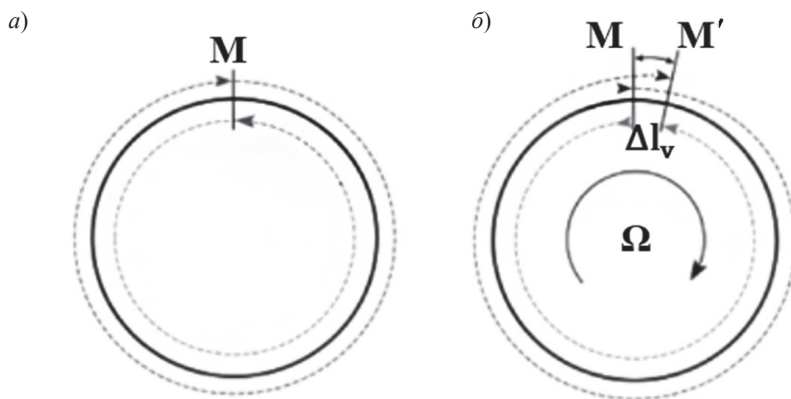


Рис. 3. Волоконный контур в неподвижном состоянии (а), при вращении (б) [4, 5]

Вибрационные гироскопы, сейчас в основном изготавливаемые по технологиям микроэлектромеханических систем (МЭМС), работают на эффекте Кориолиса. Движущийся объект во вращающейся системе координат отклоняется под действием силы Кориолиса. Основными компонентами гироскопа являются опора, резонатор и электромагнитный привод. При вращении устройства сила Кориолиса создает резонансную связь, позволяющую измерить скорость вращения. Недавно появилась категория твердотельных волновых гироскопов [6], основанных на инерции стоячих волн и обладающих более высокой точностью.

В силу своей изначальной способности сохранять ориентацию гироскопы с вращающейся массой широко применяются в различных навигационных платформах, для стабилизации и управления, в боеприпасах, наведении и многих других областях. Однако из-за трудностей, связанных с уменьшением размеров этих приборов, их износом вследствие наличия подвижных механических частей, значительным энергопотреблением и высокой стоимостью, в их разработке наблюдается спад. Два других типа гироскопов – оптические и вибрационные – стали главным объектом внимания исследователей и производителей: активно предпринимаются шаги по их миниатюризации с помощью интегральной оптики и МЭМС-технологий. В табл. 1 приведены результаты сопоставления этих трех типов гироскопов по таким критериям, как общие параметры, производительность и область применения. Показана возможность использования оптических гироскопов с их отличительными особенностями в высокотехнологичных приложениях, несмотря на их среднюю точность в сравнении с высокоточными механическими гироскопами.

С развитием МЭМС-технологий вибрационные гироскопы нашли широкое применение благодаря своим преимуществам: компактности, простоте интеграции и низкому энергопотреблению. Оптические гироскопы широко применяются в различных областях, поскольку идеально подходят для получения точной информации о вращении, необходимой для критически важных навигационных приложений, задействуемых в оборонной, авиационной, морской и космической промышленности.

В нижеследующих разделах статьи (2–6) обсуждается классификация оптических гироскопов и их конфигурации, приводятся показатели производительности, дается краткий обзор резонаторных ВОГ, а затем выполняется детальное исследование интерферометрических гироскопов. В разделе 7 описываются направления будущих исследований, а в 8-м кратко подводятся итоги.

Сравнение механических, оптических и МЭМС-гироскопов [7–14, 27]

Параметр	Механические гироскопы	Оптические гироскопы	Вибрационные / МЭМС-гироскопы
Размер	Большие и объемные	Возможно уменьшение размеров при использовании интегральной оптики	Наименьший возможный размер
Конструкция	Сложная	Сложная	Менее сложная и надежная
Энергопотребление	Среднее	От низкого до среднего	Низкое
Производство	Трудоемкое	Трудоемкое	Возможно массовое производство
Стоимость	Высокая	От средней до высокой	Низкая
Недостатки	Дрейф при механическом трении	Термозависимость нелинейности выходного сигнала	Чувствительность к температуре, ударам и вибрациям
Условия применения	Высокоточные платформы	Длительные пропадания сигнала ГНСС	Жесткие внешние условия
Эксплуатационные характеристики:			
шумовая компонента	низкая ($<10^{-4} \text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$)	средняя ($10^{-4} \text{--} 10^{-2} \text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$)	высокая ($0,01 \text{--} 10 \text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$)
точность	высокая ($<0,001 \text{ }^\circ/\text{ч}$)	средняя ($0,001 \text{--} 0,1 \text{ }^\circ/\text{ч}$)	низкая ($0,01 \text{--} 100 \text{ }^\circ/\text{ч}$)
Область применения	Высокоточная навигация	Навигация – морская, аэрокосмическая и космическая; системы вооружения и наведения, разведка	Дроны/БПЛА; наземные транспортные средства; снаряды; разведка

2. Классификации оптических гироскопов

Классификация оптических гироскопов [15] приведена на рис. 4, упоминаются также некоторые другие типы, выделенные авторами.

По типу конструкции оптические гироскопы можно разделить на два вида – с объемными чувствительными элементами и волоконными. Принцип действия устройств первого типа – кольцевых лазерных гироскопов (КЛГ) – основан на резонансе, создаваемом лазерным источником излучения внутри полости, к устройствам второго типа относятся ВОГ. Приборы можно также классифицировать по типу оптического источника, который бывает активным и пассивным. В первом случае лазерный источник является неотъемлемой частью резонансной полости, а во втором – излучение подается извне [2]. Кроме того, выделяют два типа ВОГ: интерферометрические и резонаторные. У интерферометрических чувствительный элемент представляет собой катушку с намотанным на нее длинным волокном, а у резонаторных – короткое волокно для формирования резонаторной оптической полости. Все перечисленные типы и конфигурации гироскопов более подробно обсуждаются в следующих подразделах.

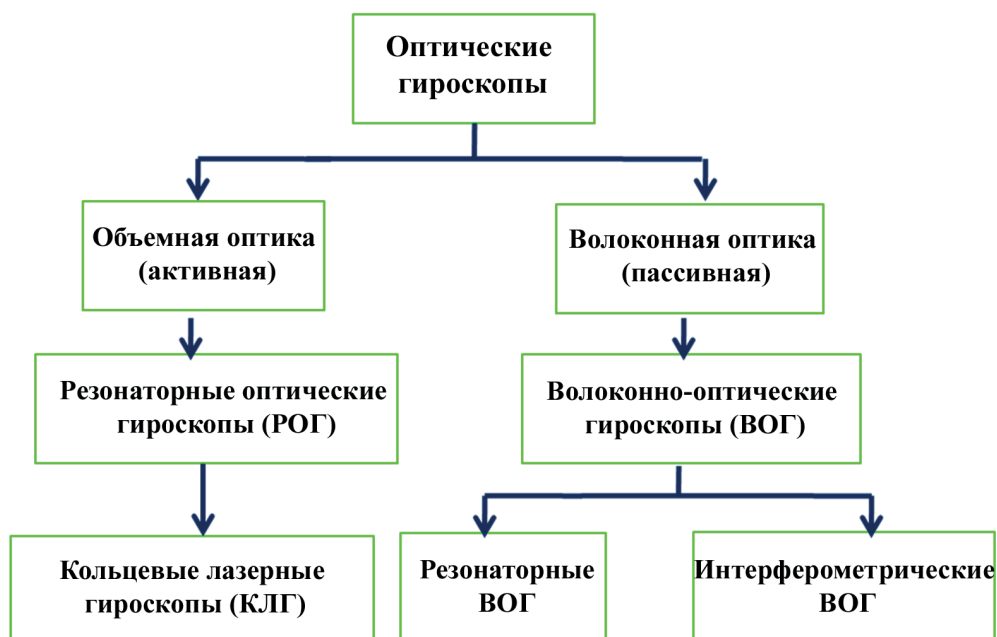


Рис. 4. Классификация оптических гироскопов

2.1. Резонаторные оптические гироскопы

Оптические гироскопы с объемной оптической резонаторной полостью называются резонаторными (РОГ). В них резонанс настроен на измерение разности частот, что в свою очередь обеспечивает выработку информации о скорости вращения. Простой кольцевой интерферометр можно рассматривать как РОГ, а КЛГ – считать основной конфигурацией РОГ.

2.1.1. Кольцевой лазерный гироскоп

В основу конструкции КЛГ положена объемная оптика, где среда, усиливающая оптический сигнал, – это неотъемлемая часть полости, представляющей собой активный резонатор. При изготовлении гироскопа можно использовать кольцевой лазер с треугольной полостью (рис. 5.) [16] или квадратный резонатор с четырьмя зеркалами [17]. Резонатор поддерживает когерентное усиление колебаний волн, распространяющихся в противоположных направлениях. Разность частот между резонансными модами определяет скорость вращения основания, на котором размещен прибор. КЛГ [18, 19] точнее механических аналогов и подходят для высокоточных навигационных систем. При этом они требуют высококачественных зеркал,



Рис. 5. Конструкция КЛГ

и при очень малых скоростях вращения две встречные моды практически идентичны. Это приводит к синхронизации между волнами и захвату частот и формирует «мертвую зону» прибора, что требует введения принудительного дитеринга (введения частотной подставки). В обзоре, посвященном КЛГ [20], рассматриваются принципы и методы ослабления эффектов захвата путем механического дитеринга. В [21] подтверждается снижение шума у КЛГ с дитерингом за счет компенсации захвата частот. Анализ конфигурации КЛГ показывает, что нейронная сеть позволяет потенциально повысить чувствительность прибора до нрад/с [22] и добиться дрейфа $0,0002^\circ/\text{ч}$ [23].

Исследования КЛГ, направленные на получение модели его дрейфа для использования в инерциальных бесплатформенных системах, продолжаются. Одна из предложенных конструкций с компенсацией зоны захвата и квадратным резонатором [24] обеспечивает стабильность смещения нуля на уровне 3 нрад/с и чувствительность (шумовую составляющую) около $2^\circ/\sqrt{\text{ч}}$, что подходит для геофизических приложений. Миниатюрный КЛГ применяется в метрологии [25] для определения погрешности угловых измерений. Оценивается также погрешность измерений угловой скорости, вызванная неточной установкой прибора, нестабильностью скорости вращения, погрешностью вычислений и многократных измерений. Производство таких устройств для массового потребления пока ограничено. Наиболее высокоэффективный цифровой КЛГ фирмы Honeywell GG1320AN имеет нестабильность смещения нуля $0,0035^\circ/\text{ч}$, случайное угловое блуждание $0,0035^\circ/\sqrt{\text{ч}}$, нелинейность масштабного коэффициента 5 ppm [26] и может устанавливаться на пилотируемых и беспилотных летательных аппаратах, а также на морских, космических и наземных подвижных объектах.

2.2. Волоконно-оптические гироскопы

ВОГ появились как альтернатива объемным РОГ. Развитие оптоволоконных технологий и их преимущества, такие как небольшой вес, повышенная помехоустойчивость, открывают возможности для создания более эффективных гироскопических систем. Более того, так как РОГ являются активными устройствами с расположением источника света внутри чувствительного элемента, а ВОГ – пассивными, где этот источник располагается снаружи, последние обладают хорошим потенциалом для минимизации размеров датчика. Краткие сравнительные характеристики РОГ и ВОГ приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Сравнение основных категорий оптических гироскопов [2, 10, 14, 17–21, 27]

Тип Параметр	КЛГ	ВОГ
Принцип	Эффект Саньяка – измерение разности частот	Эффект Саньяка – измерение фазового сдвига
Конфигурация	Кольцевой лазерный резонатор	Волоконный интерферометр
Источник света	He-Ne-лазер (внутренний)	Непрерывный волновой лазер или суперлюминесцентный диод (СЛД)

Тип Параметр	КЛГ	ВОГ
Размер	Громоздкий размер из-за зеркал	Компактный (зависит от длины волокна)
Точность	Высокая (дрейф 0,0001–0,01 °/ч)	Сопоставимая (0,001–0,1 °/ч)
Преимущества	Точное измерение скорости вращения	Чрезвычайно точная информация о скорости вращения, высокая надежность, низкая стоимость, сравнительно простая конструкция, легко миниатюризировать
Недостатки	Дорогая и сложная конструкция, высокое энергопотребление, проблема захвата частот лазера, необходимость использования зеркал очень высокого качества и точной юстировки	Необходимость первоначальной калибровки, чувствительность к вибрациям, высокая температурная зависимость
Приложения	Высокоточные навигационные системы – авиационные и космические	Высокочувствительные навигационные системы с высоким разрешением – космические и морские

Основные принципы, на которых зиждется эксперимент Саньяка, а также конфигурации КЛГ и ВОГ подробно обсуждаются в [27, 28]. КЛГ играют важную роль в авиации и беспилотных системах, в настоящее время эта технология позволяет достичь дрейфа 10^{-3} °/ч [28]. Сейчас главное внимание в исследованиях уделяется ВОГ и дальнейшему повышению их точности для соответствующих приложений. Кроме того, согласно недавним прогнозам, спрос на ВОГ значительно вырастет, что повлечет за собой расширение рынка этих устройств.

2.2.1. Будущие возможности рынка ВОГ

Согласно отчету, подготовленному для Северной Америки и Европы, объем мирового рынка ВОГ в течение десятилетия достигнет 1,862 млн устройств, а среднегодовой темп роста составит 3,2%. Анализ рынка Азиатско-Тихоокеанского региона показывает, что в течение следующих 5 лет объем рынка достигнет 12,446 млн устройств, а среднегодовой темп роста – 4,25% [29]. Результаты анализа рынка, проведенного Data Bridge, представлены на рис. 6.

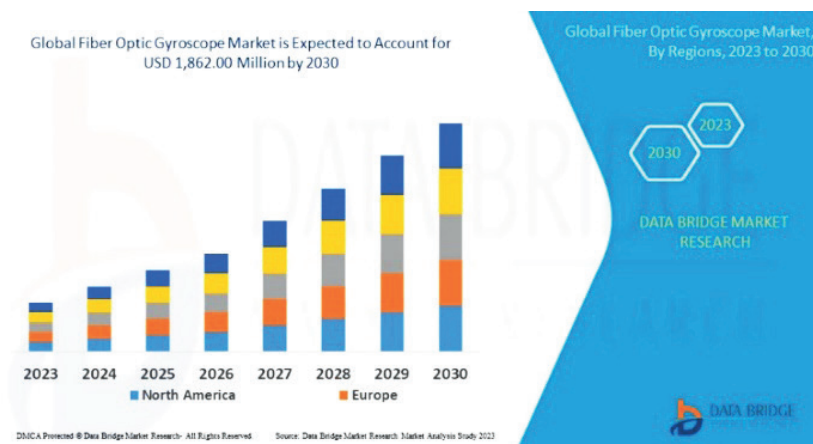


Рис. 6. Анализ рынка ВОГ по данным Data Bridge [29]

К ключевым факторам такого роста относятся:

- 1) увеличение расходов на оборонные приложения;
- 2) расширяющаяся автоматизация быта и промышленности;
- 3) растущая востребованность автономных и телеуправляемых транспортных средств.

В другом отчете Future Market Insights [30] говорится, что, согласно прогнозам, через 10 лет мировой рынок ВОГ достигнет 3,6 млрд долларов США при среднегодовом темпе роста 8,4%. Расширение рынка ВОГ связано в первую очередь с более активным применением инерциальных навигационных систем в автономных боевых машинах, системах воздушного мониторинга, с ростом оборонных инвестиций в беспилотные летательные аппараты (БПЛА), а также с необходимостью обеспечения навигации и стабильности инфраструктуры в районе боевых действий, в аэрокосмических и подводных условиях. Несмотря на прогнозируемый высочайший спрос, сложность и трудоемкость проектирования и производства ВОГ пока препятствуют росту рынка, и, чтобы удовлетворить спрос на ВОГ в ближайшем будущем, исследователям предстоит решить множество непростых задач.

2.2.2. Классификация волоконно-оптических гироскопов

Волоконно-оптические гироскопы делятся на резонаторные и интерферометрические, принципы работы которых базируются на измерениях резонанса и интерферометрического сигнала соответственно.

2.2.2.1. Резонаторные волоконно-оптические гироскопы. В резонаторном ВОГ (РВОГ) в качестве чувствительного элемента применяется волоконно-оптический кольцевой резонатор с коротким волокном (см. конструктивную схему на рис. 7) [31]. Традиционный РВОГ содержит лазерный источник, частота которого должна быть согласована с длиной резонатора, а скорость вращения определяется по изменению частоты встречных волн. Свет от лазерного источника подается в многофункциональную интегральную оптическую схему (МИОС) через циркулятор или ответвитель. Фазовый модулятор, встроенный в МИОС, используется для внешнего смещения модуляции сигнала в целях повышения чувствительности, а лучи, разделенные

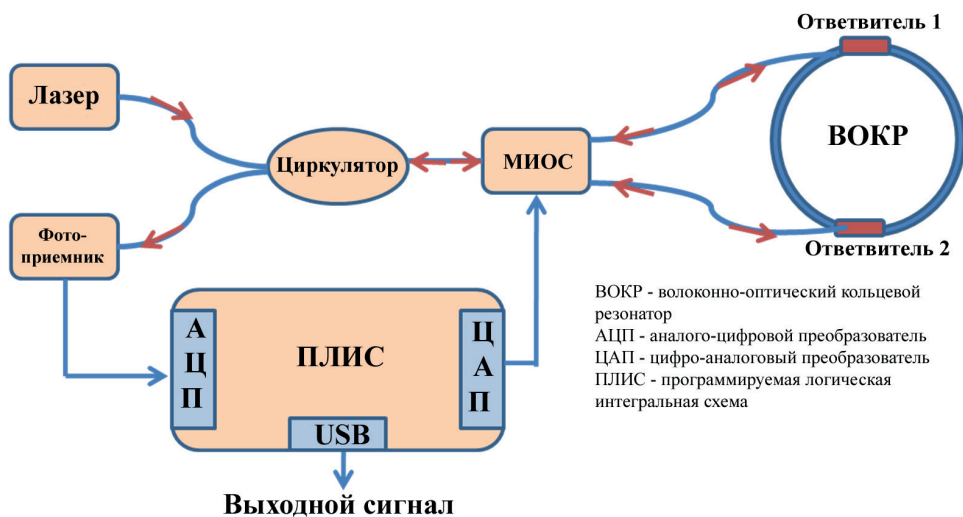


Рис. 7. Конструктивная схема РВОГ [30]

Y-образным светоделителем, подаются в волоконно-оптический кольцевой резонатор, где они распространяются во встречных направлениях и создают резонанс в полости. Один контур сигнала позволяет поддерживать систему в состоянии резонанса, другой – добиться сдвига частоты через петлю обратной связи, с помощью которой рассчитывается скорость вращения. Когда система находится в состоянии покоя, сдвиг частоты не происходит. Вращательное движение приводит к изменению резонансной частоты, а следовательно, и к разности собственных частот.

Разность частот, генерируемая в волоконно-оптическом кольцевом резонаторе (ВОКР), вычисляется по формуле [2]

$$\Delta f_R = \frac{4A}{\lambda P} \Omega, \quad (1)$$

где Δf_R – разность частот, рад/с; A – площадь полости ВОКР, м²; Ω – скорость вращения, рад/с; λ – длина волны, нм; P – периметр ВОКР, м. Разность частот приводит к изменению разности фаз между волнами по закону

$$\Delta \varphi = 2\pi \Delta f_R t. \quad (2)$$

Сигнал с выхода ВОКР через МИОС и циркулятор поступает в фотоприемник, мощность сигнала на его выходе определяется по формуле [2]

$$P = \frac{P_0}{2} (1 + \cos(2\pi \Delta f_R t)), \quad (3)$$

где P_0 – мощность сигнала на входе в ВОКР. Далее аналоговый сигнал преобразуется в цифровой и обрабатывается, чтобы получить данные о скорости вращения. На рис. 7 представлена схема устройства с замкнутым контуром, где цифровой выходной сигнал преобразуется в аналоговый, а информация о скорости вращения поступает обратно в фазовый модулятор для обнуления разницы частот, чтобы повысить чувствительность прибора. Сокращение длины волокна кольцевого резонатора создает хорошие перспективы для миниатюризации и увеличения точности гироскопа [32], а благодаря высокой стабильности в дальнейшем РВОГ может найти применение в инерциальной навигации. Вместе с тем неоднородность материала оптоволокна, воздействие внешней среды и шумы, обусловленные обратным рассеянием, нелинейностью и поляризационными перекрестными помехами, по-видимому, сдерживают развитие технологии РВОГ, и ученым предстоит решить эту проблему.

2.2.2.2. Интерферометрические волоконно-оптические гироскопы. Принцип работы интерферометрических волоконно-оптических гироскопов (ИВОГ) основан на интерферометрии светового пучка в волоконной катушке, содержащей множество витков оптоволокна. Общая конструктивная схема ИВОГ [33] приведена на рис. 8. Фазовый сдвиг, обусловленный разницей в оптической длине контуров встречных лучей в волоконном контуре, пропорционален скорости вращения (°/ч) основания, на котором установлен ИВОГ.

Свет поступает от широкополосного источника в ответвитель или циркулятор. Широкополосный источник используется для снижения уровня когерентного шума, а циркулятор или ответвитель – для получения взаимной интерферометрической схемы. Затем свет подается в МИОС, в состав которой входят:

- поляризатор для поддержания поляризации распространяющихся волн;

- светоделитель, разделяющий свет в соотношении 50:50 для подачи в волоконно-оптическую измерительную катушку для встречного распространения;
- фазовый модулятор, повышающий чувствительность устройства при измерении очень низких скоростей вращения.

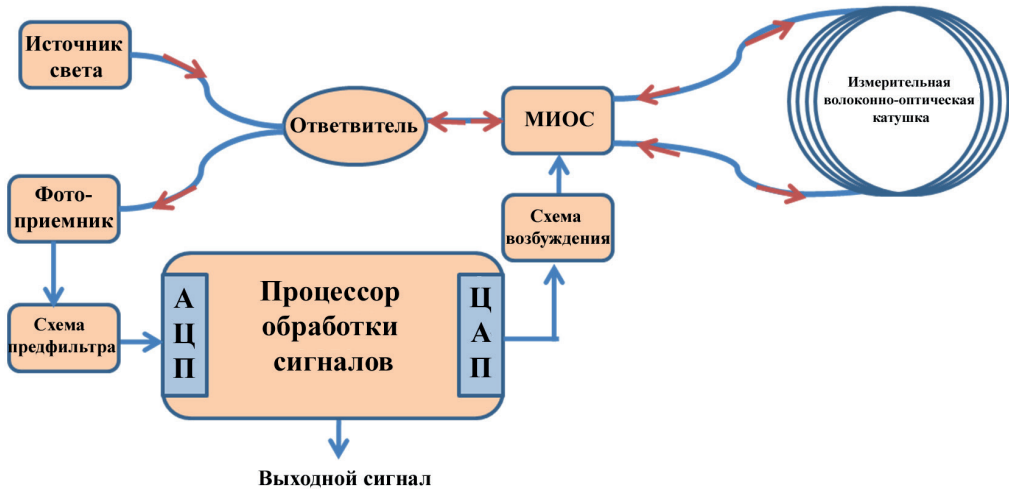


Рис. 8. Конструктивная схема ИВОГ [32]

Сигнал, обнаруженный фотоприемником, фильтруется перед подачей в сигнальный процессор, где аналоговый сигнал преобразуется в цифровой, а затем проходит обработку, чтобы получить данные о скорости вращения. Для повышения чувствительности обработанный сигнал снова конвертируется в аналоговый, и компенсирующий сигнал подается в фазовый модулятор через контур возбуждения для устранения фазы Саньяка. Несмотря на такие преимущества устройства, как твердотельная конструкция, ограниченное количество компонентов и высокая точность измерения скорости вращения, проблема невзаимных фазовых сдвигов вследствие нелинейностей и температурных факторов требует дальнейшего изучения.

Разность фаз, генерируемая в волоконной катушке, связана со скоростью вращения выражением [2]

$$\Delta\varphi_s = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega, \quad (4)$$

где $\Delta\varphi_s$ – фазовый сдвиг Саньяка, рад; L – длина волоконной катушки, м; D – диаметр волоконной катушки, см; Ω – скорость вращения, рад/с; c – скорость света, м/с; λ – длина волны света, нм.

Выходной интерференционный сигнал обнаруживается фотоприемником, а его мощность [2] определяется по формуле

$$P = \frac{P_0}{2} (1 + \cos(\Delta\varphi_s)), \quad (5)$$

где P_0 – мощность сигнала на входе интерферометра. После этого полученное значение мощности P обрабатывается, чтобы получить данные о скорости вращения.

2.2.2.3. Итоговые замечания относительно ВОГ. Сравнение традиционных интерферометрических и резонаторных ВОГ, результаты которого приведены в табл. 3 [34],

помогает выбрать тип гироскопа с учетом его параметров, наиболее подходящий для решения поставленных исследовательских задач. В ИВОГ чувствительный контур сформирован путем сматывания волокна по всей длине в большое количество витков, а в РВОГ короткое волокно, свернутое в кольцо с одним целым или неоконченным витком, образует кольцевой резонатор, где угловая скорость рассчитывается по разнице резонансных частот. Подробный обзор ВОГ, основных принципов их функционирования, паразитных эффектов и приложений, в которых они используются, приводится в [35]. ИВОГ также привлекают все большее внимание исследователей, поскольку они способны обеспечить более точные измерения скорости по сравнению с РВОГ. Универсальные свойства волоконно-оптических технологий позволяют получать информацию о скорости вращения с высокой точностью и миниатюризировать устройства.

Т а б л и ц а 3

Сравнение интерферометрических и резонаторных ВОГ [34]

Параметр / элемент	Традиционные ИВОГ	Традиционные РВОГ
Источник света	Низкокогерентный широкополосный источник – СЛД	Высококогерентный узкополосный источник – лазер с распределенной обратной связью или волоконный лазер
Чувствительный элемент	Волоконная катушка	Волоконный кольцевой резонатор
Разрешение	Высокое	Низкое
Размер	Большой	Маленький
Сложность	Относительно низкая	Высокая

2.3. Другие типы гироскопов

Помимо вышеупомянутых типов, в настоящее время разрабатываются такие устройства, как гироскоп с полусферическим резонатором (ГПР) [36], атомный гироскоп [37] и гироскоп на ядерном магнитном резонансе (ЯМГ). Стандартные методы создания ГПР обсуждаются в [38, 39], а теоретическая модель ГПР с замкнутым контуром и методы идентификации и компенсации погрешностей описываются в [40]. В [41] рассматриваются нелинейности, воздействующие на резонансные колебания ГПР, и выполняется их моделирование для повышения точности гироскопа, установленного в автомобильных навигационных системах. Были выявлены различные причины дрейфа таких гироскопов, которые должны быть устранены. В [42] предложен микро-ГПР с зубцами по краю резонатора, обеспечивающими повышение чувствительности и стабильности, а в [43] – гироскоп LR-450 производства Northrop Grumman, который имеет нестабильность смещения нуля $0,003^\circ/\text{ч}$, случайное угловое блуждание $0,003^\circ/\sqrt{\text{ч}}$, нелинейность масштабного коэффициента 10 ppm и может применяться в дальних космических, планетарных и орбитальных миссиях.

Состояние разработки атомных гироскопов и ключевые особенности технологии ЯМГ обсуждаются в [44]. Теоретическая модель ЯМГ с замкнутым контуром на основе оптической накачки со спиновым обменом представлена в [45], а основные опера-

ции, используемые методы и текущий статус разработки – в [46]. В работе [47] описывается влияние термозависимых характеристик на стабильность смещения нуля ЯМГ и приводятся методы минимизации этого эффекта. Принцип работы твердотельных гироскопов рассматривается в [48], тенденции будущих разработок – в [49], обзор гироскопов производства SAGEM дан в [50]. Это свидетельствует о потенциальной востребованности других типов гироскопов для будущих исследований и приложений.

3. Конфигурации интерферометрических волоконно-оптических гироскопов

Конфигурации ИВОГ могут быть как с разомкнутым, так и с замкнутым контуром обратной связи. В разомкнутой схеме скорость вращения определяется путем прямой обработки измеренной интенсивности света, а в замкнутой вводится обратная связь для устранения эффекта сдвига фазы Саньяка, что повышает чувствительность за счет получения данных о скорости вращения.

3.1. Конфигурация с разомкнутым контуром

Эта конфигурация является базовой, она состоит из источника света, ответвителя/циркулятора, волоконной катушки и оптического приемника, как показано на рис. 9. Для получения данных об угловой скорости сигнал на выходе оптического приемника проходит цифровую обработку. Этот выходной сигнал, типичный для разомкнутой системы и зависящий от косинуса сдвига фазы в соответствии с уравнением (5), необходимо модифицировать. Последнее вызвано тем, что при отсутствии вращения функция косинуса находится в максимуме и не позволяет определить малые изменения скорости и направление вращения. Чтобы устранить эту проблему и избежать фликер-шума, обусловленного низкой частотой, на одном конце волоконной катушки при помощи пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) вводится синусоидальная модуляция сдвига фазы. Фиксация разности между встречными путями распространения сигнала в волоконной катушке обеспечивается за счет поляризатора и второго ответвителя. Такая конфигурация называется минимальной [51], или взаимной [2], как показано на рис. 10 [52].

ПЭП крепится к волоконной катушке путем приклеивания с одной из ее сторон нескольких намотанных витков волокна, что создает разность длин проходимых светом путей, которая аккумулирует разную фазовую задержку. Упомянутая ранее синусоидальная модуляция позволяет описать выходной сигнал в терминах детектируемой интенсивности сигнала [53] следующим образом:

$$I(t) = I_0 (1 + \cos(\varphi_s + \varphi_m \sin \omega_m t)), \quad (6)$$

где φ_s – сдвиг фазы Саньяка; φ_m – фаза модуляции; ω_m – частота модуляции.

Раскрывая приведенное выше выражение через функцию Бесселя, получаем:

$$I(t) = I_0 \cos \varphi_s (J_0(\varphi_m) + 2J_2(\varphi_m) \cos 2\omega_m t + \dots) + I_0 \sin \varphi_s (2J_1(\varphi_m) \sin \omega_m t + \dots). \quad (7)$$

Основной нечетный гармонический член, пропорциональный синусоидальной функции, определяется синхронно для получения смещенного выходного сигнала в виде

$$I(t) = I_0 \sin \varphi_s (2J_1(\varphi_m) \sin \omega_m t). \quad (8)$$

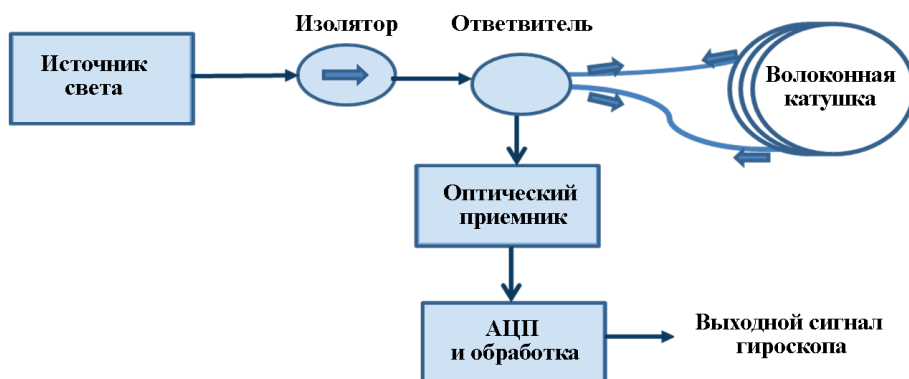


Рис. 9. Схема ИВОГ с разомкнутым контуром

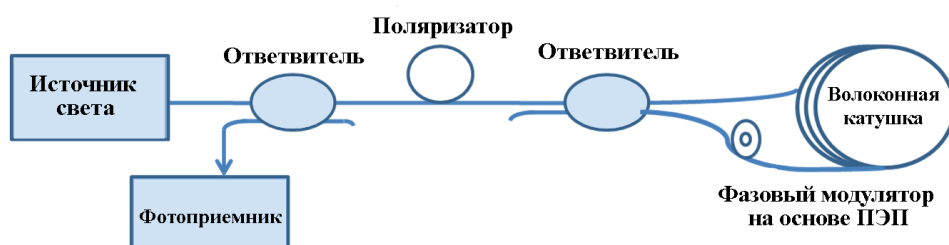


Рис. 10. Базовая схема ИВОГ с разомкнутым контуром и фазовой модуляцией за счет ПЭП [52]

Максимальная чувствительность ИВОГ достигается при $\varphi_m = 1,8$ рад (тогда как при косинусоидальной функции было $\varphi_m = \pi/2 \approx 1,5$) и $J_1(\varphi_m = 1,8) = 0,53$. Таким образом, полученный сигнал в состоянии покоя будет иметь вторую гармонику, а при вращении – основную частоту ω_m .

Диапазон измерений с синусоидальной модуляцией составляет всего от -90 до $+90^\circ$, что, в свою очередь, ограничивает динамический диапазон применения ИВОГ с разомкнутым контуром.

При большей скорости вращения требуется высокая точность в широком динамическом диапазоне. Эти два важных условия можно соблюсти за счет применения методов постобработки выходного сигнала разомкнутой схемы в приложениях, требующих ограниченного динамического диапазона и нелинейности масштабного коэффициента $0,1\%$ [51]. При другом подходе используется сервоуправляемая замкнутая схема или фазовое обнуление для работы в «нулевом» состоянии, что позволяет функционировать в широком динамическом диапазоне и с более высокой точностью масштабного коэффициента.

3.2. Конфигурация с замкнутым контуром

Сдвиг фазы Саньяка, полученный в разомкнутом контуре, служит сигналом погрешности измерений и компенсируется путем подачи обратно в фазовый модулятор, который генерирует дополнительную разность фаз в противоположном направлении. Таким образом, общий фазовый сдвиг приводится к нулю сервоуправлением, что обеспечивает хорошую чувствительность. Для обнуления фазы

сигнал обратной связи подается в дополнительный фазовый модулятор, отличный от модулятора смещения фазы. На рис. 11 показана базовая конфигурация ИВОГ с замкнутым контуром.

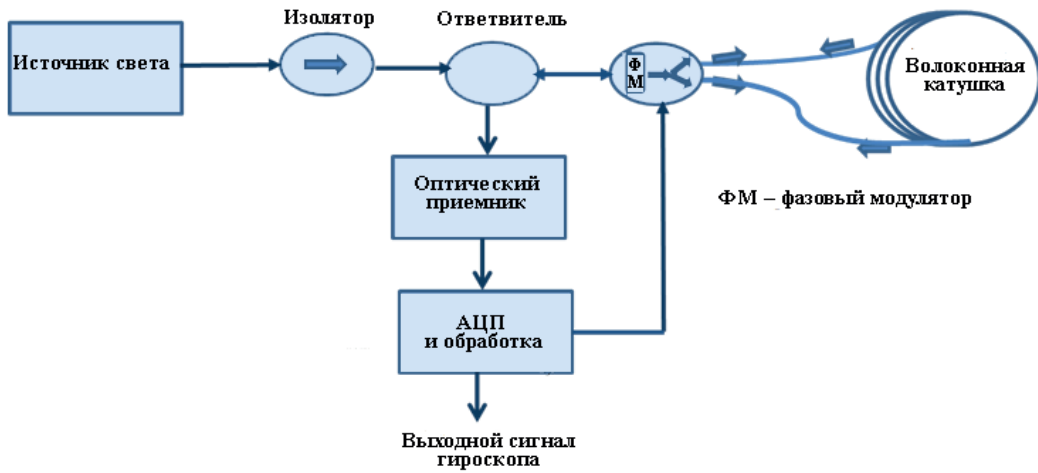


Рис. 11. Схема ИВОГ с замкнутым контуром

Здесь измеренный сигнал выполняет функцию сигнала обратной связи и обеспечивает линейную характеристику ИВОГ с высокой стабильностью, поскольку не зависит от детектированной оптической мощности. Измеренная скорость вращения [2], согласно уравнению (4), определяется следующим образом:

$$\Omega = -\frac{\lambda c}{2\pi LD} \Delta\varphi_{FB}, \quad (9)$$

где $\Delta\varphi_{FB}$ – фазовый сдвиг обратной связи. Этот компенсирующий фазовый сдвиг может быть получен посредством небольшого сдвига частоты Δf_{null} между встречными сигналами при прохождении их через волоконную катушку за время τ (с), задаваемого с помощью уравнения [53]

$$\Delta f_{null} = \varphi_s / 2\pi\tau, \quad (10)$$

где φ_s – сдвиг фазы Саньяка, рад. Простой способ введения этого нулевого частотного сдвига – использование акустооптических модуляторов [2], что приводит к нарушению стабильности системы. Решить эту проблему можно с помощью *serrodyne*-модуляции, преобразующей частоту сигнала за счет применения линейной фазовой модуляции во временном диапазоне [51, 53]. Фазовое изменение может быть как аналоговым, так и цифровым, причем второй вариант наиболее эффективен [53]. Таким образом, гироскоп оказывается всегда готовым к началу измерений (в том числе и при отсутствии вращения в начальный момент), что обеспечивает его максимальную чувствительность.

4. Параметры и показатели эффективности

Для любой инерциальной измерительной системы выбор гироскопа осуществляется на основе анализа набора параметров SWPaC (размер, вес, мощность и стои-

мость) и особенностей применения. К другим общим характеристикам относятся надежность, чувствительность, точность и устойчивость к внешним воздействиям.

В настоящей работе определяются и используются следующие параметры гироскопов [54, 55] в части измерения входной угловой скорости вращения и выходного сигнала:

- *масштабный коэффициент* – отношение изменения выходного сигнала гироскопа к изменению входной скорости вращения. Определяется по наклону графика зависимости выходного сигнала от входного путем линейной аппроксимации кривой. Нелинейность масштабного коэффициента обычно измеряется в процентах или в частях на миллион (ppm);
- *входной диапазон (скорости вращения)* – значения угловой скорости вращения, при которых обеспечиваются точностные характеристики гироскопа;
- *выходной диапазон* – произведение входного диапазона и масштабного коэффициента;
- *полный диапазон* – разница между максимальным и минимальным значениями входного диапазона;
- *разрешение* – минимальная угловая скорость вращения, которую может обнаружить гироскоп, обычно измеряется в $^{\circ}/ч$ или $^{\circ}/с$;
- *динамический диапазон* – отношение полного диапазона к разрешению, не имеет размерности. Его также можно измерить относительно максимального изменения угловой скорости, где наибольшая погрешность обуславливается дрейфом скорости вращения [56] и выражается в $^{\circ}/с$;
- *зона нечувствительности* – диапазон входных значений, при которых выходной сигнал гироскопа не меняется или меняется менее чем на 10% от ожидаемого изменения;
- *полоса пропускания* – диапазон частот, в пределах которого амплитуда колебаний, проходящих через устройство (гироскоп), слабо зависит от частоты, что обеспечивает передачу сигнала на этих частотах без его существенного искажения. В пределах полосы пропускания отношение амплитуды колебаний на выходе устройства к амплитуде колебаний на его входе не опускается ниже определенного уровня – обычно не более нескольких дБ от максимального значения [57];
- *время отклика* – время, необходимое выходному сигналу гироскопа для отображения изменения входной скорости вращения. Полоса пропускания и время отклика находятся из частотной характеристики гироскопа.

В навигации – сфере, где ВОГ наиболее востребованы, – класс точности и, соответственно, область применения определяются по следующим параметрам [55, 56]:

- *нестабильность смещения нуля* – двойная амплитуда изменений смещения нуля за долгий период, когда смещение нуля означает средний выходной сигнал гироскопа за определенный интервал времени; оба значения указываются в $^{\circ}/ч$ или $^{\circ}/с$;
- *случайное угловое блуждание (СУБ)* – показатель шума на выходе гироскопа, выражается в $^{\circ}/\sqrt{ч}$;
- *нелинейность масштабного коэффициента (НМК)* – разница между масштабными коэффициентами, измеренными при положительном и отрицательном входном сигнале, рассчитывается как доля масштабного коэффициента (ppm), измеренного во входном диапазоне.

С учетом этих характеристик выделяют потребительский, тактический и навигационный (инерциальный) классы точности гироскопов, требования к ним обобщены

в табл. 4 [2, 10, 55]. В соответствии с ними определяют конкретную сферу применения – от несложной бытовой электроники до высокочастотных навигационных систем.

Таблица 4

Требования к характеристикам гироскопов различных классов точности [2, 10, 55]

Параметр	Потребительский класс	Тактический класс	Промежуточный класс	Инерциальный класс
СУБ, $^{\circ}/\sqrt{ч}$	$>0,5$	$0,5-0,05$	$0,001-0,05$	$<0,001$
НСН, $^{\circ}/ч$	$10-1000$	$1-10$	$0,01-1$	$<0,01$
НМК, %	$0,1-1$	$0,01-0,1$	$0,001-0,01$	$<0,001$
Полный диапазон, $^{\circ}/ч$	$1,5 \times 10^5-3,6 \times 10^6$	$>1,8 \times 10^6$	$\sim 1,6 \times 10^6$	$>1,4 \times 10^6$
Полоса пропускания, Гц	>70	~ 100	~ 100	~ 100

В табл. 5 [56] приведены некоторые области применения и требуемые характеристики приборов. В целом ВОГ потребительского и тактического классов, обеспечивающие соответственно НСН $1^{\circ}/ч$ и $<1^{\circ}/ч$, подходят для автомобильных приложений и систем стабилизации. Устройства навигационного и стратегического класса с НСН $<0,1^{\circ}/ч$ и $<0,01^{\circ}/ч$ востребованы в авиации и подводной навигации соответственно.

Таблица 5

Показатели производительности гироскопов для различных приложений [56]

Технология	НСН, $^{\circ}/ч$	СУБ, $^{\circ}/\sqrt{ч}$	НМК, ppm	Приложения
ИВОГ	$0,1-1$	$\leq 0,05$	$10\,000$	Стабилизация снарядов и платформ
ИВОГ	$0,01-0,1$	$\leq 0,056$	≤ 100	Воздушная навигация
ИВОГ	$0,0001-0,01$	$\leq 0,0009$	≤ 10	Космическая навигация
ИВОГ	$0,0001-0,01$	$\leq 0,0002$	≤ 15	Подводная навигация
РВОГ	$0,1-1$	$0,00075$	–	Аэрокосмическая / оборонная промышленность
РВОГ	$1-30$	$\leq 0,1$	$\leq 10\,000$	Наведение боеприпасов и ракет

5. Достижения в области резонаторных волоконно-оптических гироскопов

РВОГ начали разрабатываться в конце 1980-х годов. Они оказались надежными и дешевыми по сравнению с ИВОГ, поскольку для его пассивного резонатора требуется короткое волокно. РВОГ содержит волоконный кольцевой резонатор, служащий

чувствительным элементом, оптическую систему возбуждения резонатора и оптоэлектронную систему съема данных для измерения разности частот. Принципы работы волоконного кольцевого резонатора основаны на фазовой и частотной модуляции и модуляции оптической длины пути, создаваемой пьезоэлектрическим преобразователем. Эти технологии вкпе с различными типами оптического возбуждения резонатора и системой обработки оптоэлектронных сигналов способны обеспечивать разные эксплуатационные характеристики приборов и требуют доработки.

Одна из конфигураций РВОГ с широкополосным источником, где *setrodynе*-модуляция обеспечивает независимость сдвига частоты от длины волны, нечувствительна к температуре и имеет долговременную НСН = 0,0063°/ч [58]. *Setrodynе*-модуляция создается путем линейного изменения фазы в модуляторе, для чего нужен фазовый модулятор с равномерной эффективностью в широкой полосе изменения фазы [2]; последнее возможно при применении интегральной оптики. Цифровая *setrodynе*-модуляция, создаваемая встроенными волноводными фазовыми модуляторами [59], использовалась для миниатюризации РВОГ и обеспечила снижение шума и нелинейных эффектов. В работе [60] описывается улучшенная модуляция с использованием фазового модулятора на базе LiNbO_3 , благодаря которой был расширен входной диапазон РВОГ и НМК снижена до 200 ppm. Другая возможность миниатюризации связана с применением кремниевой оптической конструкции для волоконного резонатора, обеспечивающей для катушки радиусом один дюйм НСН менее 0,1°/ч [61]. На рис. 12 показаны вероятные схемы РВОГ [62] на базе общей конфигурации с использованием источника излучения и чувствительного элемента.



Рис. 12. Схемы РВОГ

Конструктивные схемы РВОГ предусматривают высокую взаимность для повышения чувствительности, интегрированную оптику для снижения размеров устройства и применение специальных волокон – крученого (*spun*) и фотонно-кристаллического (ФКВ) для кольцевых резонаторов с целью повышения эффективности работы РВОГ.

НСН у резонаторного гироскопа с замкнутым контуром, содержащего источник усиленного спонтанного излучения (УСИ) и легированное эрбием волокно, составила $0,008^\circ/\text{ч}$ при волокне длиной 100 м и диаметре кольцевого резонатора 7,6 см [71]. В работе [72] описывается новая конструкция оптического резонаторного гироскопа с единым резонатором-ответвителем и встроенным отражателем, который формирует три полости для волн, распространяющихся по часовой стрелке и против нее, и гибридных волн. Такой гироскоп способен обнаруживать экстремально низкую скорость вращения за счет ослабления источников шума, вызванных эффектом Фабри–Перо, изменением эффективной отражающей способности волокна и температурным дрейфом нулевой точки.

Другая конструкция – на базе фазово-модулированной спектроскопии и оснащенная лазером с перестройкой частоты – предложена в [73], где в качестве альтернативного способа устранения основных погрешностей предлагается применить низкокогерентные источники света с высокой взаимностью. В [74] рассматривается комбинированный оптический источник на основе кремниевой фотоники, который был опробован в компактном РВОГ и показал НСН на уровне $0,15^\circ/\text{час}$ и СУБ = $0,007^\circ/\sqrt{\text{ч}}$. Авторы [75] в качестве резонатора использовали волны шепчущей галереи на кремниевом микродиске для повышения добротности (quality factor) прибора, уменьшения диаметра резонатора и, следовательно, разрешающей способности устройства. Оптические передаточные характеристики волоконного кольцевого резонатора, демонстрирующие необязательность применения кольца с высокой добротностью (finesse), приведены в [76].

Крученное волокно – это особый тип волокон, сохраняющих круговую поляризацию на протяжении всего контура передачи сигнала и обеспечивающих более эффективное подавление шума. Изменение двулучепреломления в зависимости от температуры составило всего $0,0302 \times 10^{-1}/^\circ\text{C}$ [77], тогда как для кольцевого резонатора с нормальной поляризацией эта величина была $4,8091 \times 10^{-1}/^\circ\text{C}$, что подтверждает температурную стабильность предложенного решения.

ФКВ обладают определенными преимуществами, обусловленными периодическим изменением показателя преломления. Они также могут быть использованы при разработке РВОГ. Некоторые из последних перечислены в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

Краткий обзор схем и методов разработки РВОГ

Схема / конфигурация	Методы	Производительность / потенциальные разработки
Волокна с воздушной сердцевинкой для волоконного кольцевого резонатора [78]	Антиотражательное покрытие и угловое расщепление одноодового волокна для соединения с волокном резонатора, чтобы поддерживать уровень потерь, вызванных отражениями при соединении, ниже установленных пределов	• Уменьшение дрейфа, вызванного эффектом Керра, и случайного поляризационного дрейфа, что приводит к СУБ = $0,055^\circ/\sqrt{\text{с}}$ и НСН = $2,5^\circ/\text{с}$ [78]; • Потенциальное улучшение за счет применения 19-ячеистого волокна с меньшим обратным рассеянием для обеспечения тактической точности

Схема / конфигурация	Методы	Производительность / потенциальные разработки
Конструкция с полым ФКВ [79, 80]	Однополяризационный резонатор с замкнутым контуром мультимодуляции, устранение нежелательных собственных состояний поляризации	Долговременная НСН составила $20^\circ/\text{ч}$ [79]
	Обнаружение сигнала методом фазовой манипуляции	Четырехкратное снижение дрейфа нуля и достижение НСН = $1,5^\circ/\text{ч}$ [80]
Конструкция резонатора с ФКВ	Фазовая модуляция смещенной пилообразной волны в диапазоне частот 100–600 Гц для подавления погрешностей от обратного отражения [81]	Повышение НСН до $5,9^\circ/\text{ч}$ [81]
Гибридная конструкция с сохраняющим поляризацию волокном и ФКВ	Близкий диаметр модового поля двух волокон для уменьшения потерь при сварке	Гибридная конструкция улучшает стабильность поляризации в 7 раз по сравнению с волоконным резонатором, НСН составляет $1,67^\circ/\text{ч}$ [82]
	Пространственное соединение с двойной линзой	Снижение потерь связи до 0,41 дБ для улучшения НСН [83]

В [62] представлен подробный обзор последних разработок в области РВОГ, их характеристик и точности. Недавно [84] была предложена новая конструкция с четырехчастотной пилообразной модуляцией, которая, согласно результатам моделирования, снижает НСН и НМК в 3 раза, что открывает возможность применения таких гироскопов в высокоточных навигационных приложениях. В [85] описываются связанные с РВОГ проблемы и перечисляются параметры, которые необходимо улучшить. Кроме того, поясняется, почему РВОГ не устанавливаются серийно в инерциальные измерительные блоки (ИИБ) или навигационные системы. Таким образом, актуальная на сегодняшний день задача – перейти от лабораторных исследований РВОГ к их коммерческому производству с учетом параметров SWPaC.

6. Прогресс в области исследований интерферометрических волоконно-оптических гироскопов

ИВОГ способны точно измерять скорость вращения, что делает их привлекательными для критически важных приложений, хотя по весу и размеру они больше, чем РВОГ. При этом, несмотря на все преимущества, при применении их в критически важных приложениях возникает немало проблем, связанных со стабильностью, точностью и температурно зависимой нелинейностью. Эти проблемы можно решить за счет выбора конфигурации, оптических источников, методов модуляции, типа оптоволокна, схемы намотки и способов обработки сигналов. Другая важная исследовательская задача состоит в том, чтобы минимизировать размер

устройства, поскольку длина волокна и схема намотки занимают значительную долю от общего объема устройства. Все эти факторы учитываются в следующих подразделах настоящей статьи. Подробный обзор достижений в сфере ИВОГ представлен в [72], где предложены методы шумоподавления, миниатюризации оптических и электронных модулей и решения на основе фотоники.

6.1. Типы конфигураций ИВОГ

Как уже говорилось в разделе 3, ИВОГ могут быть как с разомкнутым, так и с замкнутым контуром. Простая по конфигурации разомкнутая схема при измерении скорости вращения обеспечивает нелинейный отклик с ограничениями. Например, при применении более старой, полностью волоконной схемы [86] измеряемая скорость вращения составила 5×10^{-4} рад/с. Для улучшения параметров работы разомкнутого контура с простейшей структурой и двойной обратной связью были задействованы различные методы: алгоритм гармонического деления при цифровой обработке сигналов [87], стабилизация амплитудных колебаний скорости вращения и глубины модуляции смещения нуля [88], дискретная многоточечная демодуляция [89].

Затем была предложена конфигурация с замкнутым контуром, которая изучалась на предмет линейности, стабильности, а также перспектив повышения чувствительности и точности. В одной из работ ставится задача достичь ухота ИВОГ, обеспечивающего погрешность в определении координат на уровне 1 морской мили в месяц [90], и показана возможность достижения предельной точности с $\text{НСН} = 4,7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ/\text{ч}$ на интервале 38 дней. Некоторые схемы с разомкнутым и замкнутым контуром и их характеристики приведены в табл. 7. Конструкция с замкнутым контуром была оптимизирована за счет снижения веса системы на 8,3% и на основе анализа дерева неисправностей, построенного для космических приложений, повышения надежности с 2,3% до 55% в течение последующих 5 лет [100].

Анализ разомкнутых и замкнутых конфигураций и схем обработки сигналов при определении фазы вращения, индуцированной в ИВОГ, производился в [101] с использованием модели, разработанной в среде Simulink. В [102] предложено задействовать двухсердцевинное (dual core) оптоволокно, повышающее стабильность измерений сдвига фазы Саньяка независимо в двух сердцевинах и точность измерений скорости вращения при типичных уровнях шума. Осреднение по длине волны лазерного источника в замкнутой схеме и повышение контрастности интерференционных полос при больших размерах волоконной катушки понижают НМК до 0,38 ppm [103] и уменьшают нелинейность в 9,8 раз [104]. В работе [105] описывается подход к построению высокоточного ИВОГ для подводной навигации и связанные с ним трудности, отмечаются также различия в требованиях к системам навигации самолетов и наведения снарядов.

В [106, 107] предложен новый метод, предусматривающий использование для формирования фазового сдвига, который определяется интерферометром Саньяка как вращение, явления квантовой запутанности. Конструкция со светодиодным источником с длиной волны 850 нм и многомодовым волокном со ступенчатым показателем преломления, разработанная в [108], отличается повышенной устойчивостью к температуре и, следовательно, позволяет улучшить параметры приложений, востребованных в робототехнике и при бурении нефтяных скважин. В [109] описы-

ваются результаты мониторинга движения грунта, полученные с помощью ИВОГ с 2-километровым волокном, для предварительного прогноза землетрясений и извержений вулканов. Авторы [110] предлагают использовать инерциальную измерительную систему на основе ИВОГ для обслуживания железных дорог, а именно для измерения параметров пути, и демонстрируют его потенциал в соответствующих приложениях.

Таблица 7

Обзор конфигураций ВОГ с замкнутым и разомкнутым контуром

Тип конфигурации	Стратегия конструкции	Характеристики
Разомкнутый контур	Обработка сигнала с помощью фазовой автоподстройки частоты и цифровой демодуляции	Устранение флуктуаций интенсивности источника света и, следовательно, уменьшение НСН с 0,259 °/ч до 0,018 °/ч, СУБ с 0,031 °/√ч до 0,006 °/√ч и расширение динамического диапазона с $\pm 63^\circ/\text{с}$ до $\pm 360^\circ/\text{с}$ по сравнению с обычным методом [92]
	Конструкция с тонким волокном с D-образной эллиптической сердцевинной (Е-сердцевина) [93] и цифровой обработкой сигнала [94]	Волокна с Е-сердцевинной производства KVH Industries продемонстрировали низкие потери и высокую способность сохранять поляризацию [93] при одновременном обеспечении НСН $\leq 0,05^\circ/\text{ч}$ и СУБ $\leq 0,012^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ для тактических приложений
	Конструкция со встроенным поляризатором из волоконной решетки	При высоком коэффициенте затухания и надежности встроенного 40-миллиметрового поляризатора в разомкнутой схеме была продемонстрирована НСН менее 0,1°/ч [95]
Замкнутый контур	Конструкция на основе робастного алгоритма управления	При различных входных сигналах проанализировано влияние нелинейности и параметр обратной связи ИВОГ; было установлено, что оптимальный выбор параметра обратной связи обеспечивает НСН = 0,01 °/ч [33, 96]
	Одно- и трехосные конфигурации «Оптолинк» с интегральными оптическими компонентами	Линеаризация выходного сигнала посредством управления с обратной связью и понижение НСН до уровня ниже 0,01 °/ч [97, 98]
	Конфигурация с общим источником света с улучшенным алгоритмом комплексирования данных	Первичное подавление шума с улучшенными характеристиками, НСН достигает $2 \times 10^{-4}^\circ/\text{ч}$ [99]

6.2. Выбор оптических источников

ВОГ требуют эффективного оптического источника излучения, от которого зависят характеристики приборов. В самой ранней их версии источником служил гелий-неоновый лазер, позже его заменили на полупроводниковый диодный лазер (лазер на арсениде галлия повышает точность измерения скорости вращения Земли до $10^{-3}^\circ/\text{ч}$ [19]), а в последнее время используется суперлюминесцентный диод (СЛД). В [111] авторы исследовали характеристики СЛД при применении в ВОГ и добились стабильности центральной длины волны на уровне 0,6 нм. Одна из конфигураций ИВОГ – с легированным эрбием волоконным источником, накачиваемым

лазером с распределенной обратной связью (DFB-лазер), и одномодовым телекоммуникационным волокном – обеспечивает $\text{НСН} = 1,57 \text{ }^\circ/\text{ч}$ [112], что дает представление о требованиях к оптическим источникам. Хотя исследования в основном были нацелены на улучшение характеристик именно НСН и СУБ, анализ различных типов источников излучения (табл. 8) показал, что они способны значительно улучшать эти параметры устройства.

Т а б л и ц а 8

Оптические источники в ИВОГ

Тип источника	Исследуемые характеристики	Параметры гироскопа
Частотно-модулированный лазер Фабри–Перо [113]	Параметры ИВОГ в сравнении с усиленным спонтанным излучением	$\text{СУБ} = 0,09 \text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$, $\text{НСН} = 4,48 \text{ }^\circ/\text{ч}$ [113]
Лазер с внешней фазовой модуляцией [114]	Характеристики расширения спектра лазера и использование четырехпозиционной модуляции для обеспечения температурной стабильности	Снижение НСН на 66%, СУБ – на 62% и НМК до 0,38 ppm [114]
Сверхширокополосный источник света (SBS) с двумя широкополосными источниками. Один – на 1310 нм, другой – на 1550 нм [115]	Дисперсионные характеристики МИОС	$\text{НСН} = 8,848 \times 10^{-4} \text{ }^\circ/\text{ч}$ $\text{СУБ} = 1,7 \times 10^{-4} \text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ $\text{НМК} = 1,682 \text{ ppm}$ [115]
Источник, управляемый лазером накачки с одиночным обратным проходом [116]	Конструкция с усиленным спонтанным излучением с лазером накачки 976 нм	$\text{СУБ} = 0,013 \text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ при оптической мощности 10 мВт [116]
Широкополосный источник, легированный иттербием [117]. Длина волны 1030 нм, ширина спектра 15 нм, 150-метровая катушка из сохраняющего поляризацию волокна с квадрупольной намоткой	Характеристики фазового расширения	Четырехкратное снижение СУБ до $0,0083 \text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ [117]
Волоконный источник, легированный эрбием, с длинами волн накачки 980 нм и 1480 нм [118]	Анализ спектра, средней длины волны и выходной мощности	Более широкая полоса пропускания и стабильная средняя длина волны получены для накачки 1480 нм в обратном направлении [118], что подходит для использования в ИВОГ

При конструировании ИВОГ используется большой диапазон оптических источников – от низкокогерентных широкополосных СЛД до высококогерентных перестраиваемых лазеров. Исследования показали, что применение широкополосных источников позволяет улучшить результаты в части шума и характеристик, определяющих класс точности. Параметры оптических источников, такие как рабочая длина волны, полоса пропускания, спектральные характеристики, выходная мощность, потребляемая мощность и т.д., также оказывают большое влияние на работу ИВОГ. В [119, 120] на основе спектральных параметров и их температурной зависимости всесторонне исследованы и сопоставлены различные оптические источники, подходящие для ИВОГ. Показано, что выбор подходящего оптического источника имеет

решающее значение для улучшения характеристик и повышения эффективности применения ВОГ в конкретных приложениях. Это открывает широкие перспективы для дальнейших исследований в области разработок источников излучения для ИВОГ.

6.3. Методы модуляции

Оптическая фазовая модуляция позволяет повысить чувствительность и точность ИВОГ. Чтобы достичь высокой чувствительности и обеспечить идеальный контраст встречных лучей в состоянии покоя, необходимо добиться соответствующего смещения выходного сигнала [2]. Выходной сигнал со смещением описывается формулой

$$P = \frac{P_0}{2} (1 + \cos(\Delta\varphi_s + \varphi_b)), \quad (11)$$

где φ_b – фазовое смещение нуля, которое должно быть стабильным. При прямоугольной модуляции стабильное смещение нуля и наибольшая чувствительность достигаются при $\varphi_b = \pi/2$. Синусоидальная модуляция с адекватной синхронной демодуляцией обеспечивает максимальную чувствительность ИВОГ при $\varphi_b = 1,8$ рад [2].

Благодаря корректной модуляции смещения и демодуляции можно добиться наибольшей чувствительности гироскопа, при этом необходимо поддерживать высокую точность во всем динамическом диапазоне системы. С этой целью демодулированный сигнал смещения нуля подается в качестве сигнала обратной связи, чтобы нейтрализовать вызванную вращением фазу путем сведения общей разности фаз системы к нулю. Такая замкнутая обратная связь гарантирует стабильный линейный отклик с высокой точностью и чувствительностью.

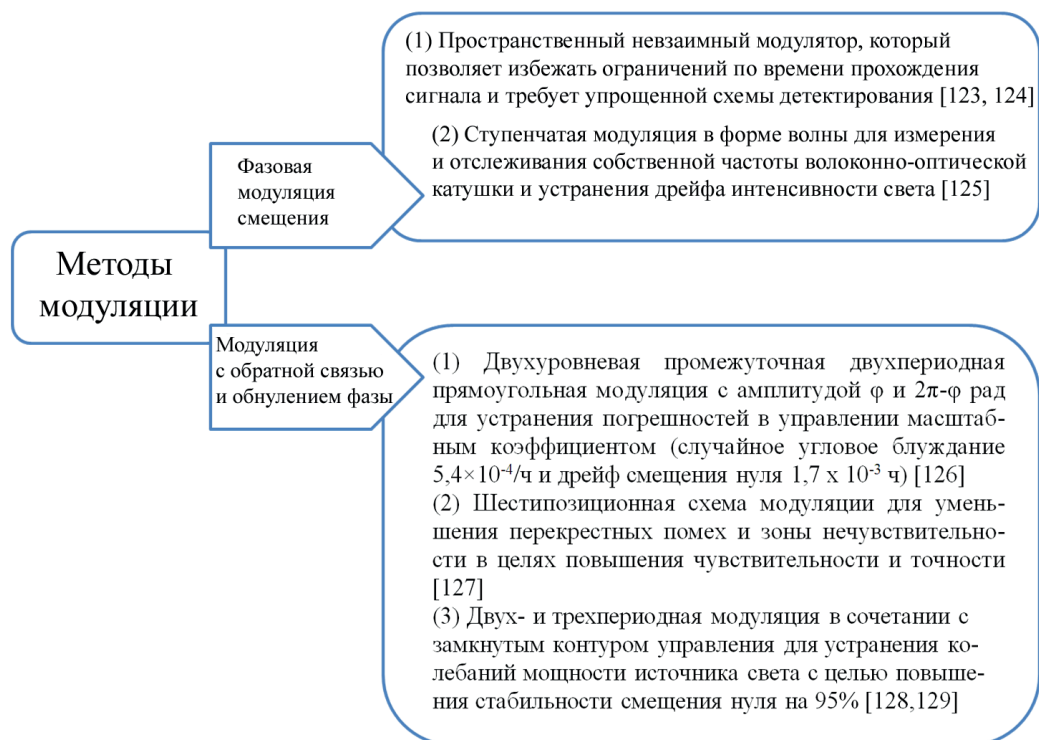


Рис. 13. Варианты методов модуляции, используемых в ИВОГ

Таким образом, взаимный фазовый модулятор для модуляции смещения и обратной связи, обнуляющий фазу Саньяка, играет важнейшую роль в улучшении характеристик ИВОГ. На замкнутую схему обработки сигнала с прямоугольной модуляцией был получен патент [121]. Что касается замкнутой схемы с пилообразной модуляцией [122] и нулевым периодом обратного хода, то, как было показано ранее, благодаря ей сохраняется постоянный масштабный коэффициент. Некоторые варианты методов фазовой модуляции приведены на рис. 13.

Интегрированные с Y-образным разветвителем фазовые модуляторы образуют МИОС, куда в том случае, если в катушке используется не одномодовое волокно с сохранением поляризации, помещается также поляризатор, чтобы исключить флуктуацию поляризации и поляризационный шум. Фазовые модуляторы значительно повышают качество работы ИВОГ, поскольку делают возможной взаимную конфигурацию и нейтрализуют фазовый сдвиг в разомкнутом контуре. В совокупности все это формирует замкнутый контур и повышает чувствительность ВОГ.

6.4. Конструкция ВОГ с фотонно-кристаллическими волокнами

ФКВ представляют собой микроструктурированные волокна, волноводные свойства которых зависят от расположения крошечных воздушных отверстий в сердцевине и вокруг нее по всей длине кристаллического волокна. Кристаллизованная структура имеет ряд преимуществ, к которым относятся адаптивность к внешней среде, неизменность оптических свойств, непрерывность одномодового распространения, высокое двулучепреломление, большая нелинейность и т.д. Все это позволило достичь существенного прогресса в разработке ИВОГ, улучшить их общие характеристики, а также уменьшить их размеры. Различные типы ФКВ, например с твердой сердцевинной, полые, а также их вариации, в частности волокна с металлической и поверхностной сердцевинной для сенсорных приложений, рассмотрены в [130].

Было обнаружено, что ФКВ с твердой сердцевинной (рис. 14, а) меньшего диаметра подходят для высокоточных приложений и стабилизации. Уменьшение количества воздушных отверстий в двух слоях упрощает структуру волокна и повышает его стабильность. В [131, 132] описывается миниатюрная модель ИВОГ, разработанная для космического аппарата, с сохраняющим поляризацию коротким ФКВ с четырьмя кольцевыми воздушными отверстиями, потери в котором составили порядка 1,5 дБ/км. В ходе экспериментов было продемонстрировано, что гироскоп, в котором используется волокно с полый сердцевинной (рис. 14, б), обладает такими достоинствами, как меньшее влияние эффектов Керра и Фарадея и меньшая зависимость от температуры, в отличие от устройств с обычными волокнами. Кроме того, чувствительность прибора была зафиксирована на уровне $2,7^\circ/\text{ч}$ при НСН в $2^\circ/\text{ч}$ [133].

В недавнем обзоре [141] приведены другие варианты улучшения характеристик оптических гироскопов с ФКВ (рис. 15). Представлен новый класс ФКВ с отверстиями разных размеров в сердцевине. При этом меньшие и большие отверстия во внутреннем слое сердцевинной обеспечивают более высокое двулучепреломление, а увеличенные отверстия во внешних слоях – низкие потери в волокне на уровне $2,8 \times 10^{-4}$ дБ/км. Исследования в области ФКВ для ИВОГ продолжаются.

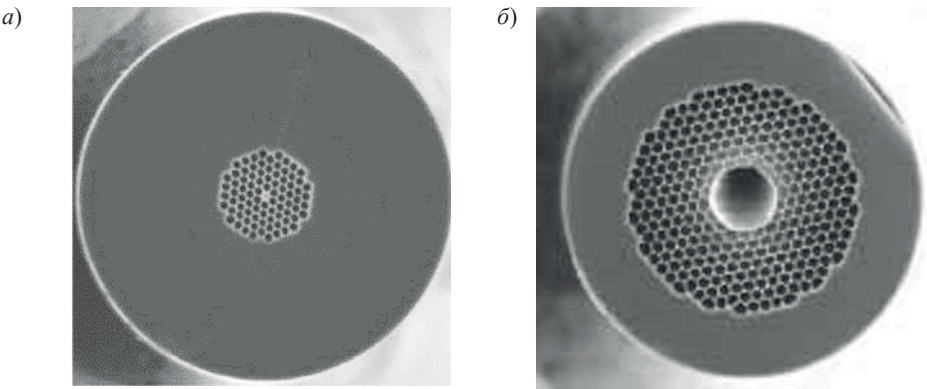


Рис. 14. ФКВ с твердой (а) и поллой (б) сердцевиной [134]



Рис. 15. Фотонно-кристаллические волокна для ВОГ

6.5. Шум и нелинейность

Развитие волоконно-оптических компонентов и оптоэлектронных устройств позволило улучшить характеристики ИВОГ в части влияния источников шума. Было всесторонне изучено влияние шумов, внешних по отношению к интерферометрической катушке, таких как относительный шум интенсивности источника излучения,

погрешность квантования при аналого-цифровом преобразовании данных, дробовой шум в фотоприемнике. В [131, 142, 143] рассматриваются методы подавления и снижения интенсивности шума за счет выбора оптического источника и применения алгоритмов вычитания и компенсации, устранения погрешности квантования при оцифровке в электронном блоке, повышения точности определения масштабного коэффициента путем оптимизации в модулях источника излучения и приемника.

В исследованиях, посвященных типам шумов, задействовался один источник света, общий для двух ИВОГ, чтобы получить сигналы в синфазном и дифференциальном режимах. С помощью алгоритма комплексирования были подавлены собственные шумы, а также другие внешние возмущения [99, 144], в результате чувствительность ИВОГ достигла 2×10^{-4} °/ч. Во многих работах рассматриваются внутренние источники погрешностей, в частности влияние температурного градиента на волокно, что приводит ко внутреннему напряжению или изменению показателя преломления – так называемому эффекту Шьюпа, фактору, имеющему важное значение для навигационных приложений. Работа устройства зависит также от погрешностей, вызванных обратным рассеянием и отражениями, оптическим эффектом Керра и магнитооптическими эффектами. Ниже представлен краткий обзор различных методик устранения или уменьшения погрешностей и их влияния на эксплуатационные характеристики гироскопов.

В [51] обсуждается прогресс в разработке ИВОГ с корректным контролем источников случайного шума и НСН. Девиация Аллана – действенный способ анализа гироскопических шумовых составляющих, которые можно аппроксимировать различными случайными процессами. В [145] путем анализа девиации Аллана подробно исследуются источники шума и связанные с ними параметры – НСН и СУБ – для гироскопов различных производителей с длиной волокна от 200 до 5000 м.

В [146] на экспериментальных образцах сравнивается масштабный коэффициент для замкнутой и разомкнутой конфигураций, при этом линеаризация в разомкнутой схеме была выполнена при помощи цифровой обработки. Погрешности, обусловленные поляризационной связью и шумом источника излучения, наиболее эффективно снижаются в ИВОГ с двойной поляризацией и четырехпортовым циркулятором [147]. В этой конфигурации используется катушка с длиной волокна 2 км и диаметром 14 см, достигнутый уровень НСН составляет $9,0 \times 10^{-5}$ °/ч и СУБ – $5,0 \times 10^{-5}$ °/√ч [147]. Важную роль играет используемый в системе четырехпортовый циркулятор, вносящий оптическую разность хода между исходящими и входящими волнами, чтобы избежать остаточной когерентной фазовой погрешности перед входом в приемник.

6.5.1. Эффект Шьюпа

К важным потенциальным преимуществам, которыми обладает ИВОГ, относятся также высокое разрешение и безотказная работа в течение длительного времени. Для надежных навигационных систем, востребованных во многих областях, всегда требуются высокоточные прецизионные гироскопы. Основной причиной ухудшения характеристик ИВОГ являются температурный дрейф, или эффект Шьюпа [148], и T-dot-эффект, вызванный температурным расширением волокна и изменением из-за этого показателя преломления по длине волокна [2]. Обусловленный температурой дрейф можно уменьшить, для чего необходимо добавить еще один буферный слой в

волоконную катушку, изменить ее геометрическую конфигурацию и воспользоваться различными типами намотки, методами модуляции в интегральной оптической схеме, специальными типами волокон и т.д.

Симметричная схема намотки волоконной катушки [2] эффективно снижает температурную зависимость при добавлении дополнительных буферных слоев [149]. Симметрия достигается путем намотки волокна от середины длины так, чтобы компенсировалось температурное воздействие в каждой половине катушки, см. [150]. Такая намотка показана на рис. 16. При дипольной намотке (слои чередуются), см. рис. 16, а, одна половина длины катушки представлена «плюсами», другая – «минусами», при этом тепловые колебания уменьшаются в N раз (N равно количеству слоев). При квадрупольной намотке (схемой +--+--+ на рис. 16, б) эффект Шьюпа уменьшается пропорционально квадрату количества слоев, т.е., когда количество слоев кратно четырем, тепловые колебания значительно уменьшаются.

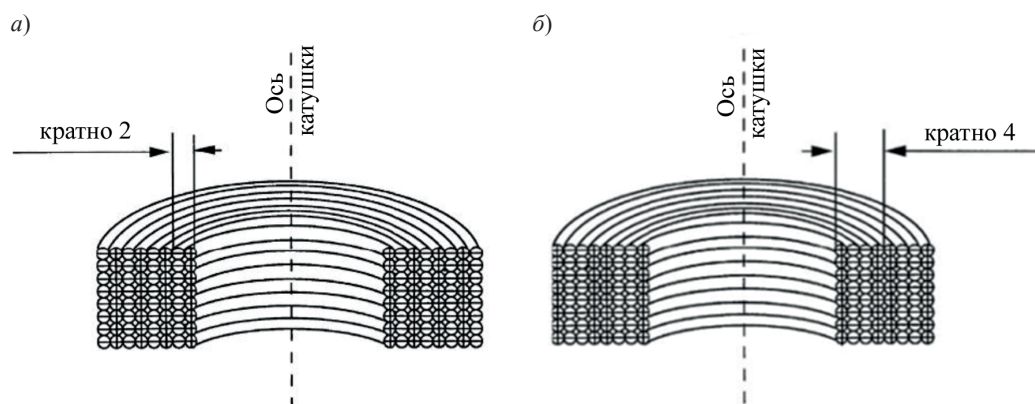


Рис. 16. Дипольная (а) и квадрупольная (б) намотки [2, 54]

В табл. 9 приведены результаты анализа параметров ИВОГ с различными схемами намотки [2, 150, 151, 152]. Для ИВОГ с диаметром катушки более 20 см, чувствительного к изменению температуры, выполнялся мониторинг дрейфа при различных изменениях температуры с использованием регрессионной модели опорных векторов. Для повышения качества моделирования применялась вариационная модовая декомпозиция. Выяснилось, что точность измерений улучшается на 86,51% при изменении температуры на ± 2 °С/мин и на 88,89% при изменении температуры в пределах ± 5 °С/мин [156].

В [157] предложен способ компенсации температурного дрейфа на основе рекуррентной нейронной сети, позволяющей получать данные об изменении температуры в реальном времени с использованием метода скользящего среднего. Метод показал более высокие точность измерений, стабильность и эксплуатационную эффективность, достаточные для оборонных и аэрокосмических приложений. Альтернативный метод на основе машинного обучения описан в [158]. Здесь на основе регрессионного метода опорных векторов формируются последовательности значений температуры с учетом погрешности, вызванной температурной инерцией. В работе [159], посвященной повышению температурной стабильности за счет применения сохраняющего поляризацию волокна типа Panda в различных волоконных катушках и при различных температурах, было получено значение СУБ = $0,001723$ °/√ч. В [160] про-

анализирован эффект Шьюпа и доказана необходимость равномерного распределения температуры по катушке и, следовательно, создания защитного слоя. В [161] рассматривается температурная зависимость h -параметра волокна в волоконных катушках с разными способами намотки.

Т а б л и ц а 9

Типы намотки катушек и их исполнение

Тип намотки	Метод анализа и параметры волокон	Направление исследований / улучшение параметров
Дипольный	Метод конечных элементов на катушке диаметром 10 см с волокном длиной 10 км	Влияние изменения температуры 0,5°/мин на смещение нуля – снижение точности до тактического уровня [153]
Квадрупольный	Моделирование распределения термических напряжений с использованием ступенчатых и параллельных линейных шаблонов	Уменьшение количества точек напряжения и сдвига Бриллюэна при помощи ступенчатой намотки [154]
	Аналитический расчет чувствительности к температурному воздействию при намотке волокна длиной 240 м в 24 слоя	Для определения качества намотки введен параметр температурной чувствительности асимптотической угловой погрешности [155]
Оккупольный	Тепловой невязанный фазовый сдвиг при использовании волокна длиной 1014 м, намотанного в 42 петли в 56 слоев	Снижение погрешности определения скорости примерно на 30–50% в условиях постоянной и переменной температуры [152]
Гексадекапольный	Анализ примерно 1 км волокна с сохранением поляризации, намотанного в 48 слоев по 80 витков в каждом	Снижение погрешности в измерении скорости в 40 раз и ее постоянство в диапазоне температур от –40°С до 60°С [150]

Исследования показывают, что конструкция катушки и длина волокна существенно влияют на характеристики ИВОГ, ввиду этого уменьшение длины волокна и упрощение схемы намотки сопряжены с определенными трудностями. Чем больше длина и сложнее схема намотки, тем лучше параметры гироскопа в части нелинейной зависимости от температуры. В то же время для конкретных приложений важна минимизация размеров устройства. Следующий раздел посвящен миниатюризации приборов посредством интегрирования элементов ИВОГ, акцент сделан на последних достижениях в этой области.

6.6. Интегральная оптика

Миниатюризация – важный аспект при разработке любого устройства, поскольку прокладывает путь к улучшению характеристик интегрированной структуры. ИВОГ создает определенные возможности для миниатюризации интегрированных систем, так как его размеры обусловлены длиной волокна и конструкцией катушки. Первым и наиболее простым шагом к интеграции может стать объединение источника света, приемников, ответвителей и фазовых модуляторов в интегрированную оптическую систему [162, 163], что позволит уменьшить размер, вес, объем и энергопотребление, а следовательно, и стоимость устройства.

В ВОГ интерферометрического типа луч проходит через поляризатор, Y-разветвитель и двойной электрооптический фазовый модулятор, а затем, будучи разделенным, подается в волоконную катушку, как показано на рис. 17.

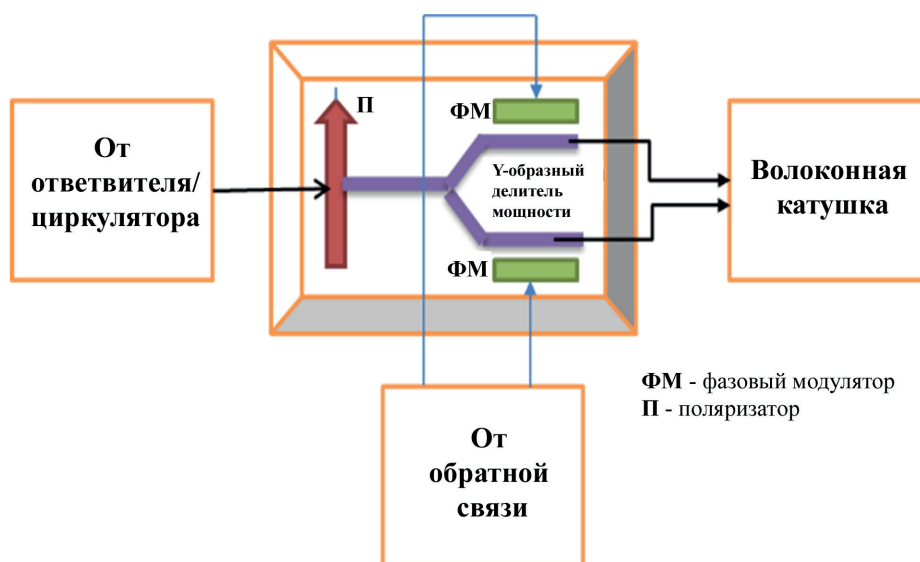


Рис. 17. МНОФ

В многофункциональной схеме эти компоненты объединены в кремниевом или ниобат-литиевом чипе, и можно сравнить характеристики таких устройств. Для уменьшения размеров ИВОГ предлагается использовать МНОФ на основе кремниевой фотоники. Схематически кремниевый чип Si-MНОФ в микроскопическом виде представлен в [164], где исследуются параметры его работы при использовании источника широкополосного излучения на основе СЛД 1550 нм при различном постоянном сдвиге фазы и двухтактной фазовой модуляции. Предлагается интегрированная структура катушки и показано, что вносимые потери могут быть снижены за счет параметров конструкции – радиуса изгиба и расстояния между соседними витками [165]. В [166, 167] рассматривается другой вариант интегрированного оптического модуля, в соответствии с которым на основе интегрированного оптического чипа реализован сверхмалый ИВОГ, чья точность близка к навигационному классу. Начальная НСН такого прибора составляет $0,018^\circ/\text{ч}$.

В работе [168] описывается катушка, сформированная на подложке из нитрида кремния, потери в волноводе в итоге составили 0,78 дБ/м. В [169] предложен интегрированный оптический чип на нитриде кремния с пассивным ответвителем и поляризатором, обеспечивающий НСН = $0,009^\circ/\text{ч}$. В [170] представлен трехосный ИВОГ, в котором решетчатый ответвитель для трех осей установлен на кристалле кварцевого волновода, что позволило миниатюризировать устройство. Долговременная НСН гироскопа составляет $<0,16^\circ/\text{ч}$ – этого достаточно для систем тактического класса.

Многосердцевинное волокно также востребовано при миниатюризации ВОГ без изменения длины оптического пути. Несколько доступных на рынке конструкций [171] представлено на рис. 18. Одна из конфигураций содержит пару устройств с развет-

влениями на входе/выходе (FanIn/ FanOut) для разделения нескольких сердцевин волокна. При длине многосердцевинного волокна 102,7 м и потерях 0,39 дБ/км зарегистрированная НСН составила 0,005 °/ч [173].

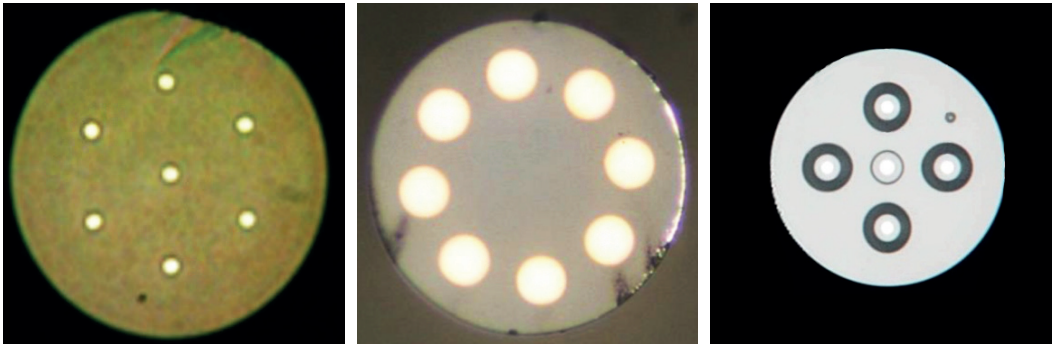


Рис. 18. Многосердцевинные волокна [171]

Интегрированные микрофотонные устройства с фотонными интегральными схемами (ФИС) на базе InGaAsP /InP и Si/SiN/SiO₂ также применяются с целью уменьшения объема ИВОГ. Сравнительный анализ показывает, что кремниевая катушка обеспечивает лучшие показатели НСН и СУБ, чем катушка из нитрида кремния. В 2014 году был построен волновод из нитрида кремния с интегрированными активными компонентами, позволивший сократить площадь устройства до менее 10 см². Более впечатляющие результаты были достигнуты в случае с ИВОГ на ФИС, подходящим для приложений промежуточного класса точности [173]. Подробный обзор стратегий миниатюризации на разных уровнях – волоконной катушки, оптических источников, пассивных и активных компонентов ИВОГ, не относящихся к волоконной катушке и системе обработки сигналов, а также варианты волноводной катушки на кристалле, как и решения на уровне чипа, представлены в [173]. Высокие тактические характеристики достигнуты с помощью ИВОГ на ФИС, так называемых фотонных гироскопов, с заявленными значениями СУБ = 0,59 °/ч/√Гц и НСН = 0,048 °/ч [174].

В [113, 175] описывается применение высокоскоростного частотно-модулированного лазера в интегрированных устройствах, а также алгоритм минимизации оптического пути для малоразмерного гироскопа, предназначенного для инерциальных боевых систем. Правильный выбор компонентов и методов интеграции позволяет построить уникальный ИВОГ, который будет отвечать требованиям оборонной и космической промышленности ближайшего будущего.

6.7. Приложения ВОГ

Как упоминалось ранее в разделе 4, благодаря более высокой точности ИВОГ занимают ключевое место во всех ИИБ для космических, наземных и морских навигационных приложений. Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) оснащаются ИИБ на основе ВОГ для решения задач навигации и позиционирования. В [176] описан интерферометрический ВОГ, запитанный дистанционно с помощью высоковольтного фотоэлектрического элемента на основе кремниевой фотоники с нулевым энергопотреблением от АНПА. Интеграция систем на кольцевом лазерном гироскопе Kerofit T-24 и на ИВОГ iXSea Phins III для роботизированных АНПА [177]

позволила повысить точность навигации более чем на 80% для высококачественного сбора данных. Другие изделия на основе ИВОГ Photonetics/IXsea и их применение в морских и космических приложениях описаны в [178]. Инерциальные системы IMU 1725 и IMU 1750 производства KVH на основе ВОГ продемонстрировали $HCH < 0,05^\circ/\text{ч}$ для беспилотных и пилотируемых воздушных, наземных, морских платформ – дистанционно управляемых аппаратов и систем для добычи полезных ископаемых [93]. В [179] рассмотрены инерциальные устройства на основе ИВОГ LN200, IMU 600, IMU 200 производства Northrop Grumman с $HCH < 0,01^\circ/\text{ч}$. В [100, 173] даны рекомендации по миниатюрным оптическим гироскопам и стратегиям их миниатюризации и оптимизации схем для автономных систем, спутников CubeSat, беспилотных летательных аппаратов и космических приложений.

В [180] представлен трехосный ИВОГ для позиционирования БПЛА, а в [181] – четырехосный ИВОГ с применением мультиплексирования для снижения веса и энергопотребления устройства. Кроме того, появились компактные ИВОГ с катушкой с волокном малой длины, при создании которых были задействованы передовые методы снижения шума, цифровой обработки сигналов и термокорпусирования, необходимые для систем стабилизации [182]. Устройство производства SA Photonics имеет $СУБ = 0,001^\circ/\sqrt{\text{ч}}$, $HCH < 0,004^\circ/\text{ч}$ [182] и используется для стабилизации оптического луча лидаров и дальней оптической связи в свободном пространстве, стабилизации и наведения антенны Ка-диапазона. Благодаря системе стабилизации на основе ИВОГ средней точности удалось повысить стабилизацию гравиметра [183] за счет выбора правильных параметров контура стабилизации. Несколько видов коммерческих ВОГ, их параметры и области применения перечислены в табл. 10.

Таблица 10

Характеристики некоторых современных гироскопов и их применение

Производитель	Технология	$HCH, ^\circ/\text{ч}$	$СУБ, ^\circ/\sqrt{\text{ч}}$	НМК, ppm	Приложения
ВОГ из состава Advanced Navigation, BOREAS D90 [184]	Цифровой ИВОГ с замкнутым контуром	0,001	0,001	10	Наземная и морская съемка, наведение антенн, навигация ТНПА/АНПА
ВОГ из состава Poseidon, BSD120 [185]	Цифровой замкнутый контур	0,01–0,05			Наземное позиционирование и ориентация, определение направления на север, ориентация авиационной навигационной системы и морские применения
Honeywell, серия HG2800 [186]	Замкнутый контур	0,05	$< 0,05$	150	Наведение и управление, стабилизация камеры/радара, прицеливание и позиционирование

Производитель	Технология	НСН, %/ч	СУБ, %/√ч	НМК, ppm	Приложения
Northrop Grumman, LN200HPS [187]	Твердотельный ИВОГ	0,15	0,01	50	Управление ориентацией космического аппарата, торможение и измерение тяги
Физоптика FU40-300-D1ES [188]	ИВОГ с разомкнутым контуром	≤0,5	≤0,02	≤300	Продвинутая навигация, стабилизация и управление платформами
Оптолинк TRS400 [189,190]	Миниатюрный ИВОГ с замкнутым контуром	≤0,01	≤0,01	200	Точное наведение и контроль высоты
Emcore EG120 [191]	ИВОГ с замкнутым контуром	≤1,0	≤0,04	≤250	Стабилизация платформ, БПЛА и орудий
Anello Photonics	Кремниевая фотоника, оптический гироскоп	≤0,5	≤0,05	1000	Навигация дронов в условиях отсутствия сигналов GPS
AnelloX3 [192]	Кремниевая фотоника, оптический гироскоп	≤0,5	≤0,05	1000	Навигация дронов в условиях отсутствия сигналов GPS
MostaTech VG091AMS [193]	ИВОГ с разомкнутым контуром	1	0,04	200	Скважинные измерения, визуализация, БПЛА, робототехника

Развитие и коммерциализация технологии ИВОГ [194] для бесплатформенных инерциальных навигационных систем началась с создания системы OCTANS компаний Photonetics, позже появились системы MARINS [195] и ASTRIX производства iXSea (iXBlue). В результате НСН была снижена до 15 мкград/ч, а СУБ – до 40 мкград/√ч. В настоящее время происходит переход от традиционных приложений к технологиям «умного города» и «умного океана» [196], что требует дальнейших усовершенствований ИВОГ. Разрабатываются экспериментальные образцы гироскопов на основе технологии цифровых двойников.

7. Перспективные направления

Всестороннее изучение рассматриваемой темы показало, что в части проектирования и миниатюризации ВОГ обладают огромным потенциалом. Применение замкнутой схемы позволяет уменьшить размеры гироскопа за счет укороченной катушки и миниатюризации интегральной оптики. Чем длиннее волокно, тем выше чувствительность устройства и тем меньше в нем источников погрешности, но при этом возникает проблема габаритов. Согласно исследованиям, для повышения класса точности требуется волокно длиной не менее одного километра. При сокращении его длины

до нескольких сотен метров и менее необходимо использовать волокно с сохранением поляризации или фотонно-кристаллическое, чтобы снизить влияние температурных изменений на стабильность смещения нуля в навигационных приложениях. В настоящее время все большее внимание привлекают широкополосные источники излучения, легированные редкоземельными элементами и имеющие управляемую накачку, которые более эффективно подавляют источники шума, вызванного неравномерной интенсивностью сигнала и остаточной поляризацией. Перспективными выглядят также методы фазовой модуляции с четырьмя или шестью состояниями.

С учетом нужд космической и морской навигации исследовательская задача заключается в разработке высокочувствительного гироскопа с очень низким смещением нуля – менее 10^{-3} – 10^{-4} град/ч. Как известно, основной причиной его возникновения является тепловое воздействие, и одним из решений этой проблемы может стать новый способ намотки волокна, к каковому относится, например, недавно предложенный гексадекапольный. К сожалению, всегда приходится искать компромисс между высокой эффективностью, размерами и стоимостью, и этот факт существенно затрудняет разработку прибора для высокоточной навигации.

Подводя итоги, отметим, что в целях повышения чувствительности и стабильности ВОГ дальнейшие исследования необходимо сосредоточить на следующих направлениях.

1. Исследования в области источников света, скорее всего, будут касаться вопросов интеграции лазерного источника с УСИ, многоволновых источников и расширения спектра лазерного источника для использования в ВОГ, а следовательно, для снижения факторов случайного углового блуждания и улучшения показателя «сигнал–шум».
2. Механизм управления усилением в контуре обратной связи в замкнутой схеме влияет на стабильность ВОГ, так что решение этой проблемы будет связано с методами фазовой модуляции с несколькими состояниями.
3. Для уменьшения габаритов устройства и решения задачи его интеграции необходимо кардинально сократить длину волокна до нескольких метров, объем намотки – до нескольких десятков мм³, а массу – до 50 г и менее; при этом необходимо учесть влияние температуры на волокно – это одна из важнейших проблем в навигационных приложениях.
4. Необходимо изучить, как распределяются температура и точки напряжения при различных способах намотки волокна, и предложить новый способ, чтобы сократить длину; решение этой задачи открывает многообещающие перспективы.
5. Внедрение лазерных источников на основе кремниевой фотоники, встроенных ответвителей, универсальных кремниевых интегральных схем, волноводов из ниобата лития (LiNbO₃) и т.д. позволит уменьшить габариты устройства, но главная задача все-таки заключается в повышении класса точности с тактического до навигационного и стратегического.
6. Использование фотонно-кристаллических волокон с твердой сердцевиной снижает потери и обеспечивает миниатюризацию приборов для космических технологий; ФКВ с поллой сердцевиной обладают большим потенциалом и требуют особого внимания.
7. Поскольку в тех областях, где не нужна высокая точность, применяются другие гироскопы, в частности МЭМС и ГПР, массовое производство которых достаточно

- бюджетно, необходимо повышать точность и стабильность характеристик ИВОГ за счет перспективных фотонных технологий. Целью аналогичных исследований может быть переход от лабораторных испытаний РВОГ к их массовому производству.
8. Внедрение интеллектуальных цифровых технологий при разработке гироскопов для морских робототехнических систем.

8. Заключение

Представлен широкий обзор исследований, посвященных разработке ВОГ, конечная цель которых – добиться сверхвысокой точности и чувствительности гироскопов и одновременно уменьшить их габариты таким образом, чтобы они были сопоставимы с МЭМС-устройствами. Наиболее сложной задачей при этом является снижение дрейфа нуля и случайного углового блуждания. Максимальная чувствительность зависит от конструктивных решений для различных элементов ВОГ. Интегральная оптика развивается в направлении миниатюризации, достаточной для создания ВОГ высочайшего класса точности. Для достижения поставленной цели все без исключения технологии должны рассматриваться как в различных комбинациях, так и в комплексе, а задача исследователя – предложить решение, которое будет востребовано в будущем.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конкурирующих финансовых интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на обзор, представленный в настоящей статье.

Благодарности

Обзорная статья написана по результатам научно-исследовательской работы, которая была выполнена в рамках программы Visvesvaraya PhD Министерства электроники и информационных технологий правительства Индии, реализуемой Digital India Corporation.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Hamza-Lup, F.**, *Kinesthetic learning-Haptic user interfaces for gyroscopic precession simulation*, 2019, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13336.44804>.
2. **Lefèvre, H.**, *The Fiber-Optic Gyroscope*, Artech House, 2022.
3. **Post, E.J.**, Sagnac effect, *Reviews of Modern Physics*, 1967, vol. 39, no 2, pp. 475–493.
4. **Wu, B., Yu, Y., Xiong, J., and Zhang, X.**, Silicon integrated interferometric optical gyroscope, *Scientific Reports*, 2018, no. 8(1), p. 8766, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27077-x>.
5. <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/sagnac-effect>.
6. **Perelyaev, S.E., Bodunov, B.P., and Bodunov, S.B.**, Solid-state wave gyroscope: A new-generation inertial sensor, *Proceedings of the 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, 2017, <https://doi.org/10.23919/ICINS.2017.7995651>.
7. <https://www.ericointernational.com>.
8. **Eshtewi, M.M.H. and Malek, H.M.A.**, Gyroscope technologies: an effective role in the mechanical & optical perspective, *Int. J. Eng. Res. Appl.*, 2020, www.ijera.com, vol. 10, no. 10, pp. 15–19, <https://doi.org/10.9790/9622-1010041519>.
9. <https://www.advancednavigation.com/tech-articles>.

10. Passaro, V.M., Cuccovillo, A., Vaiani, L., De Carlo, M., and Campanella, C.E., Gyroscope technology and applications: A review in the industrial perspective, *Sensors*, 2017, no. 17(10), p. 2284, <https://doi.org/10.3390/s17102284>.
11. Barbour, N. and Schmidt, G., Inertial sensor technology trends, *IEEE Sensors Journal*, 2002, no. 1(4), pp. 332–339, <https://doi.org/10.1109/7361.983473>.
12. Lawrence, A., *Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance, and Control*, Springer Science & Business Media, 2001.
13. Woodman, O.J., *An Introduction to Inertial Navigation*, University of Cambridge, 2007, <https://doi.org/10.48456/tr-696>.
14. Keskin, H., *Development of All Digital Interferometric Closed-Loop Fiber Optic Gyroscope with Ytterbium Doped Superfluorescent Fiber Source*, Ph.D. Thesis, 2023.
15. Untilov, A.A., Dranitsyna, E.V., and Egorov, D.A., Current state and development prospects of fiber-optic gyroscopes, *Proceedings of the 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, 2023, pp. 1–4, <https://doi.org/10.23919/ICINS51816.2023.10168323>.
16. <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/ring-laser>.
17. Lefevre, H.C., The fiber-optic gyroscope: Achievement and perspective, *Gyroscopy and Navigation*, 2012, no. 3, pp. 223–226, <https://doi.org/10.1134/S2075108712040062>.
18. Rabeendran, N., *A Study of Ring Laser Gyroscopes*, Master of Science Thesis, 2008. <https://dx.doi.org/10.26021/6771>.
19. Saxena, V.N., Fibre-optic gyroscope, *Defence Science Journal*, 1983, vol. 33, no. 2, pp. 177–181, <https://doi.org/10.14429/dsj.33.6172>.
20. Ayswarya, P.R., Pournami, S.S., and Ravi Nambiar, A survey on ring laser gyroscope technology, *International Journal of Computer Applications*, 2015, no. 116(2), pp. 25–27, <https://doi.org/10.5120/20310-2354>.
21. Fan, Zh., Baolun Yuan, Hui Luo, Zhongqi Tan, Suyong Wu, and Shaomin Hu., Random walk reduction in dithered ring laser gyroscope, *Optics Express*, 2023, vol. 31, no. 23, pp. 37959–37967, <https://doi.org/10.1364/OE.500916>.
22. Di Virgilio, A.D., Beverini, N., Carelli, G., Ciampini, D., Fuso, F. and Maccioni, E., Analysis of ring laser gyroscopes including laser dynamics, *The European Physical Journal*, 2019, vol. 79, <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7089-5>.
23. Wei, G., Yu, X. and Long, X., Novel approach for identifying Z-axis drift of RLG based on GA-SVR model, *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2014, vol. 25, no. 1, pp. 115–121, <https://doi.org/10.1109/JSEE.2014.00013>.
24. Maccioni, E., Beverini, N., Carelli, G., Di Somma, G., Di Virgilio, A., and Marsili, P., High sensitivity tool for geophysical applications: A geometrically locked ring laser gyroscope, *Applied Optics*, 2022, vol. 61, no. 31, pp. 9256–9261, <https://doi.org/10.1364/AO.469834>.
25. Wei, Zou, Yao, H., Hu, Lin., and Zi, Xue, New application and research of ring laser gyroscope in the field of angle metrology, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, <https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3449940>.
26. <https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/products/navigation-and-sensors/accelerometers-and-gyroscopes/gg1320an-digital-ring-laser-gyroscope>.
27. Lefèvre, H.C., The fiber-optic gyroscope, a century after Sagnac's experiment: The ultimate rotation-sensing technology?, *Comptes Rendus Physique*, 2014, vol. 15, no. 10, pp. 851–858, <https://doi.org/10.1016/j.crh.2014.10.007>.
28. Nayak, J., and Pinnoji, P.D., Advanced optical gyroscopes, *Proceedings of the IEEE Workshop on Recent Advances in Photonics (WRAP)*, 2013, <https://doi.org/10.1109/WRAP.2013.6917717>.
29. <https://www.databridgemarketresearch.com/>.
30. <https://www.futuremarketinsights.com/>.
31. Zhao, Sh., Liu, Q., Liu, Y., Ma, H., and He, Z., Navigation-grade resonant fiber-optic gyroscope using ultra-simple white-light multibeam interferometry, *Photonics Research*, 2022, vol. 10, no. 2, <https://doi.org/10.1364/PRJ.443496>.
32. Jin, X., Lin, Y., Lu, Y., Ma, H., and Jin, Z., Short fiber resonant optic gyroscope using the high-frequency Pound–Drever–Hall technique, *Applied Optics*, 2018, vol. 57, no. 20, pp. 5789–5793, <https://doi.org/10.1364/AO.57.005789>.
33. Yan, Jingtao, Lijun Miao, Min Chen, Tengchao Huang, Shuangliang Che, and Xiaowu Shu, Research on the feedback control characteristics and parameter optimization of closed-loop fiber optic gyroscope, *Optik*, 2021, vol. 229, 166298, <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166298>.
34. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA081649>.

35. Bergh, R., Lefevre, H., and Shaw, H., An overview of fiber-optic gyroscopes, *Journal of Lightwave Technology*, 1984, vol. LT-2, no. 2, pp. 91–107.
36. Maslov, A.A., Maslov, D.A., Ninalalov, I.G., and Merkuryev, I.V., Hemispherical resonator gyros (An overview of publications), *Gyroscopy and Navigation*, 2023, no. 14, pp. 1–13, <https://doi.org/10.1134/S2075108723010054>.
37. Liu, Y., Shi, M., and Wang, X., Progress on atomic gyroscope, *Proceedings of the 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, 2017, <https://doi.org/10.23919/IC-INS.2017.7995640>.
38. Izmailov, E.A., Kolesnik, M.M., Osipov, A., and Akimov, A., Hemispherical resonator gyro technology. Problems and possible ways of their solutions, *Proceedings of the 6th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg, 1999.
39. Qi, W., Xie, W., Xi, B., Sun, Y., and Yi, G., Rate integrating hemispherical resonator gyroscope detection error analysis and compensation, *IEEE Sensors Journal*, 2023, vol. 23, no. 7, pp. 7068–7076, <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3246044>.
40. Xu, Zeyuan, Boqi Xi, Guoxing Yi, and Danwei Wang, A novel model for fully closed-loop system of hemispherical resonator gyroscope under force-to-rebalance mode, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, vol. 69, no. 12, pp. 9918–9930, <https://doi.org/10.1109/TIM.2020.3005282>.
41. Maslov, A.A., Maslov, D.A., and Merkuryev, I.V., Nonlinear effects in the dynamics of HRG with flat electrodes, *Gyroscopy and Navigation*, 2023, vol. 14, pp. 320–327, <https://doi.org/10.1134/S2075108724700044>.
42. Shi, Y., Xi, X., Li, B., Chen, Y., Wu, Y., Xiao, D., Wu, X., and Lu, K., Micro hemispherical resonator gyroscope with teeth-like tines, *IEEE Sensors Journal*, 2021, vol. 21, no. 12, pp. 13098–13106, <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3065818>.
43. <https://www.northropgrumman.com/what-we-do/mission-solutions/assured-navigation/lr-450-inertial-measurement-unit-imu>.
44. Zhang, K., Zhao, N., and Wang, Y., Closed-loop nuclear magnetic resonance gyroscope based on Rb-Xe, *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, no. 1, p. 2258, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59088-y>.
45. Larsen, M. and Bulatowicz, M., Nuclear magnetic resonance gyroscope: For DARPA's micro-technology for positioning, navigation and timing program, *Proceedings of the IEEE Int. Frequency Control Symp.*, 2012, <https://doi.org/10.1109/FCS.2012.6243606>.
46. Rozelle, D.M., The hemispherical resonator gyro: From wineglass to the planets, *Advances in the Astronautical Sciences, Proceedings of the 19th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting*, 2009, vol. 134, pp. 1157–1178.
47. Huang, W., Liu, Y.X., He, Y., Huo, L.J., Wang, X.F., and Wang, W., The influences of cell's temperature characteristic on the performance of nuclear magnetic resonance gyroscope, *Proceedings of the DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*, 2020, pp. 1–15, <https://doi.org/10.1109/ISS50053.2020.9244889>.
48. Smith, R.B. and Weyrauch, J.R., Gyroscopes: current and emerging technologies, *Proceedings of the Kinematic Systems in Geodesy, Surveying, and Remote Sensing: Symposium*, Alberta, Canada, 1991, no. 107, pp. 59–69.
49. Perelyaev, S.E., Current state of wave solid-state gyroscopes. Development prospects in applied gyroscopy, *Proceedings of the 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, 2023, pp. 1–4, <https://doi.org/10.23919/ICINS51816.2023.10168310>.
50. Jeanroy, A., Grosset, G., Goudon, J.C., and Delhay, F., HRG by Sagem from laboratory to mass production, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems*, 2016, pp. 1–4, <https://doi.org/10.1109/ISISS.2016.7435530>.
51. Liu, R.Y. and Adams, G.W., Interferometric fiber-optic gyroscopes: a summary of progress, *Proceedings of the IEEE Symposium on Position Location and Navigation. A Decade of Excellence in the Navigation Sciences*, 1990, pp. 31–35, <https://doi.org/10.1109/PLANS.1990.66153>.
52. Merlo, S., Norgia, M., and Donati, S., Fiber gyroscope principles, *Handbook of Fibre Optic Sensing Technology*, John Wiley & Sons, Ltd., Hoboken, 2000, pp. 1–23.
53. Culshaw, B., The optical fibre Sagnac interferometer: An overview of its principles and applications, *Measurement Science and Technology*, 2005, vol. 17, no. 1, <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/1/R01>.
54. <https://ieeexplore.ieee.org/iel7/8863797/8863798/08863799.pdf>, IEEE Std 528-2019.
55. Armenise, M.N., Ciminelli, C., Dell'Olio, F., and Passaro, V.M.N., *Advances in Gyroscope Technologies*, Springer Berlin, Heidelberg, 2011, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-15494-2>.

56. Menéndez, R.J.P., IFOG and IORG gyros: A study of comparative performance, *Gyroscopes – Principles and Applications*, Xuye Zhuang and Lianqun Zhou, Ed., IntechOpen, 2019, <https://doi.org/10.5772/intechopen.89957>.
57. https://old.bigenc.ru/technology_and_technique/text/3155778.
58. Hu, J., Liu, S., Liu, L., and Ma, H., Closed-loop resonant fiber-optic gyroscope with a broadband light source, *Journal of Lightwave Technology*, 2023, vol. 41, no. 18, pp. 6088–6093, <https://doi.org/10.1109/JLT.2023.3270443>.
59. Hotate, K. and Harumoto, M., Resonator fiber optic gyro using digital serrodyne modulation, *Journal of Lightwave Technology*, 1997, vol. 15, no. 3, pp. 466–473, <https://doi.org/10.1109/50.557562>.
60. Jin, Z., Yu, X., and Ma, H., Closed-loop resonant fiber optic gyro with an improved digital serrodyne modulation, *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 22, pp. 26578–26588, <https://doi.org/10.1117/12.2026050>.
61. Sanders, G.A., Strandjord, L.K., Wu, J., Williams, W., Smiciklas, M., Salit, M., Narayanan, C., and Qiu, T., Development of compact resonator fiber optic gyroscopes, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*, 2017, pp. 168–170, <https://doi.org/10.1109/ISISS.2017.7935657>.
62. Wang, Z., Wang, G., Kumar, S., Marques, C., Min, R., and Li, X., Recent advancements in resonant fiber optic gyro – A review, *IEEE Sensors Journal*, 2022, vol. 22, no. 19, pp. 18240–18252, <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3195502>.
63. Geng, J., Liu, Y., Zhao, S., and Zhang, Y., Resonant micro-optical gyro based on self-injection locking, *Optics Express*, 2020, vol. 28, no. 22, pp. 32907–32915, <https://doi.org/10.1364/OE.405974>.
64. Wang, Z., Wang, G., Gao, W., and Yu, C., Suppression of Kerr-effect induced error in resonant fiber optic gyro by a resonator with spun fiber, *Optics Express*, 2021, vol. 29, no. 13, pp. 19631–19642, <https://doi.org/10.1364/OE.424987>.
65. Wang, Z., Wang, G., Miao, W., Gao, W., and Yu, C., Closed-loop method based on Faraday effect in resonant fiber optic gyro employing a low coherence-noise resonator, *Journal of Lightwave Technology*, 2021, vol. 39, no. 21, pp. 6994–7000, <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3108005>.
66. Hotate, K. and Kurakake, T., Manner to reduce the drift due to polarization fluctuation in a resonator fiber optic gyro composed of a single-mode fiber, *Proceedings of the SPIE Fiber Optic and Laser Sensors XI*, 1994, vol. 2070, <https://doi.org/10.1117/12.169906>.
67. Sanders, G.A., Taranta, A., Narayanan, C., et al., Hollow-core resonator fiber optic gyroscope using nodeless anti-resonant fiber, *Optics Letters*, 2021, vol. 46, no. 1, pp. 46–49, <https://doi.org/10.1364/OL.410387>.
68. Sanders, G.A., Strandjord, L., Williams, W., Benser, E., Ayotte, S., and Costin, F., Improvements to signal processing and component miniaturization of compact resonator fiber optic gyroscopes, *Proceedings of the DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*, 2018, pp. 1–22, <https://doi.org/10.1109/Inertial-Sensors.2018.8577190>.
69. Ma, H., Xu, C., Mao, H., and Jin, Z., Laser frequency noise limited sensitivity in a resonator optic gyroscope, *OECC 2010 Technical Digest*, Sapporo, Japan, 2010, pp. 706–707.
70. Jiao, H., Feng, L., Wang, K., Liu, N. and Yang, Z., Analysis of polarization noise in transmissive single-beam-splitter resonator fiber optic gyro based on hollow-core photonic-crystal fiber, *Optics Express*, 2017, vol. 25, no. 22, pp. 27806–27817, <https://doi.org/10.1364/OE.25.027806>.
71. Liu, S., Hu, J., Liu, Lu, Liu, Q., Ma, H., and He, Z., Closed-loop resonant fiber-optic gyroscope based on a broadband source, *Proceedings of the 20th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOCN)*, 2022, pp. 1–3, <https://doi.org/10.1109/ICOCN55511.2022.9901145>.
72. Srivastava, S., Rao D.S., S., and Nandakumar, H., Novel optical gyroscope: proof of principle demonstration and future scope, *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, <https://doi.org/10.1038/srep34634>.
73. Venediktov, V.Yu., Filatov, Yu.V., and Shalymov, E.V., State-of-the-art optical resonator gyroscopes, *Gyroscopy and Navigation*, 2023, vol. 14, pp. 27–35, <https://doi.org/10.1134/S207510872301008X>.
74. Smiciklas, M., Sanders, G., Strandjord, L., et al., Development of a silicon photonics-based light source for compact resonator fiber optic gyroscopes, *Proceedings of the DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*, 2019, pp. 1–12, <https://doi.org/10.1109/ISS46986.2019.8943703>.
75. Amrane, T., Jager, J.-B., Jager, T., Calvo, V., and Léger, J.-M., Towards a fully integrated optical gyroscope using whispering gallery modes resonators, *Proceedings of the International Conference on Space Optics – ICSSO 2014*, vol. 10563, 2017, <https://doi.org/10.1117/12.2304206>.
76. Heebner, J.E., Wong, V., Schweinsberg, A., Boyd, R.W., and Jackson, D.J., Optical transmission characteristics of fiber ring resonators, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, vol. 40, no. 6, pp. 726–730, <https://doi.org/10.1109/JQE.2004.828232>.

77. Zhang, Y., Wang, Z., Wang, G., Yu, F., Zhang, B., and Yang, F., Polarization stability of spun fiber resonator for resonant fiber optic gyro, *IEEE Sensors Journal*, 2023, vol. 23, no. 14, pp. 15644–15651, <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3283590>.
78. Terrel, M.A., Dignonnet, M.J.F, and Fan, S., Resonant fiber optic gyroscope using an air-core fiber, *Journal of Lightwave Technology*, 2012, vol. 30, no. 7, pp. 931–937, <https://doi.org/10.1109/JLT.2011.2177959>.
79. Jiao, H., Feng, L., Liu, N., and Yang, Z., Improvement of long-term stability of hollow-core photonic-crystal fiber optic gyro based on single-polarization resonator, *Optics Express*, 2018, vol. 26, no. 7, pp. 8645–8655, <https://doi.org/10.1364/OE.26.008645>.
80. Jiao, H., Sun, D., Wang, L., Li, X., Feng, C., and Feng, L., Detection method of resonant fiber optic gyroscope with hollow-core photonic crystal fiber based on phase-shift keying modulation, *Journal of Lightwave Technology*, 2024, vol. 42, no. 6, pp. 2151–2158, <https://doi.org/10.1109/JLT.2023.3332736>.
81. Shang, K., Lei, M., Fang, Y., Yu, H., and Zhang, L., Resonator photonic crystal fiber optic gyro with back-reflection error suppression using biased sawtooth wave modulation technology, *Optical Fiber Technology*, 2020, vol. 57, article id. 102234, <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102234>.
82. Yi, L., Li, H., Ma, H., and Ma, L., Performance improvement of a resonant fiber optic gyroscope with a hybrid photonic crystal fiber ring resonator, *Applied Optics*, 2019, vol. 58, no. 27, pp. 7424–7429, <https://doi.org/10.1364/AO.58.007424>.
83. Wen, F., She, X., Shen, H., Huang, F., Bi, R., Chen, K., Chen, X., and Shu, X., Ring resonator of hollow-core photonic crystal fiber based on spatial coupling scheme, *Journal of Lightwave Technology*, 2023, vol. 41, no. 16, pp. 5468–5474, <https://doi.org/10.1109/JLT.2023.3263293>.
84. Wu, F., Li, J., Lan, S., Yan, Bo, Zhou, J., and Yue, Y., Performance improvement of white-light-driven resonant fiber optic gyroscope using four-frequency sawtooth wave modulation technology, *Optics Communications*, 2024, vol. 550, article id. 129827, <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2023.129827>.
85. Mahudapathi, S., Nandan, S.R, R. G., and Srinivasan, B., The challenges and opportunities for performance enhancement in resonant fiber optic gyroscopes, *Sensors*, 2025, vol. 25, no. 1, <https://doi.org/10.3390/s25010223>.
86. Khan, M.H., and Ramakrishna, C., Open loop fiber optic gyroscope: A technical note, *Defence Science Journal*, 1996, vol. 46, no. 4, pp. 283–288, <https://doi.org/10.14429/dsj.46.4091>.
87. Gronau, Y. and Tur, M., Digital signal processing for an open-loop fiber-optic gyroscope, *Applied Optics*, 1995, vol. 34, no. 25, pp. 5849–5853, <https://doi.org/10.1364/AO.34.005849>.
88. Kurbatov, A.M., New methods to improve the performance of open and closed loop fiber-optic gyros, *Gyroscopy and Navigation*, 2015, vol. 6, pp. 207–217, <https://doi.org/10.1134/S2075108715030098>.
89. Chen, L., Huang, Z., Mao, Y., Jiang, B. and Zhao, J., Digital control and demodulation algorithm for compact open-loop fiber-optic gyroscope, *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 3, <https://doi.org/10.3390/s23031473>.
90. Paturel, Y., Honthaas, J., Lefèvre, H., and Napolitano, F., One nautical mile per month fog-based strapdown inertial navigation system: A dream already within reach?, *Gyroscopy and Navigation*, 2014, vol. 5, pp. 1–8, <https://doi.org/10.1134/S207510871401009X>.
91. Zhao, L., Research on modeling and control of closed-loop fiber optic gyroscope, *Proceedings of the 2021 International Conference on Signal Processing and Machine Learning (CONF-SPML)*, 2021, pp. 15–20, <https://doi.org/10.1109/CONF-SPML54095.2021.00012>.
92. Wang, Q., Yang, C., Wang, X., and Wang, Z., All-digital signal-processing open-loop fiber-optic gyroscope with enlarged dynamic range, *Optics Letters*, 2013, vol. 38, no. 24, pp. 5422–5425, <https://doi.org/10.1364/OL.38.005422>.
93. Napoli, J., and Ward, R., Two decades of KVH fiber optic gyro technology: From large, low performance FOGs to compact, precise FOGs and FOG-based inertial systems, *Proceedings of the DGN Inertial Sensors and Systems (ISS)*, 2016, p. 45.
94. Emge, S., Monte, T., Brunner, J., Rossi, J., Miller, R., and Ganesan, K., Advances in open-loop FOG sensors, *Optical Fiber Sensors, OSA Technical Digest (CD)* (Optica Publishing Group, 2006), paper MC3, <https://doi.org/10.1364/OFS.2006.MC3>.
95. Lin, C., Mao, Y., He, P., Wang, H., Jiang, B., and Zhao, J., Compact and high-reliability fiber-optic open-loop gyroscope enabled by an in-fiber polarizer, *Optics Express*, 2023, vol. 31, no. 3, pp. 4803–4811, <https://doi.org/10.1364/OE.480935>.
96. Li, H., Cui, L., Lin, Z., and Zhang, C., Analysis and optimization of dynamic measurement precision of fiber optic gyroscope, *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, vol. 3, <https://doi.org/10.1155/2013/265895>.

97. Prilutskii, V.E., Ponomarev, V.G., Marchuk, V.G., et al., Interferometric closed-loop fiber optic gyroscopes with linear output, *Proceedings of the 11th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, 2004.
98. Korkishko, Yu.N., Fedorov, V.A., Prilutskii, V.E., Ponomarev, V.G., Morev, I.V., and Kostritskii, S.M., Interferometric closed-loop fiber-optic gyroscopes, *Proceedings of the Third Asia Pacific Optical Sensors Conference*, SPIE, 2012, vol. 8351, <https://doi.org/10.1117/12.912937>.
99. Wang, W., Zhu, L., Huang, H., Chen, Y., et al., Improved fusion algorithm for fiber-optic gyroscope: suppressing intrinsic noise and environmental disturbances, *Journal of Lightwave Technology*, 2024, vol. 42, no. 16, pp. 5775–5785.
100. Ma, K., Song, N., Jin, J., He, J., and Zio, E., Configuration optimization in miniature interferometric fiber-optic gyroscopes for space application, *IEEE Sensors Journal*, 2020, vol. 20, no. 13, pp. 7107–7117, <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2977584>.
101. Harish Babu, G., Venkata Anuhya, A., and Venkatram, N., Digital signal processing scheme for open loop and closed loop IFOG using MATLAB/SIMULINK, *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, vol. 9, no. 11, pp. 1–10, <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i11/86935>.
102. Milikov, E.A., Zemlyakov, V.V., Anisimov, P.S., and Gao, J., A novel dual-core fiber-optic gyroscope with independent rotation rate measurements in different cores of a dual-core optical fiber, *Optoelectronics Letters*, 2024, vol. 20, pp. 671–675, <https://doi.org/10.1007/s11801-024-3251-x>.
103. Liu, Y., Yan, J., Tan, Y. and Chen, X., Influence of the average wavelength on the scale factor stability of interferometric fiber optic gyroscope, *Applied Optics*, 2024, vol. 63, no. 19, pp. F53–F58, <https://doi.org/10.1364/AO.522560>.
104. Deng, B., Song, N., Wang, X., and Xu, H., Impact of interference fringe visibility changes on closed-loop IFOGs operating across multiple fringes, *Optics & Laser Technology*, 2025, vol. 182, Part A, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.112045>.
105. Heckman, D.W. and Baretela, M., Interferometric fiber optic gyro technology (IFOG), *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2000, vol. 15, no. 12, pp. 23–28, <https://doi.org/10.1109/62.891976>.
106. Zhao, W., Tang, X., Guo, X., Li, X., and Ou, Z.Y., Quantum entangled Sagnac interferometer, *Applied Physics Letters*, 2023, vol. 122, no. 6, <https://doi.org/10.1063/5.0135084>.
107. Ou, Z.Y. and Li, X., Quantum SU (1,1) interferometers: Basic principles and applications, *APL Photonics*, 2020, vol. 5, no. 8, <https://doi.org/10.1063/5.0004873>.
108. Medjadba, H., Lecler, S., Simohamed, L.M., Chakari, A., and Javahiraly, N., Optimizing the optical components choice for performances improvement of multimode fiber gyroscope, *Proceedings SPIE 7314, Photonics in the Transportation Industry: Auto to Aerospace II*, 2009, <https://doi.org/10.1117/12.821003>.
109. Capezzuto, M., Gaudiosi, G., Nardone, L., et al., Fiber-optic gyroscope for rotational seismic ground motion monitoring of the Campi Flegrei volcanic area, *Applied Optics*, 2024, vol. 63, no. 16, pp. 4226–4233, <https://doi.org/10.1364/AO.518354>.
110. Zhao, D., Han, F., Liu, Y., Ge, L., Yang, A., and Wu, H., Orbit parameter measurement method based on fiber optic gyro inertial navigation system, *Proceedings of the Advanced Optical Manufacturing Technologies and Applications 2024; and Fourth International Forum of Young Scientists on Advanced Optical Manufacturing (AOMTA and YSAOM 2024)*, 2024, vol. 13280, <https://doi.org/10.1117/12.3048115>.
111. Zhao, L., Simulation study on digital control model of fiber optic gyro SLD light source, *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, vol. 2547, no. 1, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2547/1/012003>.
112. Çelikel, O., Construction and characterization of interferometric fiber optic gyroscope (IFOG) with erbium doped fiber amplifier (EDFA), *Optical and Quantum Electronics*, 2007, vol. 39, pp. 147–156, <https://doi.org/10.1007/s11082-007-9070-z>.
113. Tran, M.A., Gundavarapu, S., Belt, M., Komljenovic, T., Blumenthal, D.J., and Bowers, J.E., Frequency modulate laser based interferometric optical gyroscope, *Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), in OSA Technical Digest (online)*, 2016, https://doi.org/10.1364/CLEO_AT.2016.JTu5A.140.
114. Yan, J., Miao, L., Shen, H., Shu, X., Huang, T., and Che, S., Low-drift closed-loop fiber optic gyroscope of high scale factor stability driven by laser with external phase modulation, *Photonic Sensors*, 2022, vol. 12, <https://doi.org/10.1007/s13320-022-0648-7>.
115. Yang, Yu., Li, S., Yan, H., and Jin, W., Low-noise closed-loop FOG driven by two broadband sources, *Journal of Lightwave Technology*, 2019, vol. 37, no. 18, pp. 4555–4559, <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2910543>.
116. Keskin, H., Vural, H.A., Alaçakır, E., and Altan, H., The evaluation of various designs for ytterbium doped fiber based superfluorescent source at 1μm wavelength, *Proceedings SPIE 11772, Optical Sensors*, 2021, vol. 1177220, <https://doi.org/10.1117/12.2590737>.

117. Keskin, H., Vural, H.A., Altinöz, B., Bektik, Ü., and Altan, H., 1030 nm all-fiber closed-loop fiber optic gyroscope with high sensitivity, *Journal of Sensors*, 2022, <https://doi.org/10.1155/2022/8967827>.
118. Nunes, G.F., Rodrigues, N.A., and Sakamoto, J.M., Erbium-doped fiber optical source for an IFOG: spectrum dependence on the pump wavelength, *Applied Optics*, 2025, vol. 64, no. 21, pp. 5932–5941, <https://doi.org/10.1364/AO.561084>.
119. Egorov, D.A. and Klyuchnikova, E.L., Results of comparative study of light sources for fiber optic gyroscopes, *Gyroscopy and Navigation*, 2022, vol. 13, pp. 304–309, <https://doi.org/10.1134/S2075108722040046>.
120. Egorov, D.A., Klyuchnikova, Y.L., Untilov, A.A., et al., Light sources for fiber-optic gyroscopes, *Gyroscopy and Navigation*, 2024, vol. 15, pp.109–128, <https://doi.org/10.1134/S2075108724700226>.
121. Hollinger, W.P., Killian, K.M., and Kovacs, R.A., *Closed loop fiber optic gyroscope with signal processing arrangement for improved performance*, U.S. Patent 5278631, January 11, 1994.
122. Ebbert, A. and Schiffner, G., Closed-loop fiber-optic gyroscope with sawtooth phase-modulated feedback, *Optics Letters*, 1985, vol. 10, no. 6, pp. 300–302, <https://doi.org/10.1364/OL.10.000300>.
123. Qi, Y., Xin, Zh., Wang, Y., Wang, M., Liu, Z., Gong, Ch., and Liu, Y., Application of a novel spatial non-reciprocal phase modulator in fiber optic gyroscope, *Optical Fiber Technology*, 2020, vol. 58, 102258, <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102258>.
124. Qi, Y., WeiBin, F., Li, Hu, T., Wang, Y., and Wang, N., An ultra-short coil fiber optic gyroscope, *Optics & Laser Technology*, 2023, no. 157, no. 10, 108751, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108751>.
125. Zhu, X., Chen, X., Shu, X., and Liu, Ch., Eigen frequency measurements of a fiber optic gyroscope based on a staircase waveform with large temperature range, *Applied Optics*, 2019, vol. 58, no. 6, pp. 1562–1568, <https://doi.org/10.1364/AO.58.001562>.
126. Bacurau, R.M., Dante, A., Schlichting, M.W., Spengler, A.W., and Ferreira, E.C., Two-level and two-period modulation for closed-loop interferometric fiber optic gyroscopes, *Optics Letters*, 2018, vol. 43, no. 11, pp. 2652–2655, <https://doi.org/10.1364/OL.43.002652>.
127. Zhang, C., Zhang, S., Pan, X. and Jin, J., Six-state phase modulation for reduced crosstalk in a fiber optic gyroscope, *Optics Express*, 2018, no. 26, no. (8), pp. 10535–10549, <https://doi.org/10.1364/OE.26.010535>.
128. Zheng, S., Ren, M., Luo, X., Zhang, H., and Feng, G., A novel closed-loop control to solve light source power fluctuations in the fiber-optic gyroscope, *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 10, 4590, <https://doi.org/10.3390/s23104590>.
129. Zheng, S., Ren, M., Luo, X., Zhang, H., and Feng, G., The third closed-loop control for compensating light power fluctuations in the interferometric fiber-optic gyroscope, *Journal of Russian Laser Research*, 2023, no. 44, no. 3, pp. 247–255, <https://doi.org/10.1007/s10946-023-10129-7>.
130. Osório, J.H., *Specialty optical fibers for sensing*, Thesis, University of Campinas, 2017, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29696.12803>.
131. Song, N., Xu, X., Zhang, Z., Gao, F., and Wang, X., Advanced interferometric fiber optic gyroscope for inertial sensing: A review, *Journal of Lightwave Technology*, 2023, vol. 41, no. 13, pp. 4023–4034, <https://doi.org/10.1109/JLT.2023.3260839>.
132. Song, N., Cai, W., Song, J., Jin, J., and Wu, Ch., Structure optimization of small-diameter polarization-maintaining photonic crystal fiber for mini coil of spaceborne miniature fiber-optic gyroscope, *Applied Optics*, 2015, vol. 54, no. 33, pp. 9831–9838, <https://doi.org/10.1364/AO.54.009831>.
133. Kim, H.K., Digonnet, M.JF, and Kino, G.S., Air-core photonic-bandgap fiber-optic gyroscope, *Journal of Lightwave Technology*, 2006, vol. 24, no. 8, pp. 3169–3174, <https://doi.org/10.1109/JLT.2006.880689>.
134. Poli, F., Cucinotta, A. and Selleri, S., *Photonic Crystal Fibers: Properties and Applications*, Springer, 2007.
135. Yang, B., Li, Y., Teng, F., Sun, L., Zhou, X. and Wang, J., Results and flight tests of high precision photonic crystal fiber optic gyroscope, *Optical Fiber Technology*, 2020, vol. 60, p. 102365, <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102365>.
136. Suo, X., Yu, H., and Wu, X., Integrated interferometric fiber optic gyroscope employing a photo-electronic chip, *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, vol. 34, no. 22, pp. 1250–1253, <https://doi.org/10.1109/LPT.2022.3210343>.
137. Teng, F., Jin, J., Huang, Y., Zhang, Z., and Zhang, Ch., Noise analysis and measurement of high sensitivity photonic crystal fiber-optic gyroscope, *Optical Fiber Technology*, 2015, vol. 25, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2015.06.002>.
138. Li, Y., Teng, F., Yang, B., Zhang, Zh., Zhao, Y., and Zhang, Yu., Noise analysis of hollow core photonic crystal fiber optic gyroscope, *Optik*, 2021, vol. 225, 165849, <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165849>.

139. Wang, X., Song, N., Song, J., and Li, W., A photonic crystal fiber with optimized birefringence-stress stability for fiber optic gyroscope, *Optik*, 2020, vol. 206, no. 1, p. 163488, <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163488>.
140. Song, N., Pan, M., Jin, J., and Song, J., Reduced phase error of a fiber optic gyroscope using a polarization maintaining photonic crystal fiber, *Optical Fiber Technology*, 2012, vol. 18, no. 4, pp. 186–189, <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2012.04.002>.
141. Alishacelestin, X., Sivanantha Raja, A., and Selvendran, S., A highly birefringent photonic crystal fiber with compact cladding layers suitable for fiber optic gyroscope application, *Laser Physics*, 2021, vol. 31, no. 6, pp. 065101, <https://doi.org/10.1088/1555-6611/ac0049>.
142. Zhang, Ch., Mao, Y., Zhou, X., Chen, Y., and Ren, G., Adaptive intensity noise suppression of fiber optic gyroscopes based on period LMS algorithm, *Optik*, 2022, vol. 251, p. 168033, <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.168033>.
143. He, Dong, Cao, Yu., Zhou, T., Peng, C., and Li, Z., Sensitivity enhancement through RIN suppression in dual-polarization fiber optic gyroscopes for rotational seismology, *Optics Express*, 2020, vol. 28, no. 23, pp. 34717–34729, <https://doi.org/10.1364/OE.409377>.
144. Wang, W., Cao, X., Shi, F., Wei, Y., Zhu, L., Huang, H., Chen, Y., and Li, Z., Comprehensive noise suppression in fiber optic gyroscopes through a fusion architecture, *Proc. of CLEO 2025, Technical Digest Series*, 2025, https://doi.org/10.1364/CLEO_AT.2025.JPS100_12.
145. Korkishko, Yu.N., Fedorov, V.A., Prilutskiy, V.E., Ponomarev, V.G., Morev, I.V., Obuhovich, D.V., Fedorov, I.V., and Krobka, N.I., Investigation and identification of noise sources of high precision fiber optic gyroscopes, *Proceedings of the 20th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg, 2013, pp. 59–62.
146. Celikel, O. and Eren San, S., Establishment of all digital closed-loop interferometric fiber-optic gyroscope and scale factor comparison for open-loop and all digital closed-loop configurations, *IEEE Sensors Journal*, 2009, vol. 9, no. 2, pp. 176–186, <https://doi.org/10.1109/JSEN.2008.2011066>.
147. Cao, Yu., Zhu, L., Chen, Ya., Huang, H., Wang, W., He, Y., Ma, X., and Li, Z., Dual-polarization interferometric fiber optic gyroscope based on a four-port circulator, *Optics Express*, 2023, vol. 31, no. 9, pp. 14873–14887, <https://doi.org/10.1364/OE.476127>.
148. Shupe, D.M., Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer, *Applied Optics*, 1980, vol. 19, no. 5, pp. 654–655, <https://doi.org/10.1364/AO.19.000654>.
149. Zhang, Y., Gao, Z., Zhang, Y., and Yang, L., Method of reducing thermal-induced errors of a fiber optic gyroscope by adding additional winding layers, *Applied Optics*, 2020, vol. 59, no. 8, pp. 2462–2467, <https://doi.org/10.1364/AO.377230>.
150. Senol, A., Tugba, O.A., Yertutanol, A., and Ozbay, E., A novel method to eliminate the symmetry dependence of fiber coils for Shupe mitigation, *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, no. 1, p. 9076, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59330-x>.
151. Ling, W., Li, X., Xu, Z., Zhang, Z. and Wei, Y., Thermal effects of fiber sensing coils in different winding pattern considering both thermal gradient and thermal stress, *Optics Communications*, 2015, vol. 356, pp. 290–295, <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.08.002>.
152. Gao, Z., Zhang, Y., Wang, G., and Gao, W., Analysis and simulation for the thermal performance of the octupolar fiber coil, *Optical Engineering*, 2014, vol. 53, no. 1, pp. 016114–016114, <https://doi.org/10.1117/1.OE.53.1.016114>.
153. Ramadass, G.A., Vedachalam, N., Arunachalam, U., Raju, R., and Balanagajyothi, V., Finite element analysis of the influence of ambient temperature variations on the performance of fiber optic gyroscope sensing coils, *Marine Technology Society Journal*, 2017, vol. 51, no. 1, pp. 16–22, <https://doi.org/10.4031/MTSJ.51.1.2>.
154. Ge, S., Guo, C., and Yang, R., Thermal stress on fiber coils with different winding patterns, *Optical Fiber Technology*, 2020, vol. 58, no. 7, p. 102307, <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102307>.
155. Li, Z., Meng, Z., Liu, T., and Steve Yao, X., A novel method for determining and improving the quality of a quadrupolar fiber gyro coil under temperature variations, *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 2, pp. 2521–2530, <https://doi.org/10.1364/OE.21.002521>.
156. Zhao, X., Chen, G., Liu, H., and Wang, L., A multivariate temperature drift modeling and compensation method for large-diameter high-precision fiber optic gyroscopes, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, vol. 71, 8502912, <https://doi.org/10.1109/tim.2022.3181900>.
157. Mao, N., Xu, J., Li, J., and He, H., A LSTM-RNN-based fiber optic gyroscope drift compensation, *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, vol. 2021, <https://doi.org/10.1155/2021/1636001>.

158. Cao, Y., Xu, W., Lin, B., Zhu, Y., Meng, F., Zhao, X., Ding, J. et al., A method for temperature error compensation in fiber-optic gyroscope based on machine learning, *Optik*, 2022, vol. 256, no. 14, p. 168765, <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.168765>.
159. Li, H., Li, X., Xu, D., Wang, J., and Yang, H., Improved thermal stability of a fiber optic gyroscope using a geometric birefringence-enhanced polarization-maintaining fiber, *Journal of Lightwave Technology*, 2023, vol. 41, no. 8, pp. 2547–2554, <https://doi.org/10.1109/JLT.2023.3234259>.
160. Pei, Zh., Wang, J.-Q., Li, K., Chen, H.-G., Hong, W., Li, Y.-J., Huang, B., Jiang, W., and Wang, G., Research on the technology for suppressing Shupe error of fiber optic gyroscope based on structure that integrates thermal conduction and insulation, *Proceedings of the 29th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, 2022.
161. Egorov, D.A., and Novikov, R.L., Studying the temperature dependency of h-parameter of the fiber-optic gyroscope coil, *Gyroscopy and Navigation*, 2023, vol. 14, no. 4, pp. 411–416, <https://doi.org/10.1134/S2075108724700123>.
162. Tran, M.A., Komljenovic, T., Hulme, J.C., Kennedy, M.J., Blumenthal, D.J., and Bowers, J.E., Integrated optical driver for interferometric optical gyroscopes, *Optics Express*, 2017, vol. 25, no. 4, pp. 3826–3840, <https://doi.org/10.1364/OE.25.003826>.
163. Nayak, J., Fiber-optic gyroscopes: from design to production, *Applied Optics*, 2011, vol. 50, no. 25, pp. E152–E161, <https://doi.org/10.1364/AO.50.00E152>.
164. Wang, Y.-Ch., Lu, S.-Y., Yen, T.-H., Wei, C.-C., Chiu, Y.-J., Liu, R.-Y., and Hung Y.-J., Silicon photonics multi-function integrated optical circuit for miniaturized fiber optic gyroscope, *Journal of Lightwave Technology*, 2023, vol. 41, no. 19, pp. 6324–6332.
165. Liu, Danni, Li, Hui, Wang, Xiao, Liu, Huilan, Ni, Peiren, Liu, Ning, and Feng, Lishuang, Interferometric optical gyroscope based on an integrated silica waveguide coil with low loss, *Optics Express*, 2020, vol. 28, no. 10, pp. 15718–15730, <https://doi.org/10.1364/OE.392510>.
166. Shang, K., Lei, M., Xiang, Q., Na, Y., Zhang, L., and Yu, H., Near-navigation-grade interferometric fiber optic gyroscope with an integrated optical chip, *Chinese Optics Letters*, 2020, vol. 18, no. 12, p. 120601, <https://doi.org/10.3788/COL202018.120601>.
167. Shang, K., Lei, M., Li, H., Zhang, T., Yu, X., Xiang, Q., Na, Y., and Zhang, L., Ultra-small interferometric fiber optic gyroscope with an integrated optical chip, *Chinese Optics Letters*, 2022, vol. 20, no. 4, p. 040601, <https://doi.org/10.3788/COL202220.040601>.
168. Gundavarapu, S., Belt, M., Huffman, T., Tran, M.A., Komljenovic, T., Bowers, J.E., and Blumenthal, D.J., Integrated Sagnac optical gyroscope sensor using ultra-low loss high aspect ratio silicon nitride waveguide coil, *Proceedings of the 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS)*, 2017.
169. Sun, D., Jiao, H., Li, H., Wang, L., Lu, Zh., Fan, Sh., Liu, W. et al., Interferometric fiber optic gyro based on high-performance passive Si₃N₄ chip, *Journal of Lightwave Technology*, 2024, vol. PP, no. 99, <https://doi.org/10.1109/JLT.2024.3467346>.
170. Guo, Zh., Jin, J., Wang, X., Song, N., Song, J., Xu, X., and Zhang, Z., Three-axis interferometric fiber optic gyroscope with silica integrated coupler chip, *IEEE Sensors Journal*, 2023, vol. PP, no. 99, <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3260206>.
171. <https://www.ofsoptics.com/multicore-optical-fiber>.
172. Rademacher, G., Luis, R.S., Puttnam, B.J., Awaji, Y., and Furukawa, H., Petabit-per-second class transmission and switching, *Proc. 27th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC)*, 2022, <https://doi.org/10.23919/OECC/PSC53152.2022.9850029>.
173. Dell'Olio, F. et al., Miniaturization of interferometric optical gyroscopes: A review, *IEEE Sensors Journal*, 2023, vol. PP, no. 99, <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3327217>.
174. Wang, L., Halstead, D.R., Monte, T.D., Khan, J.A., Brunner, J., and van Heyningen, M.A.K., Low-cost, high-end tactical-grade fiber optic gyroscope based on photonic integrated circuit, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*, 2019, <https://doi.org/10.1109/ISISS.2019.8739700>.
175. Yang, Ch., Fu, J., Ning, Zh., Lv, T., and Huang, Y., Optical path design and optimization of a small fiber optic gyroscope, *Proceedings of the 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems*, 2021, <https://doi.org/10.1145/3469213.3470238>.
176. Shen, R.S., Kuo, T.H., Kuo, T.J., Chen, W.X., Wang, Y.C. and Hung, Y.J., Proof-of-concept demonstration of remote-driven fiber optics gyroscope for application in autonomous underwater vehicles, *Proceedings of the 28th Microoptics Conference (MOC)*, 2023, pp. 85–87.

177. **Panish, R. and Taylor, M.**, Achieving high navigation accuracy using inertial navigation systems in autonomous underwater vehicles, *Proceedings of the OCEANS 2011 IEEE-Spain*, 2011, <https://doi.org/10.1109/Oceans-Spain.2011.6003517>.
178. **Gaiffe, T.**, From R&D brassboards to navigation grade FOG-based INS: The experience of Photonetics/Ixsea, *15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest. OFS 2002 (Cat. No.02EX533)*, Portland, OR, USA, 2002, vol. 1, <https://doi.org/10.1109/OFS.2002.1000486>.
179. **Pavlath, G.A.**, Fiber optic gyros: The vision realized, *Optical Fiber Sensors*, 2006, p. MA3, Optica Publishing Group, <https://doi.org/10.1364/OFS.2006.MA3>.
180. **Singh, B., Rana, H., Kumar, S., Bhulania, P. and Minocha, G.**, A novel design of fiber optic gyroscope based INS system for UAS applications, *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 57, pp. 1317–1323, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.442>.
181. **Jin, J., He, J., Song, N., Ma, K. and Kong, L.**, A compact four-axis interferometric fiber optic gyroscope based on multiplexing for space application, *Journal of Lightwave Technology*, 2020, vol. 38, no. 23, pp. 6655–6663, <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.3015713>.
182. **Dickson, W.C., Yee, T.K., Coward, J.F., McClaren, A. and Pechner, D.A.**, Compact fiber optic gyroscopes for platform stabilization, *Nanophotonics and Macrophotonics for Space Environments VII*, 2013, 8876, pp. 147–156.
183. **Sokolov, A.V., Krasnov, A.A., Starosel'tsev, L.P. and Dzyuba, A.N.**, Development of a gyro stabilization system with fiber-optic gyroscopes for an air-sea gravimeter, *Gyroscopy and Navigation*, 2015, vol. 6, no. 4, pp. 338–343, <https://doi.org/10.1134/S2075108715040124>.
184. <https://www.advancednavigation.com/inertial-navigation-systems/fog-gnss-ins/boreas/>.
185. <https://m.navigationins.com/uavs-navigation-digital-bsd120-lightweight-inertial-navigation-sensor/>.
186. <https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/products/navigation-and-sensors/inertial-measurement-units/hg2802-fiber-optic-gyro-inertial-measurement-unit?>
187. <https://www.northropgrumman.com/what-we-do/mission-solutions/assured-navigation/ln-200s-inertial-measurement-unit>.
188. <https://manuals.plus/fizoptika/fu40-300-d1es-fiber-optic-gyroscope-manual>.
189. http://www.optolink.ru/en/products/three_axis_fog/trs400.
190. **Korkishko, Y.N., Fedorov, V.A., Prilutskiy, V.E., Ponomarev, V.G., Fedorov, I.V., Kostritskii, S.M., Morev, I.V., Obuhovich, D.V., Prilutskiy, S.V., Zuev, A.I. and Varnakov, V.K.**, Highest bias stability fiber-optic gyroscope SRS-5000, *Proceedings of the 2017 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*, 2017, pp. 1–23.
191. <https://www.emcore.com/products/post/8453/eg-120-fiber-optic-gyroscope-fog-non-itar>.
192. <https://www.anellphotonics.com/products/x3-technical-specs>.
193. <https://mostatech.mt/fiber-optic-gyro-series-vg091>.
194. **Lêfevre, H.C. et al.**, The fiber optic gyro ‘adventure’ at Photonetics, iXsea and now iXblue, *Optical Waveguide and Laser Sensors*, 2020, vol. 11405, pp. 10–29, <http://doi.org/10.1117/12.2560791>.
195. **Carr, K., Greer, R., May, M.B. and Gift, S.**, Navy testing of the iXBlue MARINS fiber optic gyroscope (FOG) inertial navigation system (INS), *Proceedings of the IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, 2014, pp. 1392–1408.
196. **Wang, Y., Yan, M. and Zhang, Z.**, Construction and application of fiber optic gyro digital prototype based on digital twin technology, *Proceedings of the AOPC 2024: Optical Design and Manufacturing*, 2024, vol. 13497, pp. 60–65.

Bhuvaneswari, M.S., Prince, Sh. (Department of Electronics and Communication Engineering, SRM Institute of Science and Technology (Kattankulathur-603203, Tamil Nadu, India)
Fiber Optic Gyroscopes: Design, Development and Applications, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2025, vol. 33, no. 4 (131), pp. 3–46.

Abstract. Fiber optic gyroscopes are one of the main categories of optical gyroscopes, finding wider applications in inertial sensing and navigation through the measurement of angular velocity. Over the past few decades, the research on fiber optic gyroscopes competes with the state-of-the-art technologies in every aspect of its design based on different applications. Though the concept of optical gyroscopes started to unfold a century back, research on this is blooming to find the alternative strategy in structure for one another, with a range of classified designs and performance improvement techniques to work on. Among the types of fiber optic gyroscopes, the interferometric type finds place in most of the navigation applications in land, military, avionics and marine. The design perspectives include the choice of source, the fiber coiling pattern, the phase modulators, the signal processing techniques and, most prominently, the integrated optics at different levels. This paper presents an exhaustive review on the fiber optic gyroscopes design and development techniques.

Key words: optical gyroscopes, Sagnac effect, Photonic crystal fiber, miniaturisation, Shupe effect, integrated optics.

Материал поступил 14.05.2025