

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТОК ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РАЗВИТИЯ

В статье анализируется современное состояние разработок волоконно-оптических гироскопов (ВОГ). Делается обзор рынка гироскопов для инерциальной навигации, отдельно рассматривается ниша, занимаемая ВОГ. Кратко поясняется принцип действия этих приборов, приводится классификация существующих видов ВОГ, их преимущества и недостатки, дается описание некоторых существующих образцов в качестве примеров. Перечисляются также основные отечественные и зарубежные производители ВОГ. Кроме того, анализируются тенденции развития ВОГ и приводится оценка изменений рынка гироскопов в ближайшем будущем.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, интерферометрический ВОГ, резонаторный ВОГ, микрооптические датчики, инерциальная навигация.

Введение

Гироскопы – это устройства, которые определяют угловую скорость движения или изменение углового положения основания, на котором они установлены. Они используются для вычисления навигационных и динамических параметров подвижных объектов и стабилизации размещенных на них технических средств. Существует большое количество различных типов этих приборов, но доминирующее положение на мировом рынке гироскопической техники занимают оптические гиро-

Драницына Елена Викторовна. Кандидат технических наук, начальник группы, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; Университет ИТМО (С.-Петербург). Член секции молодых ученых международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Егоров Дмитрий Александрович. Ведущий инженер, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Унтилов Александр Алексеевич. Кандидат технических наук, заместитель начальника отдела, начальник лаборатории, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Статья по докладу на юбилейной XXX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, 2023 г.

скопы, принцип действия которых основан на эффекте Саньяка [1–5]. К ним относят лазерные (ЛГ) и волоконно-оптические гироскопы (ВОГ). В последнее время ведутся также разработки микрооптических гироскопов, их часто называют «интегрально-оптическими».

В настоящей работе описываются современное состояние и достижения в области построения ВОГ, а кроме того, направления работ по совершенствованию их точностных и эксплуатационных характеристик.

Статья организована следующим образом. В первом разделе дается сжатый обзор рынка гироскопических датчиков для инерциальной навигации и отмечается, какую нишу в нем занимает ВОГ. Во втором разделе коротко рассказывается о принципе действия этих приборов. Далее приводится классификация существующих и разрабатываемых ВОГ с описанием различных типов конструкции, дается информация об основных производителях ВОГ и особенностях выпускаемых ими отдельных моделей. Перечисляются преимущества и недостатки интерферометрического ВОГ (ИВОГ) как наиболее распространенного; обсуждается специфика резонаторных ВОГ (РВОГ) и микрооптических датчиков. В заключение отмечаются направления работ по совершенствованию характеристик ВОГ в ближайшей перспективе.

Обзор рынка гироскопов

Предыстория создания оптических гироскопов связана с развитием одного из фундаментальных направлений физики – оптики движущихся сред. Первые работы по конструированию ЛГ были начаты практически одновременно в США и СССР. В 1962 г. А. Розенталь предложил, а В. Мацек и Д. Девис (все – США) построили первый He-Ne-лазер с кольцевым резонатором, который и послужил началом для целого направления – лазерной гироскопии [4]. В середине 1963 г. макетный образец ЛГ на базе кольцевого газового He-Ne-лазера был изготовлен и в СССР Л.Н. Курбатовым (НИИ прикладной физики) и В.Н. Курятовым (НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха).

Благодаря ЛГ, дрейф нуля которого составляет $0,1-0,001^\circ/\text{ч}$, появилась возможность построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС), в авиации в настоящее время альтернатив ему нет [6]. Как видно из диаграммы, представленной на рис. 1 (где ММГ – микромеханические гироскопы, ДНГ – динамические настраиваемые гироскопы, ВТГ – волновые твердотельные гироскопы), ЛГ в настоящее время занимают около половины рынка гироскопических датчиков и по прогнозу на 2025 г. не собираются сдавать свои позиции [1].

Как любое изделие, гироскопы проходят все стадии жизненного цикла. На рис. 2 представлена схема вероятного развития технологии инерциальных датчиков, как его видят западные эксперты [7]. Технология изготовления ЛГ считается освоенной, ожидать дальнейшего повышения его точности не приходится, и, согласно прогнозам, он постепенно будет выходить из употребления вслед за классическими механическими гироскопами.

Из освоенных в производстве гироскопов основными конкурентами ЛГ являются ИВОГ и ВТГ. Последние построены на основе кварцевого полусферического резонатора и сочетают в себе высокую точность и уникальные эксплуатационные характеристики, но их применение пока ограничено высокой стоимостью. Здесь необходимо отметить достижение компании Safran Electronics & Defense, которая на

основе ВТГ HRG-Crystal разработала «двухъядерный» инерциальный измерительный модуль нового поколения под названием HRG-Crystal DUAL CORE [7] с двумя ортогональными триадами высокоточных одноосных гироскопов ВТГ-20. Одна из них – основная – функционирует в режиме навигации и определения ориентации подвижного объекта, другая автоматически «самокалибруется» по специальной технологии, что в перспективе повышает точность автономной навигации БИНС минимум на порядок.

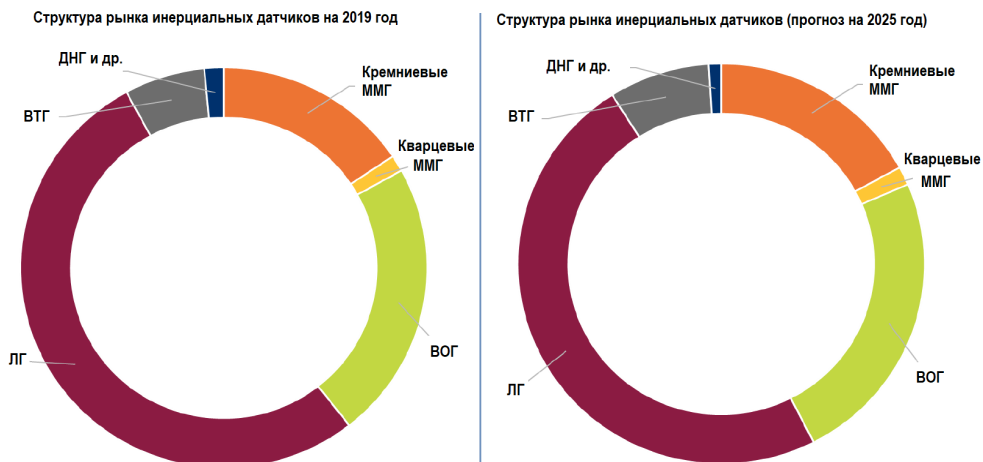


Рис. 1. Распределение различных типов гироскопов на рынке инерциальных датчиков на 2019 г. и прогноз на 2025 г. (Yole Development. High End Inertial Sensors for Defense, Aerospace & Industrial Applications 2020. Sample) [1]

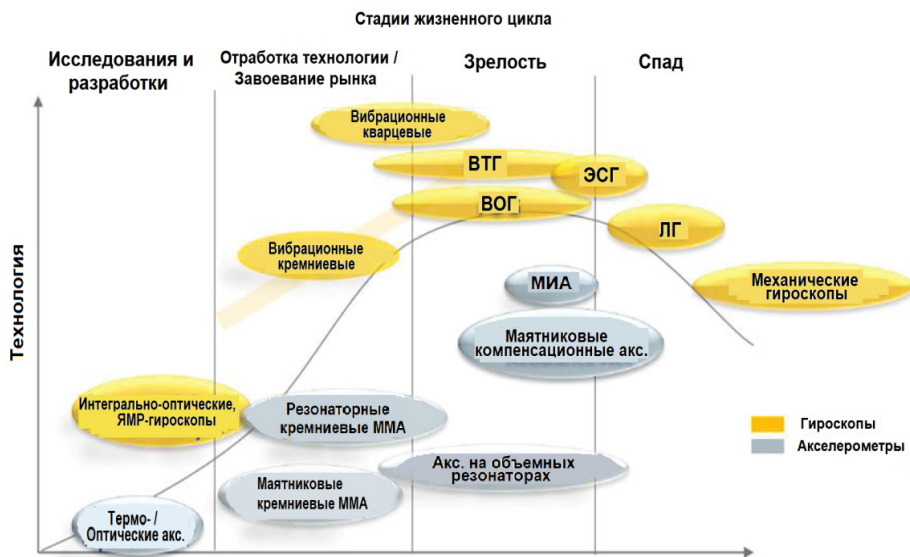


Рис. 2. Стадии жизненного цикла гироскопов и акселерометров [7]

В ИВОГ угловая скорость измеряется по разности набега фаз встречных волн, проходящих однократно по замкнутому контуру интерферометра Саньяка, формируемому многовитковой катушкой оптического волокна. При этом за счет изменения длины опти-

ческого контура можно варьировать чувствительность и точность ИВОГ, что делает их привлекательными для построения систем различного класса точности. Первоначально ИВОГ классифицировались как гироскопы низкого и среднего класса точности. Однако отработка технологии и совершенствование компонентов позволили создать БИНС на ИВОГ, обеспечивающие длительную высокоточную автономную навигацию [6]: известны серийно изготавливаемые образцы таких систем с дрейфом меньше 10^{-4} °/ч (например, Marins M11 компании iXblue (Exail с 2022 г.), Франция) [8, 9]. Бурное развитие волоконно-оптических телекоммуникационных сетей привело к значительному совершенствованию и удешевлению производства волоконно-оптических компонентов, что в свою очередь позитивно сказывается на стоимости ИВОГ.

В настоящее время технология ИВОГ находится в стадии зрелости, другими словами, считается, что все основные научные разработки уже выполнены и повышение характеристик идет за счет улучшения технологии производства. По сравнению с ЛГ и ВТГ у ИВОГ хуже стабильность масштабного коэффициента, более высокая чувствительность к температуре и вибрациям, но ведутся активные работы по устранению этих недостатков. Тем не менее в настоящее время ИВОГ занимают около четверти рынка гироскопической техники, и их доля растет, постепенно вытесняя ЛГ (см. рис. 1). Так, на базе ИВОГ серийно изготавливаются авиационные системы ориентации и навигации, например Airins (iXblue) [9, 10], LN-251, LN-260 (Northrop Grumman, США) [11, 12], БИНС-501, БИНС-1000 («Оптолинк», Россия) [13], Skyline 100 (Cielo Inertial Solutions, Израиль) [14], XW-GI7660, XW-GI7690, XW-GI7610 (Starneto, Китай) [15], MINS700 (BWSensing, Китай) [16]. Системы на ИВОГ, такие как Astrix NX, Astrix 90, Astrix 200 (iXblue) различной точности, отличающиеся размером катушки и длиной волокна в используемых гироскопах [17], инерциальный измерительный модуль космического назначения Starlight 1000 (Cielo Inertial Solutions, Израиль) [18] активно применяются и в космической технике. Внедряются такие системы и на морских объектах, которые требуют их длительной эксплуатации. Примеры морских БИНС на ИВОГ: Marins M11 [8, 9], WSN-12 (Northrop Grumman) [19], «Бемоль-Э» (АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Россия) [20], «Кама-НС-В» (Пермская НППК, Россия) [21], БИНС-501М («Оптолинк») [13].

Принцип действия ВОГ

Принцип функционирования оптических гироскопов основан на эффекте, открытом в 1913 г. Жоржем Саньяком (рис. 3) по результатам изучения динамики вращения Земли Майкельсоном и Морли [2, 22] и наблюдения электромагнитной волны в неинерциальных системах отсчета [23]. Эффект Саньяка заключается в том, что два встречных оптических луча, распространяющихся в замкнутом контуре, изменяют свою относительную фазу, если контур вращается. Таким образом, можно связать изменение фазы с угловой скоростью контура.

В соответствии с этим принципом при встречном распространении двух световых волн в катушке оптоволокну при ее вращении одна волна приобретет сдвиг фазы Саньяка $+\varphi_s/2$, а другая $-\varphi_s/2$ [2, 24]. Зависимость $\Delta\varphi_s$ от угловой скорости поворота катушки Ω выражается формулой

$$\Delta\varphi_s = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega, \quad (1)$$

где λ – длина световой волны (средневзвешенная); c – скорость распространения оптического излучения в вакууме; L – длина волокна в катушке; D – диаметр катушки. Произведение LD обычно называют эффективной площадью интерферометра Саньяка. Чем она больше (за счет длины волокна или диаметра катушки), тем выше чувствительность ВОГ.

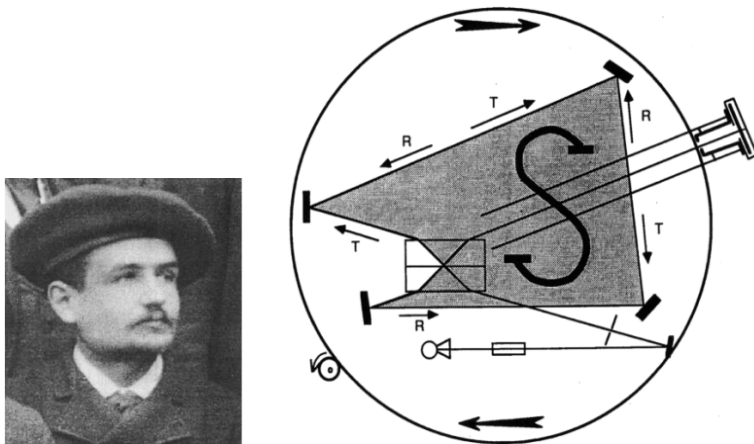


Рис. 3. Жорж Саньяк и схема его опыта [2]

Разность фаз $\Delta\varphi_s$ встречных волн определяется по интенсивности света I на фотоприемнике, которая будет изменяться по формуле

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi_s, \quad (2)$$

где I_1, I_2 – интенсивности встречных волн. Косинусная зависимость I от $\Delta\varphi_s$ приводит к низкой чувствительности I к малым угловым скоростям, поэтому для ее повышения вводится специальная модуляция фазы на $\pi/2$, которая переводит выходной сигнал ВОГ в точку максимальной чувствительности при нулевой угловой скорости [2].

Предельная чувствительность ВОГ ограничивается фотонным, электронным и дробовым шумом источника и приемника излучения. Из формулы (1) видно, что, варьируя длину волокна, можно получать гироскоп с различной чувствительностью (разрешающей способностью), когда одной и той же измеренной разности фаз будет соответствовать различный уровень действующей угловой скорости. При этом, правда, ограничивается диапазон измеряемых скоростей, но эта проблема решается за счет использования схем обработки выходного сигнала с обратной связью и специальных алгоритмических методов.

Погрешность ВОГ зависит от того, взаимно ли распространение встречных волн внутри интерферометра. Принцип взаимности гласит, что при идентичности траектории распространения волны, распространяющиеся в противоположных направлениях, будут иметь одинаковые ослабление амплитуды и набег фазы [3]. Невзаимные эффекты создают различия в условиях распространения встречных волн и приводят к сдвигу интерференционной картины на фотоприемнике. Единственный невзаимный эффект, который является полезным при построении ВОГ, – это эффект Саньяка. Влияние внешних факторов приводит к невзаимности двух направлений распространения световых волн, что проявляется в дополнительном набеге разности фаз, не зависящем от угловой скорости, и к погрешности (дрейфу) в выходном сигнале ВОГ.

При внешнем воздействии использование длинной нити оптического волокна, в котором распространяется световая волна, приводит к значительным погрешностям, вызванным деформациями катушки с оптоволокном, обусловленными коэффициентом линейного температурного расширения волокна, а также вариациями упруго-деформированного состояния композита волоконной бухты при изменении температуры окружающей среды. Это приводит в том числе к большому температурным изменениям масштабного коэффициента ВОГ по отношению к ЛГ, где световая волна распространяется в газовой среде значительно меньшей протяженности.

Чтобы добиться потенциальной точности ВОГ, прибор строится по схеме минимальной конфигурации, при этом задействуются широкополосный источник излучения и специальная намотка волокна, вводятся модуляция оптического сигнала и обратные связи, применяются и другие методы повышения точности.

Классификация ВОГ

ВОГ отличаются от ЛГ тем, что имеют пассивный оптический контур, в который вводятся световые пучки от внешнего источника. На рис. 4 приведена классификация ВОГ.

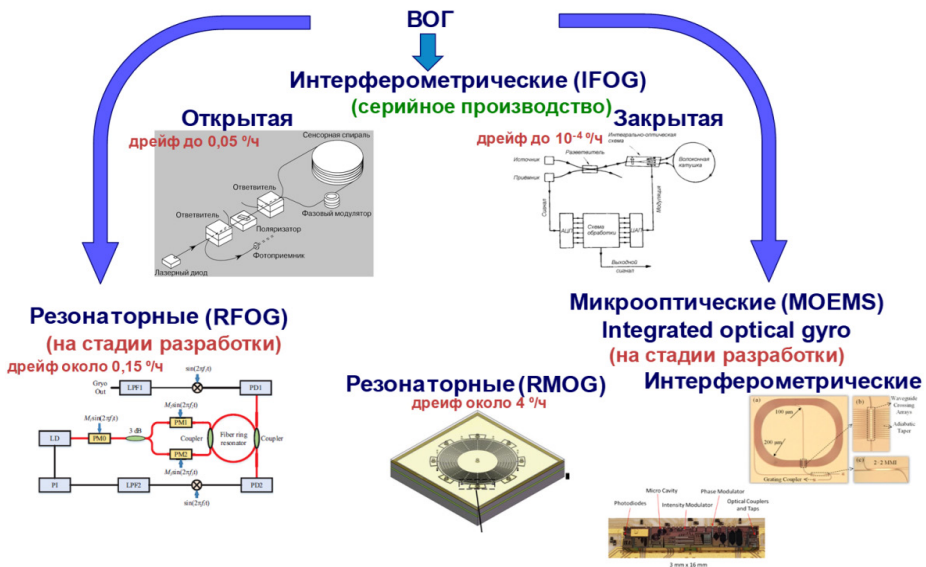


Рис. 4. Классификация ВОГ

По принципу выделения полезного сигнала ВОГ можно разделить на ИВОГ и РВОГ. В ИВОГ угловая скорость измеряется по сдвигу интерференционной картины, полученной сложением встречных волн, однократно проходящих по замкнутому контуру интерферометра Саньяка, который формируется многовитковой катушкой оптического волокна.

В РВОГ в качестве чувствительного элемента используются волоконные кольцевые резонаторы – замкнутые участки оптического волокна, выполненные в виде одного или нескольких витков длиной не более 10 м [5]. Чувствительность РВОГ зависит лишь от радиуса резонатора для данной длины волны и скорости вращения основания, что открывает большие возможности по уменьшению габаритов и удешевлению прибора. Максимально раскрыть этот потенциал позволяет применение

технологии интегральной оптики для изготовления пассивного кольцевого резонатора и других оптических элементов гироскопа.

Интегрально-оптические (микрооптические) гироскопы обычно строятся по принципу РВОГ, но существуют и интерферометрические схемы. Отличительной особенностью таких гироскопов является то, что при их изготовлении применяются микромеханические технологии и тонкопленочные одномодовые волноводы, что в перспективе позволит объединить все их элементы на одной подложке и за счет этого существенно уменьшить габариты, потребляемую мощность и стоимость производства.

Интерферометрические ВОГ

Как уже отмечалось, для повышения чувствительности ИВОГ в диапазоне малых угловых скоростей рабочую точку переносят в область максимальной линейности интерференционной картины за счет введения модуляции оптического сигнала. Такие гироскопы относят к ВОГ с открытой схемой обработки сигнала, их основные недостатки: ограничение динамического диапазона измеряемых скоростей, нелинейность выходного сигнала в этом диапазоне и ограниченная точность. Лучшие образцы таких ИВОГ демонстрируют дрейф на уровне $0,05^\circ/\text{ч}$ [25].

Для расширения динамического диапазона, повышения линейности масштабного коэффициента и достижения навигационного класса точности (дрейф менее $0,05^\circ/\text{ч}$) используется замкнутая схема обработки сигнала ВОГ. Суть такого подхода заключается в том, что детектированная величина сдвига фазы, вызванного вращением, подается в контур обратной связи. Таким образом измеряемый сдвиг фаз всегда находится вблизи нуля в точке с максимальной чувствительностью. В качестве выходного сигнала служат данные обратной связи [2]. Замкнутая схема характеризуется линейным откликом и хорошей стабильностью. Вместе с тем по линейности масштабного коэффициента ИВОГ с обратной связью пока все еще уступают ЛГ.

Считается, что потенциально достижимый дрейф ИВОГ с обратной связью находится на уровне $10^{-5} \text{ }^\circ/\text{ч}$ [26–28]. Известны исследования [29, 30], направленные на экспериментальную оценку физических ограничений при изготовлении ИВОГ и достижение минимально возможного уровня шума. С этой целью были выполнены образцы, в которых использовалось до 5 км волокна, намотанного на катушку диаметром до 1 м. Случайное блуждание по углу (Angular Random Walk – ARW) таких ИВОГ, характеризующее шум прибора, находится на уровне $30\text{--}70 \times 10^{-6} \text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$. В [29] прогнозируется построение образца «большого» ВОГ (по аналогии с «большими» ЛГ, применяемыми в сейсмологии и экспериментах по измерению мгновенного значения скорости вращения Земли) с длиной волоконного контура 15 км и радиусом 2 м, который позволит снизить уровень шума до $1 \times 10^{-6} \text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ (ARW).

Создание подобных ВОГ связано с преодолением множества технологических трудностей, таких как изготовление специальных намоточных станков с высокостабильной геометрией, компенсация избыточного шума (Relative Intensity Noise – RIN), разработка стабильной подложки, экранирование от внешних воздействий – температура, магнитное поле, вибрации и т.д. Современные исследования в области ИВОГ, как и любых других гироскопов, направлены на снижение критерия SWaP+C (габариты, масса, потребляемая мощность и стоимость) и улучшение эксплуатационных характеристик при уменьшении величины дрейфа. При этом в части обеспечения вы-

сокоточной инерциальной навигации последнее является главным требованием. Что касается систем курсоуказания и стабилизации, то в них преобладают вопросы снижения габаритов и стоимости для применения на автономных воздушных, морских и наземных подвижных объектах. Соответственно, требуется более высокий уровень надежности и стойкости к воздействию внешних факторов. Всего в мире несколько десятков компаний занимаются разработкой и производством ИВОГ [1, 9, 20, 31–41]. В табл. 1 приведены сводные данные по ИВОГ с уровнем дрейфа менее $1^\circ/\text{ч}$, производимым наиболее известными из этих компаний.

Основным преимуществом ИВОГ, как уже было сказано выше, является потенциально достижимый дрейф на уровне $10^{-5}^\circ/\text{ч}$, что позволит получить погрешности навигации на уровне 1 морской мили в месяц [8, 26–28, 42, 43]. Если это удастся, БИНС, построенная на основе такого ИВОГ, может стать полноценной альтернативой прецизионной ИНС на электростатическом гироскопе. Уже сегодня, судя по открытым публикациям, в БИНС Matins M11 используется ВОГ с дрейфом менее $10^{-4}^\circ/\text{ч}$ [8, 9].

Существенным преимуществом ИВОГ по сравнению с другими типами гироскопов является схожесть применяемых в них технологии и компонентов с телекоммуникационными: наработки, полученные в результате их стремительного развития, задействуются и в гироскопии. Это позволяет снизить как стоимость изготовления ИВОГ, так и затраты на дальнейшее развитие технологии их производства. Еще одним преимуществом этих гироскопов можно считать универсальность их производства: практически на одних и тех же элементах и по одинаковой технологии создаются и высокоточные ИВОГ, и миниатюрные дешевые датчики, которые могут конкурировать с наиболее точными микромеханическими гироскопами (ММГ), превосходя их по эксплуатационным характеристикам (устойчивость к вибрациям и перегрузкам).

Таблица 1

Основные производители ИВОГ и достигнутые уровни дрейфа ВОГ [1, 8–21, 25–46]

| Компании / уровень дрейфа ВОГ | 0,1–1°/ч | 0,01–0,1°/ч | менее 0,01°/ч |
|---|----------|-------------|---------------|
| АО «Физоптика», Россия [31, 44] | √ | | |
| ПАО Пермская НППК, Россия [21, 33] | | √ | |
| АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Россия [20] | | √ | |
| НИИ ПМ (ЦЭНКИ), Россия [34] | √ | √ | |
| ООО НПК «Оптолинк», Россия [13, 32] | √ | √ | √ |
| iXblue (Exail с 2022 г.), Франция [8–10, 17, 26–28, 43, 46] | | √ | √ |
| Honeywell, США [35] | | √ | √ |
| Northrop Grumman, США [19, 36] | | √ | √ |
| KVH, США [25] | √ | √ | |
| CELO, Израиль [18, 37] | √ | √ | √ |
| EMCORE, США [1] | √ | √ | |
| Civitanavi Systems, Италия [1] | √ | √ | |
| CASC, Китай [38] | √ | √ | |
| Ericco International, Китай [39, 45] | √ | √ | |
| StarNeto, Китай [15, 40] | √ | √ | |
| FOG Photonics, Гонконг [1] | √ | √ | |
| Bewis Sensing Technology LLC, Китай [16, 41] | √ | √ | |
| KaiTuo Precise Instrument, Китай [1] | √ | √ | |
| Tamagawa Seiki, Япония [1] | √ | √ | |
| NEDAERO, Нидерланды [1] | √ | | |

К наиболее миниатюрным моделям ИВОГ относятся: ВОГ ВГ091А («Физоптика») с размерами $\text{Ø}24 \times 50$ мм и дрейфом нуля $3^\circ/\text{ч}$ и ВОГ ER-FOG-25 (Ericco, Китай) с размерами $\text{Ø}24 \times 40$ мм и дрейфом нуля $1 \dots 5^\circ/\text{ч}$ [44, 45]. В этих ИВОГ используется открытая схема обработки выходного сигнала. Следует также отметить БИНС Umix (iXblue) с габаритами $\text{Ø}89 \times 75$ мм (ее трехосный инерциальный модуль показан на рис. 5, а): дрейф ВОГ при стабильной температуре не превышает $0,005^\circ/\text{ч}$ [9, 46].

Французская компания iXblue (после объединения в 2022 г. с компанией ECA Group в корпорацию Gorgé была переименована в Eхail) [9] в настоящее время определенно является лидером в области производства высокоточных ВОГ и навигационных систем на их основе. Выпускаемые ею системы имеют широкий диапазон применений (морское, наземное, авиационное, космическое): БИНС Marins M11, Vega V5, Airins, Astrix 200 и др. [8, 9] (рис. 5, б–д).

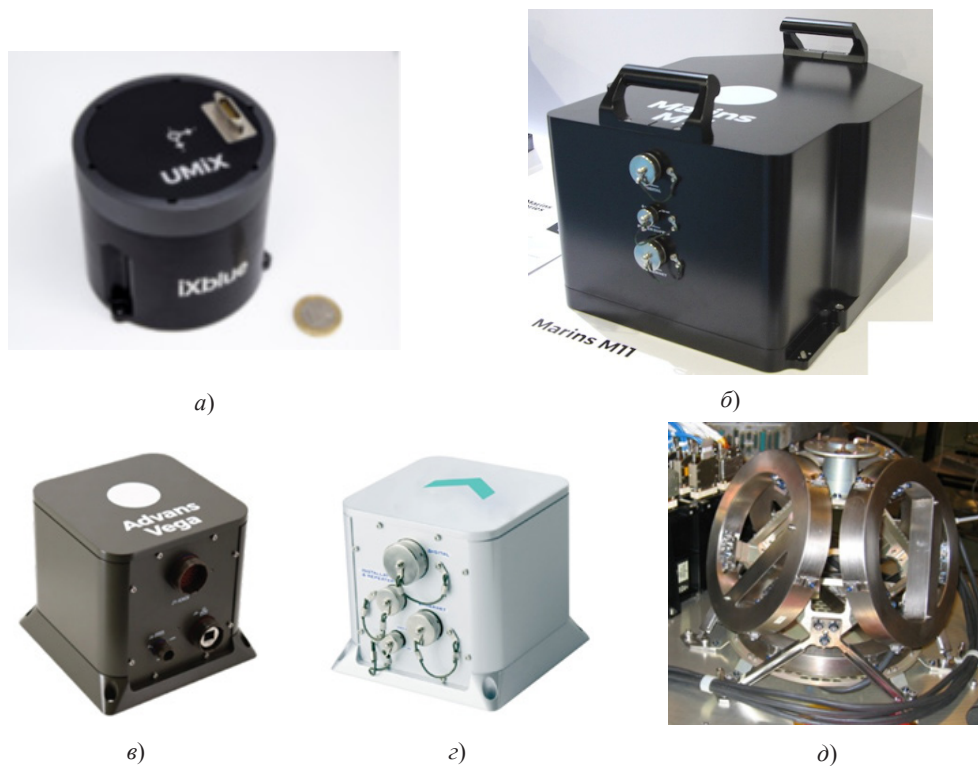


Рис. 5. Внешний вид БИНС на ВОГ (iXblue, [9, 46]: а) Umix; б) Marins M11; в) Vega V5; г) Airins; д) Astrix 200

Благодаря отсутствию подвижных частей и достаточно простой конструкции с минимальным количеством компонентов ИВОГ отличаются высокой надежностью. Так, БИНС Vega V5, Phins компании iXblue способны работать до отказа (MTBF) не менее 100000 ч, а непосредственно ВОГ – 500000 ч [9]. Отсутствие движущихся частей позволяет также обеспечить высокую стойкость к ударам. Упомянутая БИНС Vega V5 сохраняет работоспособность при ударном воздействии с ускорением до 40 g и длительностью 10 мс [9].

Естественно, ИВОГ обладают и рядом недостатков по сравнению с гироскопами других типов. В частности, приборы с открытой схемой обработки имеют нелиней-

ную выходную характеристику и ограниченный диапазон измеряемых угловых скоростей, который зависит от длины оптического контура. ИВОГ с замкнутой схемой обработки характеризуются высокой линейностью и очень большим динамическим диапазоном, но требуют высокочастотной фазовой модуляции и высокоскоростных вычислений для замыкания обратной связи на собственной частоте контура.

В силу высокой чувствительности оптического контура к внешним воздействиям всем ИВОГ присуща высокая чувствительность смещения нуля и масштабного коэффициента к изменению температуры, возрастающая при увеличении длины используемого волоконного контура и уменьшения его диаметра. Среди причин возникновения погрешности ИВОГ можно отметить термооптический эффект, эффекты Фарадея и Керра, обратные отражения, поляризационные невзаимности в волоконном контуре и др. Соответственно, на борьбу с влиянием этих эффектов направлены основные усилия разработчиков [2, 24, 42, 47].

ВОГ резонаторного типа

Развитие ВОГ продолжается не только за счет улучшения технологических характеристик ИВОГ. За последние несколько лет большие усилия направлены на усовершенствование РВОГ, особенно резонаторных микрооптических гироскопов (РМОГ), поскольку эти гироскопы имеют больший потенциал в части миниатюризации и удешевления, чем классические ИВОГ.

В РВОГ используется пассивный кольцевой резонатор для усиления разности фаз встречных волн, вызванной эффектом Саньяка, при многократном обходе замкнутого контура. Резонатор, образованный замкнутым отрезком волокна, скрученного в один или более витков, соединен с волноводом, через который световой пучок входит в резонатор и выходит из него (рис. 6, а) [48]. Кольцевой резонатор работает по тому же принципу, что и интерферометр Фабри–Перо [49], но с многократной интерференцией между циркулирующими в резонаторе бегущими волнами и вводимым в него световым пучком. Для возникновения резонанса необходимо, чтобы периметр кольца был кратным длине волны вводимого в него светового пучка. Поскольку оптический кольцевой резонатор представляет собой своеобразный фильтр, лишь несколько волн определенных длин будут находиться в резонансе внутри контура.

Условия резонанса в кольце могут поддерживаться путем либо растяжения волокна с использованием пьезоэлектрического преобразователя, либо изменения частоты входного излучения. При выполнении условия резонанса в области связи (рис. 6, а) происходят две интерференции – конструктивная интерференция входного излучения и излучения в резонаторе (когда результирующая амплитуда равна сумме индивидуальных амплитуд), а на выходном волноводе – деструктивная (когда результирующая амплитуда равна разности индивидуальных амплитуд). При этом наблюдается падение интенсивности излучения в выходном волноводе. На рис. 6, б показана форма зависимости интенсивности излучения на фотодетекторе от частоты [50]. Резонансное состояние наблюдается путем регистрации интенсивности излучения на выходе резонатора. Когда датчик неподвижен, резонансные частоты двух встречно распространяющихся лучей идентичны. При вращении кольца вокруг нормали к плоскости контура резонансные частоты двух встречно распространяющихся лучей различаются (возникает так называемое саньяковское расщепление частот).

Это приводит к смещению положений резонансов и, следовательно, к изменению интенсивности света на фотодетекторе.

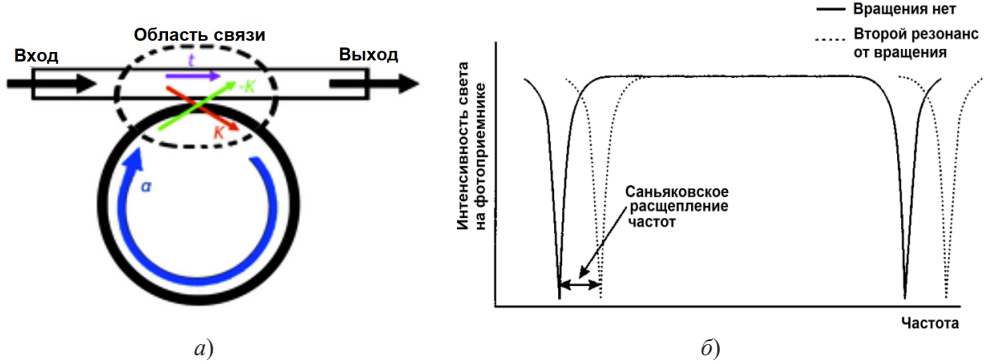


Рис. 6. ВОГ резонаторного типа: а) схема пассивного кольцевого резонатора [48], б) форма сигнала интенсивности на фотодетекторе [50]

Разность собственных частот встречных волн Δf_s в оптическом кольцевом резонаторе, вызванная эффектом Саньяка, аналогична разности частот в лазерном гироскопе [50]:

$$\Delta f_s = \frac{4S}{\lambda L} \Omega = \frac{4\pi R^2}{\lambda 2\pi R} \Omega = \frac{2R}{\lambda} \Omega, \quad (2)$$

где λ – длина волны оптического излучения; L – длина волоконного кольца; S , R – площадь и диаметр катушки; Ω – измеряемая угловая скорость.

Очевидно, что количество витков волокна не влияет на его чувствительность, поскольку она зависит лишь от радиуса резонатора для данной длины волны и скорости вращения. Таким образом, для достижения одного с ИВОГ уровня точности в РВОГ можно использовать существенно меньшую длину волокна.

РВОГ используется в режиме обратной связи, когда частоты двух встречно распространяющихся волн смещаются таким образом, чтобы для них одновременно выполнялось условие резонанса даже при вращении датчика. Наиболее популярным методом согласования частот излучения двух каналов с собственными частотами пассивного кольцевого резонатора оказалось применение фазовых модуляторов совместно с перестраиваемым лазером [5], который подстраивается под любой тип оптического кольцевого резонатора. В прототипах он обычно используется в качестве отдельного блока, но в микрооптических гироскопах может быть интегрирован с другими оптическими элементами на одной подложке.

Применение электрооптических фазовых модуляторов, в отличие от пьезоэлектрических или акустооптических, способствует миниатюризации приборов, облегчает их интеграцию с волноводными элементами, увеличивает быстродействие при согласовании частот. Кроме того, электрооптические фазовые модуляторы обеспечивают большую гибкость при настройке параметров модуляции, что упрощает борьбу с обратным рассеянием [5]. Разница между двумя модуляциями, необходимая для поддержания резонанса двух встречно распространяющихся волн в резонаторе, пропорциональна действующей скорости вращения основания.

В настоящее время такой датчик разрабатывается рядом компаний, в нашей стране это Пермская НППК [33, 51]. Наилучшие характеристики гироскопов на основе

волоконных резонаторов, согласно [5], следующие: при диаметре резонатора 60 мм величина случайного дрейфа – $2,0^\circ/\text{ч}$ за время интегрирования 1 с и $1,23^\circ/\text{ч}$ за 5 с [52]. При увеличении диаметра до 120 мм случайный дрейф составил $0,37^\circ/\text{ч}$ за время интегрирования 1 с и $0,06^\circ/\text{ч}$ за 370 с [53]. При этом коммерческому освоению оптических резонаторных гироскопов препятствует необходимость применения в их конструкции малошумящих перестраиваемых лазеров с узкой шириной линии [5].

В работе [54] впервые описывается полнофункциональный макет трехлазерного источника света на основе кремниевой фотоники для компактного РВОГ, предназначенного для коммерческих навигационных приложений (рис. 7). Этот источник обеспечивает очень низкий фазовый шум, благодаря чему можно достичь дрейфа на уровне $0,15^\circ/\text{ч}$. Авторы ожидают, что его дальнейшее усовершенствование позволит построить РВОГ навигационного класса точности, достаточного для создания систем курсоуказания.



Рис. 7. Макет трехлазерного источника света на основе кремниевой фотоники и самого РВОГ [54]

Теоретически РВОГ позволяет достичь той же точности измерений, что и ИВОГ, но при использовании волокна на несколько порядков меньшей длины [2, 5, 52, 53, 55, 56]. Кроме того, из-за более короткой длины волокна он менее чувствителен к термически индуцированной невязности, но в большей степени зависит от деформаций волокна и других паразитных эффектов.

Микрооптические гироскопы

Несмотря на достигнутые успехи, традиционные ЛГ и ВОГ не могут использоваться для управления небольшими компактными подвижными объектами из-за большого размера и массы, к тому же они имеют довольно высокую стоимость.

Если в РВОГ волоконно-оптический кольцевой резонатор заменить оптическим волноводом, вытравленным на подходящей подложке, можно получить датчик того

же класса точности, но значительно меньшего размера. Такой тип датчиков был разработан компанией Northrop Grumman в Соединенных Штатах [50, 57] и известен как микрооптический гироскоп (МОГ). Были представлены образцы с диаметром волновода около 25 мкм и дрейфом $1\text{--}100^\circ/\text{ч}$.

На сегодняшний день эту нишу датчиков тактического класса точности занимают различные виды микромеханических гироскопов. Тем не менее чувствительность лучших из них по крайней мере на два порядка ниже, чем у ЛГ и ВОГ. Кроме того, на их точность влияют линейные ускорения и другие механические воздействия, так как они имеют подвижную массу. У МОГ нет этих недостатков. МОГ должны закрыть потребности приложений, требующих точности на уровне $0,1^\circ/\text{ч}$, при значительном уменьшении размеров и массы (до 20 раз по сравнению с обычными ВОГ), чему способствует развитие интегральной оптики [58]. Большинство разработанных на сегодняшний день прототипов МОГ относятся к резонаторному типу, который описан выше.

Особая разновидность РМОГ – гироскопы с резонаторами на «модах шепчущей галереи» (МШГ), которые представляют собой тела вращения: сферы, диски, тороиды и т.д. [59–61]. Принцип работы таких резонаторов основан на эффекте полного внутреннего отражения. Отличие от классического полного внутреннего отражения заключается в том, что волна ограничивается поверхностью раздела двух сред только с одной стороны.

Определение угловой скорости в РМОГ на МШГ производится по взаимному сдвигу частоты МШГ. Взаимный сдвиг частоты, вызванный вращением сферического резонатора МШГ вокруг оси, перпендикулярной его поперечному сечению и проходящей через его центр (вокруг главной оси чувствительности), описывается следующим уравнением [59]:

$$\Delta f_s = f_m - f_{mCW} = f_m - f_{mCCW} = \frac{R_0^2 f_m \rho (17 + (6 - 5\nu)\nu)}{30G(1 + \nu)(7 + 5\nu)} \Omega^2, \quad (3)$$

где f_{mCW} и f_{mCCW} – частоты МШГ волн, проходящих через резонатор по часовой стрелке и против нее соответственно; f_m – частота МШГ стационарного резонатора; R_0 – радиус рабочей секции стационарного резонатора; ρ – плотность резонатора; ν – коэффициент Пуассона; G – модуль Юнга.

Масштабный коэффициент РМОГ определяется не только свойствами материала резонатора и его размером, но и его формой. При использовании резонаторов МШГ, отличных от тел вращения (например, тороидальных), уравнение (3) изменится, но квадратичная зависимость сдвига Δf_s от угловой скорости Ω и радиуса рабочего сечения R_0 сохранится.

Существует ряд факторов (температура, давление и т.д.) которые вызывают погрешность определения угловой скорости по взаимному смещению МШГ [59], так как влияют на радиус рабочего сечения резонатора. Это приводит к паразитному взаимному сдвигу частоты, который сложно отличить от Δf_s . Другая проблема – наличие паразитной перекрестной чувствительности (вдоль ортогональных осей). Еще одной существенной проблемой являются взаимный характер сдвига частоты, который не позволяет определить знак угловой скорости (направление вращения), и нелинейность масштабного коэффициента (квадратичная зависимость эффекта от угловой скорости), что приводит к снижению чувствительности в области низких угловых скоростей.

РМОГ на МШГ пока находится на стадии экспериментальных образцов, но уже показывают неплохие результаты – стабильность дрейфа на уровне около $4^\circ/\text{ч}$ (оценка по графику вариации Аллана) при размерах резонатора на уровне единиц миллиметров [61]. На рис. 8 для примера приведена трехмерная структура РМОГ на МШГ, разработанного группой китайских исследователей на основе технологии SOI¹, где А – стекло; В – слой нитрида кремния; С – кварцевый слой; D – металлический слой; E, F, G – слои подложки [61].

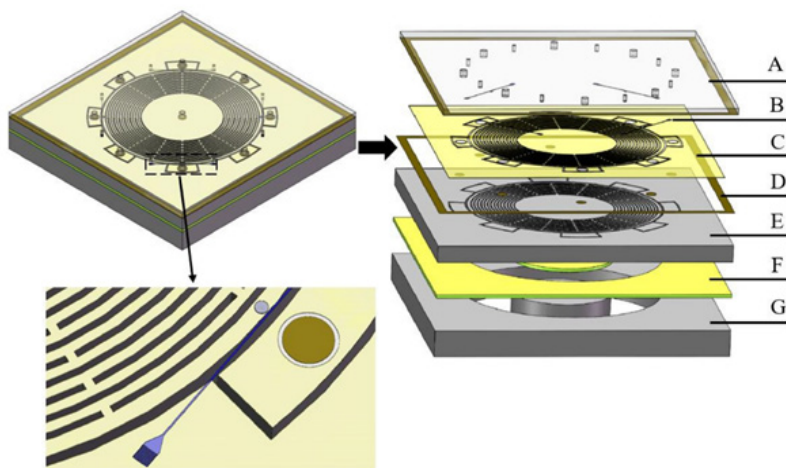


Рис.8. Трехмерная структура РМОГ [61]

Что касается интерферометрических МОГ (ИМОГ), то в качестве чувствительного элемента в них выступает многовитковая спиралевидная волноводная катушка, образующая двухлучевой интерферометр (в отличие от МОГ на пассивных кольцевых резонаторах, в которых используется многолучевой интерферометр). Принцип работы ИМОГ в общем такой же, как и у обычного ИВОГ. Световой пучок вводится в контур во взаимно противоположных направлениях, обходит его и интерферирует на фотоприемнике. Сдвиг интерференционной картины пропорционален угловой скорости вращения основания, на котором размещается ИМОГ, при этом погрешность ее определения зависит от длины катушки не совсем однозначно. При малых размерах интерферометра (диаметр несколько сантиметров и менее) удельные потери намного больше, чем у обычного ВОГ, поскольку чем больше длина спирального волновода, тем меньше энергии доходит до фотоприемника, и при достижении определенной критической длины спирали дальнейшее ее увеличение приводит уже не к росту, а к снижению чувствительности ИМОГ. На рис. 9 схематически представлен ИМОГ со спиралевидной волноводной катушкой, разработанный в Калифорнийском университете (США) [60].

На рис. 10 приведена структурная схема экспериментального образца ИМОГ Уханьской национальной лаборатории оптоэлектроники Хуачжунского университета (Китай), построенного по описанной выше технологии SOI. При размерах элемента $600 \mu\text{m} \times 700 \mu\text{m}$ достигнута чувствительность $51,3^\circ/\text{с}$ [62].

¹SOI (Silicon on Insulator – «кремний на изоляторе») – технология изготовления полупроводниковых микроприборов, основанная на использовании трехслойной подложки со структурой «кремний–диэлектрик–кремний» вместо монокристаллических кремниевых пластин.

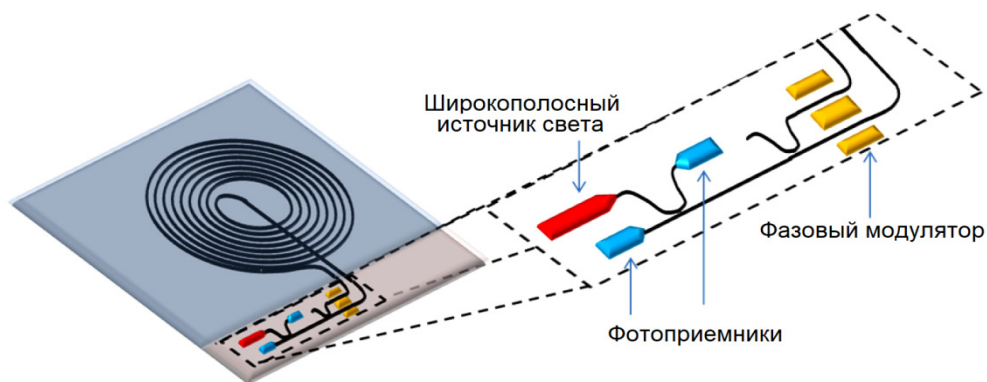


Рис. 9. ИМОГ со спиралевидной волноводной катушкой [60]

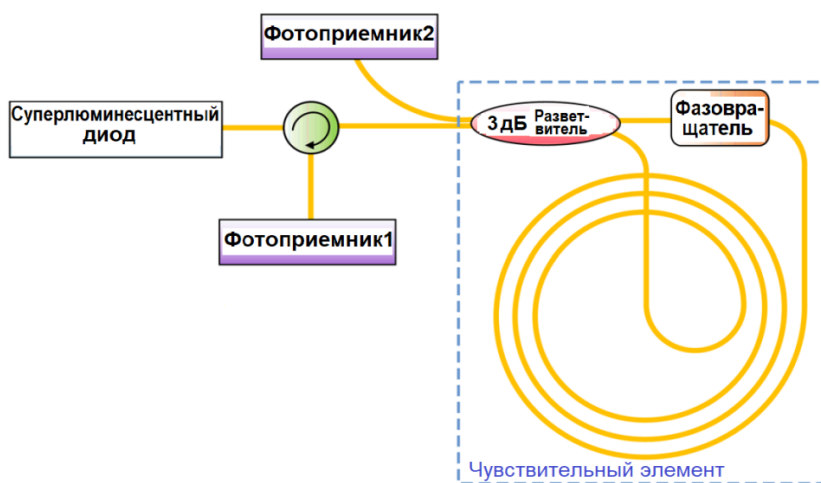


Рис. 10. Структурная схема ИМОГ, реализованного по технологии SOI [62]

Встречается также вариант использования не спирального, а кольцевого волновода в виде линии задержки [58].

Фактором, ограничивающим использование МОГ, является их чувствительность к изменениям условий окружающей среды и состоянию подложки. Рабочие характеристики чувствительного элемента таких ВОГ напрямую зависят от изменения температуры, давления, механических деформаций. Влияние окружающей среды может быть снижено путем размещения чувствительного элемента в защитном герметичном корпусе [63]. Однако корпусирование устройства не решает проблем, возникающих при эксплуатации МОГ в различных климатических условиях, где температура может меняться в диапазоне от -60 до $+60$ °С. Кроме того, интегрированный на подложке источник оптического излучения во время работы производит локальный нагрев всех элементов устройства, что приводит к ухудшению точностных и рабочих характеристик МОГ.

МОГ развиваются, по сути, как альтернатива микромеханическим гироскопам, в отличие от которых у них полностью отсутствуют подвижные части, что является преимуществом. И хотя пока они сильно уступают в точности не только традиционным ВОГ и ЛГ, но и лучшим ММГ, представляется, что они обладают высоким потенциалом, хотя и относятся к объектам, подверженным существенным ударам и перегрузкам.

Заключение

В заключение приведем прогноз развития гироскопов до 2025 года, сделанный компанией Yole [1]. Оценка, приведенная на рис. 2, была предложена в 2018 году и касалась серийно выпускаемых ИВОГ, но возможности оптических гироскопов и ныне еще не исчерпаны. По мере повышения стабильности своих характеристик ВОГ, вероятно, будут постепенно поглощать рынок ЛГ.

Основные конкуренты ВОГ – ММГ и ВТГ. ММГ могут в будущем вытеснить с рынка дешевые низкоточные ВОГ, если аналогичные им характеристики будут достигнуты при более низкой стоимости (благодаря серийному производству). ВТГ могут заместить на рынке системы средней точности, если будет разработан сравнительно дешевый способ производства высокоточных резонаторов, которые пока имеются только у нескольких производителей.

Скорее всего, в ближайшие десять лет начнется промышленный выпуск ВОГ резонаторного типа. МОГ также будут развиваться, и их экспериментальные образцы покажут результаты не хуже, чем у микромеханических гироскопов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Yole Developpement.** High End Inertial Sensors for Defense, Aerospace & Industrial Applications, 2020. Sample. [Электронный ресурс]. URL: <https://s3.i-micronews.com/uploads/2020/02/YDR20063-High-End-Inertial-Sensors-2020-Sample.pdf>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
2. **Lefevre, H.C.,** The Fiber Optic Gyroscope, 3rd ed. Norwood: Artech House Publishers, 2022. 512 p.
3. **Лукьянов Д.П., Распопов В.Я., Филатов Ю.В.** Прикладная теория гироскопов. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015. 316 с.
4. **Лукьянов Д.П. и др.** 50 лет лазерному гироскопу // Материалы XX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2013. С. 7–21.
5. **Венедиктов В.Ю., Филатов Ю.В., Шалымов Е.В.** Современное состояние оптических резонаторных гироскопов // Гироскопия и навигация. 2023. Т. 31. №1 (120). С. 45–57.
6. **Пешехонов В.Г.** Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. №2 (109). С. 3–10. DOI 10.17285/0869-7035.0028.
7. **Foloppe, Y., Lenoir, Y.,** HRG Crystal™ DUAL CORE: Rebooting the INS revolution, Inertial Sensors and Systems, 2018, Braunschweig, Germany.
8. **Lefevre, H.C., Steib, A., Claire, A., Sekeriyani, A., Couderette, A., et al.,** The fiber optic gyro ‘adventure’ at Photonics, iXsea and now iXblue, Optical Waveguide and Laser Sensors, edited by R.A. Lieberman, G.A. Sanders, I.U. Scheel, Proc. of SPIE, 2020, vol. 11405, 1140505, doi: 10.1117/12.2560791.
9. **Exail Company.** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.exail.com>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
10. **Airins.** Georeferencing and Orientation System. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ixblue.com/wp-content/uploads/2022/01/airinsds-2021.pdf>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
11. **LN-251.** Advanced Airborne INS/GPS (EGI) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.northropgrumman.com/what-we-do/air/ln-251-advanced-airborne-ins-gps-egi>.
12. **LN-260.** [Электронный ресурс]. URL: <https://news.northropgrumman.com/news/releases/northrop-grumman-delivers-first-unit-of-its-newest-navigation-system-for-flight-testing-on-u-s-navy-f-5-adversary-fleet-support-fighter>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
13. **Оптолинк.** Бесплатформенные инерциальные навигационные системы. [Электронный ресурс]. URL: http://optolink.ru/ru/products/strapdown_inertial_navigation_systems. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
14. **Skyline INS Family.** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cielo-inertial.com/products/ins/skyline-100-ins/>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
15. **StarNeto.** Inertial navigation [Электронный ресурс]. URL: <http://www.starneto.com/index.php?m=content&c=index&a=lists&catid=129>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.

16. **BWSensing**. Catalog 2020. [Электронный ресурс]. URL: https://www.bwsensing.com/upload/userfile/BWSENSING_Catalog2020.pdf. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
17. **Inertial navigation for space**. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ixblue.com/photonics-space/inertial-navigation-for-space/>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
18. **Cielo Inertial Solutions Ltd**. Starlight 1000 IRU. Inertial Reference Unit. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cielo-inertial.com/products/iru/starlight-1000-iru/>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
19. **Navy League 2023: US Navy awards Northrop Grumman AN/WSN-12 full-rate production contract**. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.janes.com/defence-news/news-detail/navy-league-2023-us-navy-awards-northrop-grumman-anwsn-12-full-rate-production-contract>. Дата последнего обращения: 26.10.2023.
20. **АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»**. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.elektropribor.spb.ru>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
21. **Андреев А.Г., Ермаков В.С., Мафтер М.Б., Струк В.К.** Морская интегрированная малогабаритная система навигации и стабилизации на волоконно-оптических гироскопах КАМА-НС-В 2012 // Труды XXXVIII Всероссийской конференции «Управление движением корабля и специальных подводных аппаратов». М.: ИПУ РАН, 2012. С. 11–21.
22. **Robertson, H.P.**, Postulate versus observation in the special theory of relativity, *Rev. Mod. Phys.*, 1949, 21, 378–382, doi:10.1103/RevModPhys.21.378.
23. **Page, L., Adams, N.**, *Electrodynamics*, 1st ed., D. Van Nostrand Company: New York, USA, 1940.
24. **Шереметьев А.Г.** Волоконный оптический гироскоп. М.: Радио и связь, 1987. 152 с.
25. **KVH Industries, Inc**. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kvh.com>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
26. **Lefevre, H.C.**, The fiber-optic gyroscope: Challenges to become the ultimate rotation-sensing technology, *Optical Fiber Technology*, December 2013, vol. 19, issue 6, part B, pp. 828–832.
27. **Paturel, Y., Honthaas, J., Lefèvre, H., et al.**, One nautical mile per month fog-based strapdown inertial navigation system: A dream already within reach?, *Gyroscopy and Navigation*, 2014, 5, 1–8, <https://doi.org/10.1134/S207510871401009X>.
28. **Лефевр Э.К.** Волоконно-оптический гироскоп: достижения и перспективы // Гироскопия и навигация. 2012. №4 (79). С. 3–9.
29. **de Toldi, E., Lefevre, H., Guattari, F., Bigueur, A., Steib, A., Ponceau, D., Molucon, C., Ducloux, E., Wassermann, J., Schreiber, U.**, First Steps for a Giant FOG: Searching for the Limits, *Inertial Sensors and Systems*, 2017, Karlsruhe, DGON-ITE, 4.1–4.14 (2017).
30. **Korkishko, Yu.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., Varnakov, V.K.**, Highest bias stability fiber-optic gyroscope SRS-5000, *Inertial Sensors and Systems*, 2017, Karlsruhe, DGON-ITE.
31. **АО «Физоптика»**. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fizoptika.ru>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
32. **ООО НПК «Оптолинк»**. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.optolink.ru>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
33. **ПАО «ПНППК»**. [Электронный ресурс]. URL: <https://pnppk.ru>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
34. **Филиал АО «ЦЭНКИ» – НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова**. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.russian.space/filialy/nii-pm.html>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
35. **Honeywell International Inc**. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.honeywell.com>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
36. **Northrop Grumman Corporation**. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.northropgrumman.com>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
37. **Cielo inertial Solutions Ltd**. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cielo-inertial.com>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
38. **China Aerospace Science and Technology Corporation, CASC**. [Электронный ресурс]. URL: <http://english.spacechina.com/n16421/index.html>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
39. **Ericco Inertial System**. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ericcointernational.com>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
40. **BeiJing StarNeto Technology Commany Ltd**. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.starneto.com>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.

41. **Bewis Sensing company**. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bwsensing.com>.
42. **Design and development of fiber optic gyroscopes** / Eric Udd and Michel Digonnet, SPIE P.O. Box 10 Bellingham, Washington 98227-0010 USA, 2019.
43. **iXblue: Inertial Navigation Solutions for navies**. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ixblue.com/defense/naval-navigation/inertial-navigation-solutions-for-navies>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
44. **АО «Физоптика»**. Группа ВГ091А. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fizoptika.ru/catalog/gruppa-vg-091a>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
45. **Ericco Inertial System**. Low Cost FOG Rate Gyroscope ER-FOG-25 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ericcointernational.com/gyroscope/fiber-optic-gyroscope/low-cost-fof-rate-gyroscope.html>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
46. **Ferrand, S., Rattier, M., Molucon, C., Gautier, K., Cheiney, P., Peter, E., Mancini, M.**, UmiX series: How to miniaturize FOG technology, *IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*, Avignon, France, 2022, pp. 1–4, doi: 10.1109/INERTIAL53425.2022.9787535.
47. **Пономарев Р.С., Шевцов Д.И.** Применение оптической рефлектометрии в производстве интегрально-оптических схем // Прикладная фотоника. 2018. Том 5. №1–2. С. 102–107.
48. **Оптические кольцевые резонаторы - Optical ring resonators** [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikibrief.org/wiki/Optical_ring_resonators. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
49. **Ллюкумович Л.Б.** Волоконно-оптические интерферометрические измерения. Ч. 1. Волоконно-оптические интерферометры. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2007. 110 с.
50. **Titterton, D.H., Weston, J.L.**, Strapdown inertial navigation technology; IEE radar, sonar, navigation, and avionics series; 2nd ed.; *Institution of Electrical Engineers: Stevenage*, 2004.
51. **Гилев Д.Г.** Влияние поляризационной невязанности и наведенного двулучепреломления в волокне на точностные параметры волоконно-оптического резонаторного гироскопа: диссертация ... к. т. н. Пермь, 2023. 114 с.
52. **Liu, L., Li, H., Liu, S., Jin, Z., Ma, H.**, Suppressing backscattering noise of a resonant fiber optic gyroscope using coherent detection, *Appl. Opt.*, 2022, vol. 61, no. 15, pp. 4421–4428.
53. **Li, H., Lin, Y., Liu, L., Ma, H., Jin, Z.**, Signal processing improvement of passive resonant fiber optic gyroscope using a reciprocal modulation-demodulation technique, *Opt. Express*, 2020, vol. 28, no. 12, pp. 18103–18111.
54. **Smiciklas, M., Sanders, G., Strandjord, L., Williams, W., Benser, E., Ayotte, S., Costin, F.**, Development of a Silicon Photonics-based Light Source for Compact Resonator Fiber Optic Gyroscopes, *Inertial Sensors and Systems*, 2019, Braunschweig, Germany.
55. **Liu, L., Li, H., Tu, J., Lin, Y., Qian, W., and Ma, H.**, Angular Random Walk Improvement of Resonant Fiber Optic Gyroscopes, *14th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO PR 2020)*, OSA Technical Digest (Optica Publishing Group, 2020), paper C7D_2.
56. **Passaro, V.M.N., Cuccovillo, A., Vaiani, L., De Carlo, M., Campanella, C.E.**, Gyroscope Technology and Applications: A Review in the Industrial Perspective, *Sensors*, 2017, 17, 2284, doi:10.3390/s17102284.
57. **Lawrence, A.W.**, Modern inertial technology – navigation, guidance and control, Springer-Verlag, 1998, 2nd ed.
58. **Венедиктов В.Ю., Филатов Ю.В., Шалымов Е.В.** Микрооптические гироскопы на основе пассивных кольцевых резонаторов // Квантовая электроника. 2016. Том 46. № 5. С. 437–446.
59. **Филатов Ю.В., Кукаев А.С., Венедиктов В.Ю., Севрюгин А.А., Шалымов Е.В.** Микрооптические гироскопы на основе резонаторов мод шепчущей галереи // Фотоника. 2023. Том 17. № 1. С. 26–44.
60. **Srinivasan, S., Moreira, R., Blumenthal, D., Bowers, J.E.**, Design of integrated hybrid silicon waveguide optical gyroscope, *Optics Express*, 2014, vol. 22, no. 21, doi:10.1364/OE.22.024988.
61. **Xia, D., Zhang, B., Wu, H., Wu, T.**, Optimization and Fabrication of an MOEMS Gyroscope Based on a WGM Resonator, *Sensors*, 2020, 20, 7264; doi:10.3390/s20247264.
62. **Wu, B., Yu, Y., Xiong, J., Zhang, X.**, Silicon Integrated Interferometric Optical Gyroscope, *Scientific Reports*, 2018, 8:8766, doi:10.1038/s41598-018-27077-x.
63. **Кондаков А.А., Салгаева У.О., Мушинский С.С. и др.** Проблемы реализации интегрально-оптического гироскопа. Прикладная фотоника 2017. Т. 4. № 2.

Dranitsyna E.V. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, ITMO University, St. Petersburg, Russia), **Egorov D.A., and Untilov A.A.** (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russia).

Current State and Development Prospects of Fiber-Optic Gyroscopes, *Гироскопия и Навигация*, 2023, vol. 31, no. 4 (123), pp. 3–21.

Abstract. The paper describes the current state of fiber-optic gyroscope (FOG) development. An overview of the modern gyroscopic market for inertial navigation is made with a special focus on the FOG niche. The principle of operation is briefly described; classification of existing FOGs is presented; their advantages and disadvantages are discussed; and some examples are given. Key Russian and international manufacturers are mentioned in the paper. Finally, trends of FOG development are analyzed, and the future development of the gyroscope market is assessed.

Key words: fiber-optic gyroscope, interferometric FOG , resonator FOG, microoptical sensors, inertial navigation.

Материал поступил 19.10.2023