

ПЕРСПЕКТИВЫ ГИРОСКОПИИ

В.Г. Пешехонов

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30.
E-mail: office@eprib.ru

Ключевые слова: волновые оптические гироскопы, микромеханические гироскопы, волновой твердотельный гироскоп, гироскоп на эффекте ядерно-магнитного резонанса, гироскоп на волнах материи.

Аннотация: Кратко рассмотрено современное состояние развития основных видов гироскопов всех классов точности. Отмечены работы по созданию новых видов гироскопов на эффектах квантовой оптики – ядерно-магнитном резонансе и волнах материи – и перспективы их использования.

1. Введение

Современный этап развития гироскопии характеризуется тремя тенденциями:

- завершилась разработка и локально продолжается производство механических гироскопов;
- продолжается разработка и расширяется производство волновых оптических, микромеханических и волновых твердотельных гироскопов;
- ведутся исследования проблем создания гироскопов на основе эффектов квантовой оптики.

2. Механические гироскопы

Примеров применения механических гироскопов еще достаточно. Во многих случаях причина заключается в том, что потребители и производители не готовы перейти к использованию новых видов гироскопов с лучшими характеристиками. Тем не менее процесс замещения механических гироскопов идет.

Только высокоточные (случайный дрейф порядка 10^{-3} град/час¹) поплавковые гироскопы и прецизионные (случайный дрейф порядка 10^{-4} град/час) электростатические гироскопы пока не имеют альтернативы, но из последующего материала следует, что альтернативы готовятся.

3. Волновые оптические гироскопы

Гироскопы на основе релятивистского эффекта Саньяка удалось создать после изобретения лазера. Потребовалось двадцать лет, чтобы организовать крупносерийное производство лазерного гироскопа (ЛГ), и в девяностые годы он стал доминирующим

¹ Здесь и в дальнейшем имеется в виду предельная величина дрейфа (3σ).

средне- и высокоточным гироскопом. Преимуществами ЛГ перед механическими гироскопами являются отсутствие вращающихся частей, высокая стабильность масштабного коэффициента, меньшее время готовности к работе и энергопотребление. На основе ЛГ построены бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС), нашедшие широкое применение, прежде всего в авиации.

Однако из-за необходимости преодоления эффекта «захвата» встречных волн и ряда менее значительных факторов случайный дрейф ЛГ разумных габаритных размеров ограничен диапазоном $10^{-2} \dots 10^{-3}$ град/час.

Эту границу преодолевает в настоящее время другой вид волновых оптических гироскопов – волоконно-оптический (ВОГ). Первоначально ВОГ рассматривался как гироскоп низкой точности, и его развитие отставало от ЛГ на десятилетие. Положение изменилось, когда за счет модуляции фаз встречных волн открылась возможность построения высокоточного ВОГ. Важное достоинство ВОГ заключается в том, что все входящие в его состав оптические элементы были ранее разработаны и в больших количествах производятся для волоконно-оптических коммуникационных систем.

В настоящее время десятки компаний многих стран мира производят ВОГ и БИНС на их основе – от малогабаритных низкой точности до высокоточных [1].

Оценки показывают [2], что имеется потенциальная возможность дальнейшего снижения случайного дрейфа ВОГ до уровня 10^{-4} град/час и менее. По этой причине, а также благодаря большому рабочему ресурсу БИНС на ВОГ представляют интерес для морских и космических применений, несмотря на то что нестабильность масштабного коэффициента ВОГ на порядок больше, чем у ЛГ. Только одна французская компания iXBlue поставляет БИНС на ВОГ флотам 18 стран.

4. Волновой твердотельный гироскоп

Исследования возможности создания гироскопа на основе эффекта Брайана начались около сорока лет назад [3]. Миниатюрный, состоящий из небольшого числа деталей волновой твердотельный гироскоп (ВТГ) вызвал значительный интерес. Однако для создания высокоточного ВТГ необходимо решить сложные материаловедческие и схемотехнические проблемы. До их решения выпускались только ВТГ низкой точности.

Первой создала ВТГ со случайным дрейфом на уровне 0,01 град/час для космических применений компания Northrop Grumman. К настоящему времени наработка этих гироскопов на космических аппаратах составила миллионы часов. Позднее оригинальный ВТГ того же класса точности разработала французская компания Safran Electronics & Defense и организовала его крупносерийное производство [4].

5. Микроминиатюрные гироскопы

Микромеханический гироскоп (ММГ) создан для удовлетворения потребности в микроминиатюрном, дешевом, пригодном для массового производства датчике угловой скорости. Эта задача решена путем создания вибрационного гироскопа на базе технологий полупроводниковой промышленности. ММГ широко применяются в системах управления движением (автомобилей, роботов, медицинских зондов и т.п.), а также в интегрированных инерциально-спутниковых навигационных системах.

Точность лучших одномассовых гироскопов находится на уровне 0,1 град/с, но разрабатываются двух-, четырех- и восьмимассовые ММГ со случайным дрейфом, приближающимся к низкому навигационному классу точности [5].

Ведутся исследования по созданию еще более миниатюрного гироскопа на базе нанофотоники. Сообщается о реализации эффекта Саньяка в оптическом интерферометре объемом 2 мм³, имеющем случайный дрейф 360 град/мин [6]. Перспектива применения подобного гироскопа пока не ясна.

Радикальным решением проблемы создания миниатюрных высокоточных гироскопов могут стать исследования по построению гироскопов на эффектах квантовой оптики, приведенные ниже.

6. Гироскоп на эффекте ядерно-магнитного резонанса

Принцип действия ядерно-магнитного гироскопа (ЯМГ) основан на прецессии спина атома в магнитном поле, подобно прецессии ротора механического гироскопа в гравитационном поле. Чувствительный элемент ЯМГ представляет собой небольшую стеклянную колбу кубической формы, заполненную двумя изотопами газа ксенона и газом щелочного металла. Под действием магнитного поля и оптической накачки происходит ориентация спинов и их прецессия, детектирование прецессии обеспечивается резонансным светом.

Первые попытки создания ЯМГ были предприняты еще в семидесятые годы и завершились созданием лабораторных установок, демонстрирующих возможность измерения угловой скорости. Работы возобновились в последние десятилетия, и компания Northrop Grumman сообщила [7] о создании прототипа ЯМГ объемом 10 см³ со случайным дрейфом на уровне 0,05 град/час. Позднее о подобном результате сообщили китайские ученые. Предстоит еще большая работа, но создание ЯМГ со случайным дрейфом порядка 10⁻² град/час не вызывает сомнения [8].

7. Гироскоп на волнах материи

Принцип действия гироскопа на волнах материи (ВМГ) основан на корпускулярно-волновом дуализме атомов, однозначно связывающем длину волны материи с импульсом частицы. ВМГ строится на атомном интерферометре Маха–Цендера и является квантово-оптической реализацией волнового гироскопа. В связи с тем что длина волны материи на несколько порядков меньше длины волны света, можно рассчитывать на то, что точность ВМГ будет существенно выше, чем у оптических волновых гироскопов.

К настоящему времени проблема создания ВМГ находится в стадии поисковых исследований, но первые лабораторные результаты вселяют определенный оптимизм – сообщается [9] об измерении скорости вращения до $6 \cdot 10^{-10}$ град/с.

8. Заключение

В обозримой перспективе (порядка десяти лет – минимальное время для создания нового гироскопа) будут использоваться все имеющиеся виды гироскопов и к ним добавится гироскоп на эффекте ядерно-магнитного резонанса.

Прецизионная гироскопия по-прежнему будет представлена механическим гироскопом с электростатическим подвесом ротора. Возможно, через несколько лет будет создан волоконно-оптический гироскоп, по точности приближающийся к электростатическому. В интересах дальней перспективы необходимо вести исследования проблемы создания гироскопа на волнах материи.

Высокоточная и среднеточная гироскопия сегодня в основном представлена волновыми оптическими гироскопами и в значительно меньшей степени – механическим поплавковым гироскопом. С течением времени последний перестанет использоваться, но, возможно, требуемой точности достигнет волновой твердотельный гироскоп. Потребность в количестве высокоточных и среднеточных гироскопов будет велика, и они по-прежнему будут выпускаться крупными сериями.

Низкоточная гироскопия, предназначенная для автоматизированных систем управления движением и представленная микромеханическими гироскопами, находится в массовом производстве и будет развиваться в направлении повышения точностных характеристик. Решающий вклад в этом направлении может внести гироскоп на эффекте ядерно-магнитного резонанса, но пока недостаточно данных, чтобы оценить перспективу его использования.

В целом гироскопия имеет достаточные ресурсы для дальнейшего развития как в интересах автономной навигации, так и в интересах различных автоматизированных систем управления движением.

Список литературы

1. Ривкин Б.С. Аналитический обзор состояния исследований и разработок в области навигации за рубежом. Вып. 3. СПб.: ГНЦ РФ «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2019.
2. Патюрель И., Онтас И., Лефевр Э., Наполитано Ф. Бесплатформенная инерциальная навигационная система на основании ВОГ с уходом одна морская миля в месяц: мечта уже достижима? // Гироскопия и навигация. 2013. № 3 (82). С. 3-13.
3. Журавлев В.Ф., Климов Д.М. Волновой твердотельный гироскоп. М.: Наука, 1985.
4. Делэйе Ф. Бортовая инерциальная система координат SpaceNaute® для европейской ракеты-носителя «Ариан-6» на основе волнового твердотельного гироскопа // Гироскопия и навигация. 2018. № 4 (103). С. 3-13.
5. Efimovskaya A., Shkel A. Multi-Degree-of-Freedom MEMS Coriolis Vibratory Gyroscopes Designed for Dynamic Range, Robustness and Sensitivity. Препринт доклада на симпозиуме Inertial Sensors and Systems 2018. Брауншвейг, Германия.
6. Khial P.P., White A.D., Hojimi A. Nanophotonic gyroscope with reciprocal sensitivity enhancement // Nature Photonics. 2018. No. 12. P. 671-675.
7. Мейер Д., Ларсен М. Гироскоп на ядерно-магнитном резонансе для инерциальной навигации // Гироскопия и навигация. 2014. № 1 (84). С. 3-13.
8. Вершовский А.К., Литманович Ю.А., Пазгалев А.С., Пешехонов В.Г. Гироскоп на ядерно-магнитном резонансе: предельные характеристики // Гироскопия и навигация. 2018. №1 (100). С. 55-
9. Буйе Ф. Столетие эффекта Саньяка и его применений от электромагнитных волн до волн материи // Гироскопия и навигация. 2013. № 4 (83). С. 3-13.