

Рис. 2. График зависимости f_y (C_o , C_p): 1 – модель; 2 – SolidWorks

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сарычев А.П., Руковицын И.Г. Математическая модель ротора для анализа управления магнитными подшипниками // Вопросы электромеханики. – 2008. – Т. 107. – С. 11–15.
2. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. – СПб.: Политехника, 2003. 206 с.
3. Поляков М.В. Исследование влияния коэффициента жесткости осевого электромагнитного подшипника на собственные частоты ротора электродвигателя-маховика // Решетневские чтения: материалы XX Юбилейной междунар. науч.-практ. конф. (9–12 нояб. 2016 г., г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2016. – Ч. 1. – С. 424–426.

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ В КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

Татарников Е.В.¹

Научный руководитель: Гормаков А.Н., доцент, к.т.н.

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: E.V.Tatarnikov@mail.ru

ISSUES AND PERSPECTIVES OF FIBER OPTIC GYROSCOPES APPLICATION IN SPACE TECHNOLOGY

Tatarnikov E.V.¹

Scientific Supervisor: Associate Prof., PhD, Gormakov A.N.

¹Tomsk Polytechnic University
Russia, Tomsk, Lenin ave., 30, 634050
E-mail: E.V.Tatarnikov@mail.ru

Волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) это новый и перспективный тип гироскопов. Они могут составить конкуренцию другим типам гироскопов, которые в данный момент наиболее часто используются в космической технике. В данной статье автор делает обзор текущего статуса ВОГ и их применения в космической отрасли. Автор описывает принцип работы гироскопа, преимущества и недостатки ВОГ по сравнению с другими типами гироскопов.

Fiber optic gyroscopes (FOG) are a new and perspective type of gyroscopes. It can compete with gyroscopes, which in this moment are the most commonly used in space technology. In this article an author has done review of current status of FOG and application of them in aerospace industry. The author describes working principle of FOG, advantages and disadvantages of FOG versus other types of gyroscopes.

Первое описание волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) было сделано в 1976 году американскими учеными В. Вали и Р.В. Шортиллом в статье «Кольцевой волоконный интерферометр» [1]. Принцип действия ВОГ основан на эффекте Саньяка. Луч света в волоконно-оптическом гироскопе проходит через катушку оптоволоконна. Суть эффекта Саньяка заключается в том, что при вращении гироскопа появляется фазовый сдвиг между встречными лучами света и по величине этого сдвига можно определить скорость вращения гироскопа.

Типовое устройство ВОГ приведено на рис. 1.

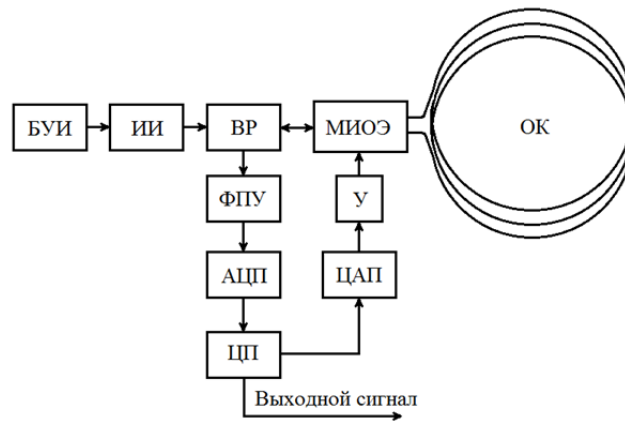


Рис. 1. Устройство ВОГ:

БУИ – блок управления излучателем; *ИИ* – источник излучения; *ВР* – волоконный разветвитель; *МИОЭ* – многофункциональный интегрально-оптический элемент; *ОК* – катушка оптоволоконна; *ФПУ* – фотоприемное устройство; *АЦП* – аналогово-цифровой преобразователь; *ЦП* – цифровой процессор; *У* – усилитель; *ЦАП* – цифро-аналоговый преобразователь

В качестве источника света в ВОГ часто используются лазеры и суперлюминесцентные диоды (СЛД) с длиной волны излучения более 1000 нм, что соответствует инфракрасному диапазону. Большая длина волны позволяет получить более точные результаты измерения угловых скоростей. СЛД обладают высокой степенью монохроматичности, что необходимо для стабильных показаний прибора.

Одним из самых главных элементов ВОГ является многофункциональный интегрально-оптический элемент (МИОЭ), который объединяет в себе световоды с поляризатором, делителем и модулятором [2]. Назначение модулятора в ВОГ системах состоит во вводе информации в световой поток [3]. В МИОЭ свет поляризуется, модулируется и расщепляется на два когерентных луча, которые перемещаются по оптоволоконной катушке в противоположных направлениях.

Пока оба луча перемещаются по волноводу в разных направлениях (рис. 2, а), сам гироскоп поворачивается на определенный угол, вследствие этого каждый луч проходит разное расстояние, и разница в пройденном пути определяет разность фаз между лучами. Связь между разностью фаз и скоростью вращения отражена в формуле (1), где L – длина оптоволоконна; c – скорость света [4].

$$\Delta\varphi = \frac{2 \cdot L^2}{\lambda \cdot c} \cdot \Omega. \quad (1)$$

Пара лучей попадает на детектор и интерферирует на нем. Выходной сигнал (рис. 2, б) детектора является косинусоидальной зависимостью (2).

$$Y = \cos(\Delta\varphi). \quad (2)$$

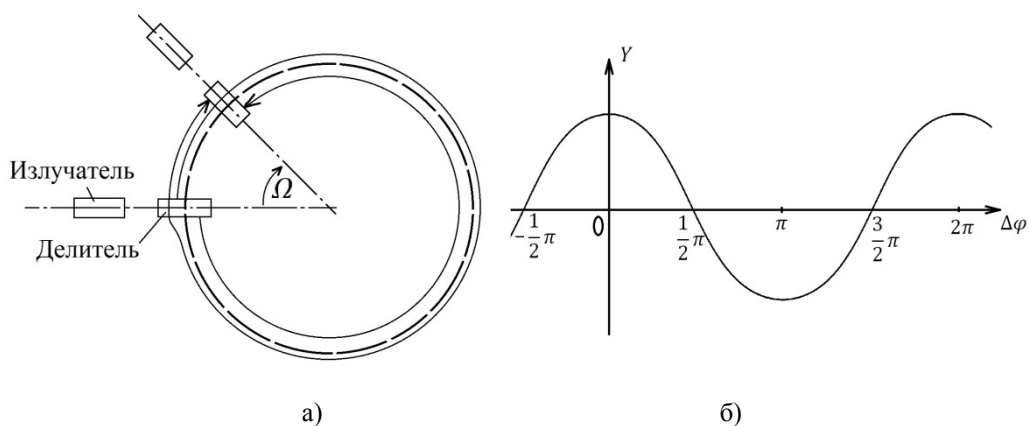


Рис. 2. Принцип действия ВОГ:

а) распространение лучей в ВОГ, б) зависимость выходного сигнала от разности фаз между лучами

Фотодетектор предназначен для преобразования оптического сигнала в электрический, который затем усиливается и обрабатывается в электронных схемах. К фотодетекторам предъявляются следующие требования: высокая чувствительность в рабочем диапазоне, минимальные шумы, высокие быстродействие и линейность отклика, высокую надежность. В наибольшей мере этим требованиям отвечают полупроводниковые фотодиоды и лавинные фотодиоды, которые широко используются в волоконно-оптических системах [3].

Преобразование оптического сигнала для последующей обработки в процессоре и вывода сигнала пользователю происходит в АЦП.

В настоящее время ВОГ с замкнутым контуром обратной связи всё более широко применяются в системах инерциальной навигации [5]. В ВОГ с замкнутым контуром механизм обратной связи сохраняет нулевой уровень сигнала путем компенсации фазового сдвига Саньяка дополнительным фазовым сдвигом. Величина этого дополнительного фазового сдвига позволяет получить информацию об угловой скорости вращения объекта.

Важнейшими преимуществами ВОГ являются:

- Малая потребляемая мощность
- Надежность. Он не содержит движущихся частей, в отличие от различных типов механических гироскопов.
- Широкий динамический диапазон. Последние разработки позволили расширить диапазон измерения угловых скоростей до $550^{\circ}/с$. [6]

Также благодаря развитию волоконно-оптической техники стоимость ВОГ постепенно снижается.

Однако ВОГ обладает одним недостатком, когда ВОГ находится в покое, выходной сигнал является случайной величиной, вследствие наличия белого шума. Шум фотонов является главным источником белого шума и ограничивает фундаментальную точность ВОГ. Шум прибора тем меньше, чем больше выходная мощность источника света и чем меньше потери оптических элементов. Поэтому, при разработке ВОГ основные усилия были направлены на уменьшение оптических потерь в каждом из элементов [7].

При нормальных условиях эксплуатации доступная конкурентная цена дает этим гироскопам определенное преимущество. Однако космическое пространство является более суровой средой, чем земная атмосфера. Остаются малоизученными вопросы влияния радиации, высоких температур и перепадов давления на показания ВОГ.

В ходе исследований был патентный поиск по теме ВОГ. Было найдено более 1000 результатов. Для поиска патентной информации использовались патентные базы данных как российские, так и зарубежные. Ретроспективность обзора информации составляет 34 лет. Стоит отметить, что большинство патентов были заявлены в последние 10 лет и до сих пор действуют. Наибольшее количество исследований в данной области приходится на Китай, США, Японию, Южную Корею и Россию. На основании проведенного патентного поиска можно отметить следующее: в настоящее время в данной тематике работы ведутся активно, что характеризует тему как актуальную.

На решение указанных выше проблем направлены следующие действующие патенты [8–11].

В патенте [8] авторы предлагают активный антирадиационный способ конструирования ВОГ с замкнутым контуром обратной связи. При использовании этого метода, не требуется вводить дополнительных элементов в конструкцию ВОГ.

При изменении температуры ВОГ, меняются свойства компонентов, входящих в его состав. Авторы следующего патента [9] нашли способ проверки и компенсации температурного коэффициента ВОГ. Данный метод подходит для разных моделей гироскопов с разными точностными характеристиками. В данном патенте [10] изобретатели описывают способ управления температурой оптических элементов в ВОГ. Это обеспечивает равномерное распределение температуры в катушке оптического волокна, предотвращает смещение нуля, и позволяет достичь требований к производительности высокоточных волоконно-оптических гироскопов.

Производительность ВОГ постоянно совершенствуется и в настоящее время способна удовлетворить самые точные требования к гироскопам. На данный момент ВОГ широко применяются в инерциальных навигационных системах средней точности в самолетах и ракетах.

В изобретении [11] ученые раскрывают способ уменьшения погрешности основанной на ВОГ инерциальной навигационной системы, вращающейся относительно геоцентрической системы.

В 2014 был запущен космический аппарат «Луч», с установленным на его борту трехосным ВОГ «ВОБИС» российской компании «Оптолинк». Приборы ВОБИС предназначены для использования в системе ориентации и стабилизации космического аппарата на высокой орбите в течение 15 лет эксплуатации в условиях космического вакуума. Погрешность данного гироскопа не превышает 500 ppm [12].

ВОГ с улучшенными точностными характеристиками может составить конкуренцию гироскопам с электростатическими и магнитными подвесами, которые на данный момент являются наиболее применяемыми в космической технике. В перспективе, на основе ВОГ можно будет строить бесплатформенные инерциальные навигационные системы для летательных аппаратов, которые не будут уступать по характеристикам действующим аналогам, но будут стоить на порядок дешевле [13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vali V., Shorthill R.W. Fiber ring interferometer, Appl. Opt. 15 (1976) 1099–1100.
2. Серебрякова В.С. Оптимизация параметров изготовления интегрально-оптических элементов для волоконно-оптических гироскопов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2008. – № 49. – С. 42–53.
3. Бутусов М.М., Галкин С.Л., Оробинский С.П. Волоконная оптика и приборостроение. – Л.: Машиностроение, 1987. – 328 с.

4. Андропова И.А., Малыкин Г.Б. Физические проблемы волоконной гироскопии на основе эффекта Саньяка // Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172. – № 8. – С. 849–873.
5. Lefevre H. The Fiber -Optic Gyroscope, Artech House, 1993.
6. Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Морев И.В., Обухович Д.В., Прилуцкий С.В., Кострицкий С.М., Федоров И.В., Зуев А.И., Варнаков В.К. Прецизионный волоконно-оптический гироскоп с расширенным диапазоном измерения угловых скоростей // Инерциальные системы и датчики. – 2014. – С.183–190.
7. Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Морев И.В., Марчук В.Г., Кострицкий С.М. Падерин Е.М. Интерферометрические волоконно-оптические гироскопы // Фотон-Экспресс. – 2007. –№ 6 (62). – С. 47–49.
8. Патент Китай CN20161363356 20160527, 26.10.2016. Active anti-radiation design method of interference type digital closed-loop fiber-optic gyroscope/ Jin Jing.
9. Патент Китай CN20161623262 20160728, 12.10.2016. Method for testing and compensating temperature coefficient of fiber-optic gyroscope/ Yang Zhihui.
10. Патент Китай CN20151890482 20151207, 16.03.2016. Method for controlling temperature of photoelectric separate fiber optic gyroscope optical path / Huang Xinyan.
11. Патент Китай CN2013106106 20130108 08.05.2013. Error restraining method for fiber-optic gyroscope strapdown inertial navigation system rotating relative to geocentric inertial system / Sun Feng.
12. Коркишко Ю. Н., Федоров В. А., Прилуцкий В. Е., Пономарев В. Г., Морев И. В., Скрипников С.Ф., Хмелевская М.И., Буравлев А.С., Кострицкий С.М., Зуев А.И., Варнаков В.К. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы на основе волоконно-оптических гироскопов // Инерциальные системы и датчики. – 2013. – С. 75–82.
13. Song Y., Zhou S., Lu Z., Fiber optic gyroscope for strap-down inertial navigation systems // Proc. SPIE 4540, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites V, 424 (December 12, 2001) – С. 424–428.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМУЩАЮЩИХ МОМЕНТОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Хайдукова В.М.¹, Бритова Ю.А.^{1,2}

Научный руководитель: Бритова Ю.А., ассистент, к.т.н.

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

²АО «Научно-производственный центр «Полус»

634050, Россия, г. Томск, пр. Кирова, 56 «в»

E-mail: vmh1@mail.ru

DETERMINATION OF DISTURBING MOMENT OF MAIN PARTS OF SMALL SPACECRAFTS

Khaydukova V.M.¹, Britova Yu.A.^{1,2}

Scientific Supervisor: Assistant lecturer, PhD, Britova Yu.A.

¹Tomsk Polytechnic University

Russia, Tomsk, Lenin ave., 30, 634050

²JSC «Scientific & Industrial Centre «Polyus»

Russia, Tomsk, Kirova ave., 56v, 634050

E-mail: vmh1@mail.ru

Динамическая точность малых космических аппаратов (МКА) с аппаратурой дистанционного зондирования Земли существенно зависит от уровня силовых и моментных возмущений, действующих со стороны работающих бортовых электромеханических устройств – инерционных исполнительных органов