

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА
ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

Татарников Е. В.

Научный руководитель: Гормаков А. Н., доцент, к.т.н.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: E.V.Tatarnikov@mail.ru

DESIGNING OF FIBER OPTIC GYROSCOPE FOR SPACE APPLICATION

Tatarnikov E. V.

Scientific Supervisor: Associate Prof., PhD Gormakov A. N.
Tomsk Polytechnic University
Russia, Tomsk, Lenin ave., 30, 634050
E-mail: E.V.Tatarnikov@mail.ru

Волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) нашли широкое применение в системах управления движением и навигацией летательных аппаратов. Потенциальная точность ВОГ высока и соизмерима с точностью гироскопов на воздушном подвесе. Однако при изготовлении волоконных гироскопов возникает огромное количество внешних и внутренних факторов, вносящих дополнительные погрешности. В данной статье автор делает обзор вредных эффектов и описывает процесс проектирования ВОГ.

Fiber optic gyroscopes (FOG) have found wide application in the systems of movement control and aerospace navigation. FOG has quite high potential accuracy that is comparable with the accuracy of gyroscopes on air suspension. However, in the manufacture of fiber gyroscopes there are huge number of external and internal factors that make additional errors. In this article, the author makes an overview of the harmful effects and describes the process of FOG designing.

Первое описание гироскопа, работающего на принципе Саньяка, было сделано в 1976 году американскими учеными Вали и Шортилло [1]. Луч света в волоконно-оптическом гироскопе проходит через катушку оптоволокна. 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. Волоконно-оптический гироскоп представляет собой сложную систему взаимосвязанных оптических и электронных компонентов. На работоспособность ВОГ влияет огромное количество внешних и внутренних факторов, которые необходимо учитывать при конструировании прибора.

Описание факторов космического полета от момента старта до момента приземления космического аппарата было рассмотрено в статье [2]. К внутренним источникам шумов и нестабильностей относят следующие эффекты: дробовые шумы, обратное Рэлееское рассеяние, температурные градиенты, флуктуации частоты и интенсивности излучателя, электрооптический эффект Керра, магнитооптический эффект Фарадея. Подробное рассмотрение данных факторов есть в книгах [3-5].

Минимальная конфигурация ВОГ [3] состоит из следующих основных элементов: излучатель, оптоволоконная катушка и фотодетектор. Однако, на основе только данных элементов невозможно создать гироскоп с высокой чувствительностью. Для соблюдения принципа взаимности, компенсации вредных факторов и увеличения точности необходимо применять множество дополнительных элементов таких как: поляризаторы, модуляторы, элементы электроники (АЦП, ЦАП, ЦП) и т.д. Принимая во внимание принципы и факторы, влияющие на точность ВОГ, была выбрана схема гироскопа, включающая в себя минимальный набор элементов необходимых, но достаточных для построения прибора высокой точности. Конфигурация проектируемого ВОГ приведена на рисунке 1.

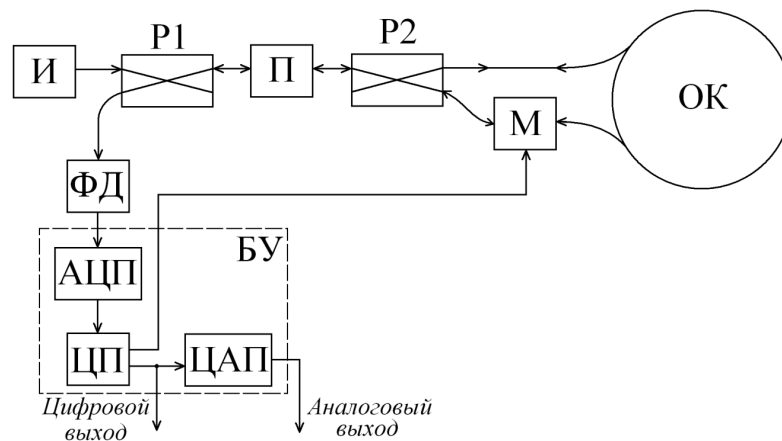


Рис. 1. Конфигурация ВОГ:

И – излучатель; *P1*, *P2* – разветвители; *П* – поляризатор; *ОК* – оптоволоконная катушка;
М – модулятор; *ФД* – фотодетектор; *АЦП* – аналого-цифровой преобразователь;
ЦП – центральный процессор; *ЦАП* – цифро-аналоговый преобразователь; *БУ* – блок управления

Источник излучения (*И*) испускает свет, который проходит через разветвитель (*P1*) и затем поляризуется в элементе *П*. С помощью второго разветвителя (*P2*) поток света делится на два пучка, которые затем распространяются по оптоволоконной катушке (*ОК*) в противоположных направлениях. Модулятор вносит дополнительный сдвиг фаз $\pi/2$ и обеспечивает реализацию обратной связи, что улучшает чувствительности и линейность характеристики гироскопа. Далее два пучка света проходят через поляризатор, второй разветвитель (использование двух разветвителей позволяет обеспечить одинаковую длину оптических путей для встречных пучков) и попадают на фотодетектор. Фазовый детектор (*ФД*) переводит фазу Саньяка в электрический сигнал, который затем обрабатывается в блоке управления (*БУ*). *БУ* рассчитывает угловую скорость прибора, а также генерирует переменный сигнал для управления модулятором для приведения фазы рассогласования в ноль. Использование поляризатора, двух разветвителей и одномодового волоконно-оптического контура способствуют выполнению свойства взаимности и позволяют избавиться от нежелательных эффектов, уменьшая дрейф гироскопа.

Проектирование ВОГ необходимо начинать с анализа технического задания (*ТЗ*). В ходе проектирования гироскопа были подробно изучены *ТЗ* на проектирование реальных инерциальных измерительных приборов. Объем *ТЗ* часто составляет сотни страниц, где подробно описываются требуемые характеристики прибора, условия эксплуатации и необходимые испытания, проверки и т.д. Основные точностные характеристики ВОГ могут сильно варьироваться в зависимости от поставленной задачи. Масса проектируемых одноосных волоконно-оптических гироскопов обычно находится в диапазоне от одного до двух килограммов, габариты порядка $120 \times 120 \times 120$ мм.

Проблема проектирования гироскопа заключается в том, что большинство элементов оптики проектируются для нужд скоростной (оптоволоконной) передачи информации. Так как рынок ВОГ относительно небольшой, производители данных гироскопов вынуждены сами производить оптические детали, либо выбирать из того, что предлагают изготовители. Поэтому второй шаг при проектировании волоконных гироскопов - это анализ предлагаемых на рынке оптических элементов и их характеристик.

Выбор элементов начинается с расчета длины оптического волокна. В ВОГ применяются одномодовые волокна, сохраняющие плоскость поляризации, что позволяет значительно уменьшить шумы, а следовательно, значительно повысить чувствительность прибора [6]. Производимые в настоящее время волокна, как

правило, имеют диаметр около 100 мкм, что позволяет делать длинные, но достаточно компактные оптоволоконные катушки.

Для максимальной компенсации обратного когерентного Рэлеевского рассеяния и компенсации эффекта Керра в производстве волоконно-оптических гироскопов применяются источники света с широкой полосой излучения [3]. Подходящими источниками излучения являются лазерные диоды, светодиоды и суперлюминесцентные диоды. Характеристики излучателя выбираются таким образом, чтобы диапазон излучения соответствовал диапазону частот оптоволокна, на котором, согласно паспорту изделия, происходят наименьшие потери света.

Самой важной характеристикой фотодетектора является его чувствительность. Для того чтобы гироскоп соответствовал требованиям, предъявляемым к инерционным навигационным системам, необходимо, чтобы фотодетектор определял разность фаз Саньяка порядка 10^{-7} рад [3]. Фотодетектор выбирается таким образом, чтобы диапазон рабочих длин волны света соответствовал спектру излучателя.

В качестве фотодетекторов применяют полупроводниковые и лавинные фотодиоды (ЛФД) [5]. Полупроводниковые фотодиоды обладают стабильными свойствами, быстродействием, достаточно высокой чувствительностью. Основными погрешностями, вносимыми полупроводниковым фотодиодом являются тепловой шум, дробовой шум и темновой ток. ЛФД уступают полупроводниковым фотодиодам по чувствительности, так как имеют больший темновой ток, однако ЛФД имеют большую квантовую эффективность (отношение количества выходных электронов к входному потоку фотонов). Рабочий диапазон и входная мощность выбираемого фотодетектора должны соответствовать характеристикам выбранного излучателя.

Разветвитель, поляризатор, модулятор позволяют реализовать конструкцию ВОГ в соответствии с рисунком 1 и устраняют вредные факторы, уменьшающие точность гироскопа. Основные свойства, предъявляемые к данным элементам: соответствие диапазона спектру излучателя, малые потери, небольшие размеры и масса.

Элементы электроники (АЦП, ЦП, ЦАП) используются для реализации схемы построения ВОГ с обратной связью, а также позволяют сделать два выходных канала: цифровой и аналоговый.

Таким образом, в статье были описаны источники шумов и нестабильностей ВОГ, произведен краткий обзор и порядок выбора элементов гироскопа с учетом действия вредных факторов, оказывающих влияние на его работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vali V., Shorthill R.W., Fiber ring interferometer, Appl. Opt. 15 (1976) 1099–1100.
2. Татарников Е.В. Влияние факторов космического полета на работу волоконно-оптических гироскопов // Материалы X Международной студенческой электронной научной конференции «Студенческий научный форум» (Электронный ресурс: <https://www.scienceforum.ru/2018/pdf/5265.pdf>) Дата обращения 18.03.2018
3. Шереметьев А.Г. Волоконный оптический гироскоп. – М.: Радио и связь, 1987. – 152 с.: ил.
4. Гущин В.Н. Основы устройства космических аппаратов: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2003. – 272 с.: ил.
5. Бутусов М.М., Галкин С.Л., Оробинский С.П. Волоконная оптика и приборостроение. – Л.: Машиностроение, 1987. — 328 с.
6. Маркузе Д. Оптические волноводы [Текст]: Пер. с англ. / Под ред. [и с предисл.] В. В. Шевченко. - Москва: Мир, 1974. - 576 с.: черт.; 20 см.