

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт автоматики и информационных технологий
Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

Сагингалиева Р.Р

«Волоконно-оптические гироскопы для БПЛА»

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

По образовательной программе 6В06201 – Телекоммуникация

Алматы 2025 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и Информационных технологий

Кафедра Электроники, телекоммуникации и космических технологий

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой ЭТиКТ
Кандидат технических наук
 Таштай Е.Т.
28 «05» 2025 г.

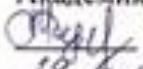
ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Волоконно-оптические гироскопы для БПЛА»

По образовательной программе 6В06201 – Телекоммуникация

Выполнил

 Сагингалиева Р.Р.

Рецензент
К.ф.м.н., профессор НАО
ЛУЭС имени Г.Даукеева
Академик МАИН
 Хизирова М.А.
29 «05» 2025 г.

Научный руководитель
Заведующий кафедрой ЭТиКТ
Кандидат технических наук
 Таштай Е.Т.
28 «05» 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева

Институт автоматизации и информационных технологий
Кафедра «Электроника, телекоммуникации и космические технологии»

6B06201 – Телекоммуникация



ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ
на выполнение ДИПЛОМНОЙ РАБОТЫ

Студенту Сагингалиева Рината Рустамовна

Тема "Волоконно-оптические гироскопы для БПЛА"

Утверждена приказом Ректора Университета № 26-П/Ө от «29» января 2025 г.

Срок сдачи законченной работы "30" апреля 2025 г.

1. Исходные данные к дипломной работе:

- 1.1. Чувствительность: Чувствительность опто-волоконного гироскопа для беспилотных летательных аппаратов - от 0 до 5 рад/с.
- 1.2. Диапазон измерений: Максимальные угловые скорости, которые гироскоп может измерять без искажений, средняя : 5 - 20 рад/с.
- 1.3. Шумовая характеристика: Это уровень случайных колебаний, который может влиять на точность измерений. Низкий уровень шума обеспечивает более стабильные и точные данные. Для гироскопов среднего класса, обеспечивающих хорошую производительность при разумных затратах 90 дБ;
- 1.4. Температурная стабильность: Способность гироскопа сохранять точность и стабильность работы в различных температурных условиях. Это важно для надежности в различных климатических зонах. Температурная стабильность – от -40°C до +85°C .
- 1.5. Размер и вес: Компактные и легкие гироскопы легче интегрировать в для беспилотных летательных аппаратов. Выбрать средний гироскоп :
 - ☐ Размер: до 100 x 100 x 50 мм
 - ☐ Вес: до 0,5 кг

1.6 А также необходимо руководствоваться требованиями международных стандартов:

1.6.1 ISO 9001 - Стандарт, устанавливающий требования к системе управления качеством, который может применяться к производителям оптоволоконных гироскопов для обеспечения их надежности и качества.

1.6.2 MIL-STD-810 - Военный стандарт, описывающий испытания на устойчивость к различным факторам окружающей среды, включая вибрацию, удары и температурные условия, которые важны для гироскопов в сложных условиях эксплуатации.

1.6.3 EC 61508 - Стандарт, касающийся функций безопасности электрических, электронных и программируемых электронных систем, который может применяться к гироскопам в целях обеспечения их безопасности и надежности в навигационных системах.

2.Перечень вопросов, подлежащих исследованию в дипломной работе

2.1 Исследование и обзор существующих технологии по оптоволоконным гироскопам для беспилотных летательных аппаратов;

2.2 Разработать конструкцию оптимальную конструкцию оптоволоконного гироскопа для беспилотных летательных аппаратов с учетом исходных данных п.п. 1.1-1.6

2.3 Рассчитать основные технические параметры оптоволоконного гироскопа ;

2.4 Разработать математическую модель работы оптоволоконного гироскопа и провести симуляционное моделирование его работы в городских условиях, чтобы оценить его эффективность и надежность в различных сценариях. на языке программирования Python.

3.Перечень графического материала: изложить материалы дипломной работы в 15-20 слайдах графического материала;

4. Рекомендуемая основная литература:

1. Сидоров И. К. Основы гироскопической техники. – М.: Техносфера, – 2011. 298 с.
2. Александров Е. В. Практическое руководство по гироскопам. – М.: Инфра-М, – 2013. 185 с.
3. Brown P. Advanced Fiber Optic Gyroscope Technologies. – Boston: McGraw--Hill, – 2013. 320 p.
4. Thompson R. Fiber Optics and Integrated Opto-electronics in Gyroscope Design. – Oxford: Oxford University Press, – 2015. 290 p.
5. Сидоров И. К. Гироскопические системы на основе волоконной оптики. – М.: Техносфера, – 2013. 305 с.
6. Harris M. Innovations in Fiber Optic Gyroscopes. – New York: Academic Press, – 2016. 330 p.

7. 9. Wilson T. Optical Fiber Gyroscope Development and Applications. – London: Elsevier, – 2018. 280 p.
8. Wenzhu Huang, Wentao Zhang, Li Li, Heng Zhang, Fang Li, Review on Low-Noise Broadband Fiber Optic Seismic Sensor and Its Applications, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 41, NO. 13, JULY 1, 2023
9. Yue Yang, Zhongmin Wang, Tianying Chang, Miao Yu, Junjie Chen, Guodong Zheng, Hong Liang Cui, Seismic Observation and Analysis Based on Three-Component Fiber Optic Seismometer, IEEE Access Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2019.2961963 (2020).
10. Changbo Hou, Guowei Liu, Shuai Guo, Shuaifei Tian, Yonggui Yuan, Large Dynamic Range and High Sensitivity PGC Demodulation Technique for Tri-Component Fiber Optic Seismometer, IEEE Access Special section on artificial intelligence for physical-layer wireless communications Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2020.2966280 (2020).
11. Wilson T. Optical Fiber Gyroscope Development and Applications. – London: Elsevier, – 2018. 280 p.
12. Wentao Zhang, Wenzhu Huang, Yibo Wang, Yi Yao, Jianxiang Zhang, Bing Lv, Fang Li, Field Test of Broadband Fiber Optic Interferometric Seismometer, Asia Communications and Photonics Conference 2020 © OSA 2020.
13. Leszek R. Jaroszewicz, Zbigniew Krajewski, Fibre-Optic Rotational Seismometer as Device for Detection the Seismic Rotational Events, 2007 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference IMTC 10.1109/IMTC.2007.379438 2007.
14. Thompson R. Fiber Optics and Integrated Opto-electronics in Gyroscope Design. – Oxford: Oxford University Press, – 2015. 290 p.
15. Zhang Wentao, Huang Wenzhu, Li Fang. High-resolution fiber Bragg grating sensor and its applications of geophysical exploration, seismic observation and marine engineering[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(9): 170615. doi: 10.12086/oee.2018.170615

ГРАФИК
подготовки дипломной работы

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
1	2	3
1.Исследование и обзор существующих технологии по оптоволоконным гироскопам для беспилотных летательных аппаратов;	1.09.2024-31.12.2024	Промежуточный Отчет по ДР до 08.12.2024. Отчет – не менее 10 стр и 4 слайда
2.Разработать конструкцию оптимальную конструкцию оптоволоконного гироскопа для беспилотных летательных аппаратов с учетом исходных данных в п.п. 1.1-1.6	1.01.2025-31.03.2025	Отчет – не менее 10 стр и до 7 слайдов
3. Рассчитать основные технические параметры оптоволоконного гироскопа ;	1.04.2025-31.10.2025	Модель системы сбора данных и до 5 слайдов
4.Разработать математическую модель работы оптоволоконного гироскопа и провести симуляционное моделирование его работы в городских условиях, чтобы оценить его эффективность и надежность в различных сценариях. на языке программирования Python.	01.11.2025-01.02.2025	Коды и отработка кодов Не менее 5 стр и до 7 слайдов

5. Отработка компонентов оптоволоконного гироскопа, SWOT анализ	02.02.2025-15.04.2025	Отчет не менее 5 стр и два слайда
6. Формирование разделов и оформление диссертационной работы в соответствии с требованиями СТ КазНУТУ 09-2019	01.04.2025-30.04.2025	Окончательная версия дипломной работы не более 30 стр (без учета Приложений) и не менее 15 слайдов. Справка антиплагиата. Отзыв и Рецензия

Подпись

консультантов и нормоконтролера на законченную ДР с указанием относящихся к ним разделов дипломной работы

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Нормоконтролер	Росбаев М. И., PhD	23.06.25	

Научный руководитель  Таштай Е

Задание принял к исполнению обучающийся  Сагинжалиева Р

Дата " 03 " 01 2025 г

АНДАТПА

Бұл дипломдық жұмыста талшықты-оптикалық гироскоптардың (ТОГ) жұмыс істеу принциптері, құрылымдық ерекшеліктері және қолдану салалары қарастырылады. ТОГ жұмысының физикалық негіздеріне, атап айтқанда, айналмалы қозғалыс жылдамдығын өлшеуге мүмкіндік беретін Саньяк эффектісіне ерекше назар аударылды. Талшықты-оптикалық гироскоптардың дәстүрлі механикалық және лазерлік гироскоптармен салыстырғандағы артықшылықтары талданды — олардың дәлдігі жоғары, қозғалатын бөліктері жоқ және сыртқы әсерлерге төзімді. Сонымен қатар ТОГ құрылымдарының негізгі сызбалары мен осы технологияның заманауи даму үрдістері қарастырылды.

АННОТАЦИЯ

В данной дипломной работе рассматриваются принципы работы, конструктивные особенности и области применения волоконно-оптических гироскопов (ВОГ). Акцент сделан на физических основах функционирования ВОГ, включая эффект Саньяка, лежащий в основе измерения угловой скорости. Проанализированы преимущества волоконно-оптических гироскопов по сравнению с традиционными механическими и лазерными гироскопами, в частности высокая точность, отсутствие подвижных частей и устойчивость к внешним воздействиям. Также рассмотрены основные схемы построения ВОГ и современные тенденции развития этой технологии.

ANNOTATION

This thesis discusses the principles of operation, design features and applications of fiber-optic gyroscopes (VOG). The emphasis is placed on the physical foundations of the functioning of the VOG, including the Sagnac effect, which underlies the measurement of angular velocity. The advantages of fiber-optic gyroscopes in comparison with traditional mechanical and laser gyroscopes are analyzed, in particular, high accuracy, absence of moving parts and resistance to external influences. The main schemes of the VOG construction and current trends in the development of this technology are also considered. In the practical part, the operation of the gyroscope is modeled, and recommendations for improving its characteristics are proposed. The work can be useful in designing high-precision inertial navigation systems for aviation, navy, spacecraft and robotics.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	10
1 Исследование и обзор существующих технологий по оптоволоконным гироскопам для беспилотных летательных аппаратов	13
1.1 История развития БПЛА	13
1.2 Применение ВОД в БПЛА	16
1.3 Тенденции и перспективы развития гироскопов для беспилотников	20
2 Разработатка оптимальной конструкции оптоволоконного гироскопа для беспилотных летательных аппаратов	23
2.1 Принципы работы ВОГ	26
2.2 Схема разработанного ВОГ с использованием исходных данных	28
2.3 Оптимальная конструкция ВОГ для БПЛА	29
3 Расчет основных технических параметров оптоволоконного гироскопа	32
4 Разработатка математической модели работы оптоволоконного гироскопа	35
5 Отработка компонентов оптоволоконного гироскопа, SWOT анализ	40
Заключение	43
Список использованной литературы	45

ВВЕДЕНИЕ

Современные беспилотные летательные аппараты активно внедряются в различных сферах: от мониторинга экосистем, геодезических работ до разведки и логистики грузов. Важной составляющей для этих аппаратов является их способность функционировать стабильно при разнообразных атмосферных и внешних влияниях, требующих высокой точности навигации. Сердцем системы ориентации выступает гироскопическое оборудование, определяющее угловые изменения положения. Однако с прогрессом технологий традиционные механические и кортикальные гироскопы уступают место инновациям — волоконно-оптическим гироскопам (ВОГ). Эти устройства основаны на принципе Сазерленда-Баллина, где измерения угловых отклонений осуществляются с помощью световых сигналов в оптоволокне. Такой механизм исключает подвижные элементы и обеспечивает ряд значительных преимуществ: повышенную точность, надежность благодаря отсутствию движущихся частей и устойчивость к внешним механическим воздействиям. Цель исследования заключается в глубоком анализе особенностей применения волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) в системах навигации БПЛА, сравнении их достоинств и недостатков с классическими типами гироскопического оборудования. Кроме того, предполагается разработка стратегий интеграции ВОГ в существующие системы управления беспилотников для повышения точности маневрирования и общих характеристик надежности. Таким образом, актуальность внедрения волоконно-оптических технологий в навигационные комплексы БПЛА неоспорима, открывая новые горизонты развития этой отрасли.

Индустрия беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) стремительно развивается, находя широкое применение в различных сферах. В военной отрасли БПЛА используются для разведки, наблюдения, тактических операций и нанесения ударов. Их применение позволяет минимизировать риски для пилотируемой авиации и проводить операции в сложных и опасных условиях. В коммерческом секторе беспилотные аппараты становятся важной частью логистики, сельского хозяйства, строительства и мониторинга окружающей среды. Компании, такие как Amazon и UPS, уже тестируют дроны для доставки товаров, что сокращает время и стоимость логистических процессов. В сельском хозяйстве беспилотные летательные аппараты помогают оптимизировать использование удобрений и воды, анализируя состояние посевов с воздуха. В научной сфере БПЛА играют ключевую роль в мониторинге климата, изучении вулканической активности, исследовании биологических видов и картографировании удаленных территорий.

Для эффективного функционирования БПЛА критически важны точные и надежные системы навигации. Ошибки в ориентации или позиционировании могут привести к сбоям в работе аппарата, потере управления и даже авариям. В

условиях, когда требуется автономность полетов, использование систем глобального позиционирования (GPS) в сочетании с инерциальными навигационными системами (ИНС) становится необходимым. ИНС позволяют дрону ориентироваться в пространстве, даже если сигнал GPS отсутствует или заглушен. Ключевым элементом инерциальных систем являются гироскопы, которые измеряют угловые скорости и помогают определять положение аппарата в пространстве.

Гироскопы играют важнейшую роль в навигации беспилотных летательных аппаратов. Традиционные механические гироскопы, использующие вращающиеся массы, обладают существенными недостатками, такими как износ, чувствительность к вибрациям и необходимость регулярного обслуживания. В связи с этим на смену им приходят более совершенные технологии, в частности, волоконно-оптические гироскопы (ВОГ).

Волоконно-оптические гироскопы работают на основе эффекта Саньяка, который заключается в том, что свет, проходящий по замкнутому оптоволоконному контуру в противоположных направлениях, испытывает фазовый сдвиг при изменении ориентации устройства. Это позволяет с высокой точностью измерять угловую скорость и, следовательно, определять положение летательного аппарата.

Преимущества ВОГ перед механическими гироскопами включают:

- Высокую точность: Использование интерференции световых волн позволяет достигать крайне малых ошибок в измерении угловой скорости, что делает их незаменимыми в задачах точной навигации;
- Малый вес и компактность: Отсутствие движущихся частей снижает массу устройства и позволяет использовать его в малогабаритных БПЛА, где критичен каждый грамм веса;
- Долговечность и надежность: Поскольку ВОГ не содержит механических элементов, он не подвержен износу, что увеличивает срок его службы и снижает необходимость в техническом обслуживании;
- Устойчивость к внешним факторам: Волоконно-оптические гироскопы менее чувствительны к вибрациям, ударам и перегрузкам, что особенно важно при эксплуатации БПЛА в экстремальных условиях.

На сегодняшний день ведутся активные исследования в области волоконно-оптических гироскопов, направленные на улучшение их характеристик. Современные ВОГ достигают высокой точности измерений и широко используются в авиационных и космических системах. Однако существуют некоторые ограничения:

Настоящее исследование направлено на поиск решений для устранения этих недостатков и дальнейшее совершенствование волоконно-оптических гироскопов для использования в БПЛА, обеспечивая их более высокую эффективность и надежность.

Современные научные разработки в области ВОГ направлены на:

- Улучшение чувствительности за счет новых типов оптических волокон и улучшенной электроники обработки сигналов.

- Разработку гибридных инерциальных систем, сочетающих ВОГ с другими сенсорами, такими как лазерные гироскопы и магнитометры.

- Снижение энергопотребления для продления времени автономной работы БПЛА.

- Использование новых материалов для улучшенной термостабильности защиты от внешних факторов.

Рост индустрии беспилотных летательных аппаратов требует совершенствования навигационных систем, в которых ВОГ играют ключевую роль. Волоконно-оптические гироскопы обладают значительными преимуществами перед механическими гироскопами, включая высокую точность, малый вес, долговечность и устойчивость к внешним воздействиям. Тем не менее, остаются определенные вызовы, такие как высокая стоимость и необходимость улучшения температурной стабильности.

Настоящая работа направлена на анализ существующих технологий ВОГ, выявление их недостатков и разработку новых решений для повышения эффективности их применения в беспилотных летательных аппаратах. Улучшение характеристик волоконно-оптических гироскопов станет важным шагом в развитии автономных систем навигации и управления БПЛА.

1 Исследование и обзор существующих технологий по оптоволоконным гироскопам для беспилотных летательных аппаратов

Традиционная система с использованием гироскопов утрачивает свои лидирующие позиции, их вытесняют современные микроэлектромеханические (МЭМС) устройства на кремниевой основе, а также волоконно-оптические и лазерные технологии, включая твердотельные осцилляционные гироскопы. Особенно это заметно в сферах техники, где критичными являются компактность размеров и снижение себестоимости для систем навигации, ориентации, стабилизации и управления. Микроэлектромеханические гироскопы активно внедряются при создании беспилотных летательных аппаратов, микрокапсульных спутников, автотехники (включая тактические ракетные комплексы), вертолётов, робототехнических систем и даже в игровой индустрии. Их применение также расширяется в геологии, гравиметрии и других областях. Несмотря на это, эксплуатация «классической» гироаппаратуры продолжает сохраняться: старые модели гироприборов (свыше 25 лет) остаются актуальными для баллистических ракетных систем, авиации (гировертикалей и гирокурсоверов), морских судов и подводных аппаратов. Включая такие устройства как демпфирующие гироскопы, угловые скоростные датчики в бескарданных инерциальных системах. Основные теоретические принципы «старой» гиротехники продолжают находить применение и развитие при создании современной гироприборной базы нового поколения [1].

Фундаментальной частью всех гироскопических приборов, в том числе и гирокомпасов, представляется гироскоп. В общей динамике твердого тела гироскопом именуется тело свободной формы, совершающее спин близ одной прикрепленной точки, являющейся его опорой. Впрочем, в гироскопических приборах используются гироскопы в виде веских динамически симметричных дисков, совершающих скорое вращение вокруг оси симметрии и имеющих такую систему подвеса, которая позволяет осям их личного верчения беспрепятственно менять направленность

Следовательно, в технике гироскопом именуется тяжелое быстровращающееся симметричное твердое тело, ось вращения которого возможно изменять свое направленность относительно любой системы координат, не объединенной с гироскопом.

Название «гироскоп» происходит от греческих слов «гирос» и «скопейн», что в переводе отмечает «наблюдать вращение».

1.1 История развития БПЛА

Развитие беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) берет свое начало в начале XX века, когда военные инженеры начали экспериментировать с

автоматическими и дистанционно управляемыми летательными аппаратами. Первые прототипы были созданы в годы Первой мировой войны, однако из-за технологических ограничений их использование было минимальным.



Рисунок 1.1 – Виды БПЛА

Ранние разработки (1910-е – 1930-е годы)

Одним из первых примеров беспилотного летательного аппарата можно назвать британский "Aerial Target" (1917 г.), который разрабатывался как управляемый по радио самолет-снаряд. В США в 1918 году была создана аналогичная модель Kettering Bug, представляющая собой предшественника современных крылатых ракет. Однако из-за несовершенства технологий эти разработки не получили широкого применения. Первые попытки создания беспилотных летательных аппаратов связаны с военной авиацией Первой мировой войны. Основная идея заключалась в том, чтобы использовать самолеты без пилота для разведки или атак противника.

- 1917 г. – Aerial Target, первый в мире радиоуправляемый самолет-снаряд. Однако из-за несовершенства технологий проект не получил практического применения.

- 1918 г. – в США инженер Чарльз Кеттеринг разработал Kettering Bug, прототип крылатой ракеты, способной нести заряд на 120 км. Однако к моменту окончания войны проект не успели внедрить [2].

В межвоенные годы начались эксперименты с радиоуправляемыми самолетами. В 1935 году британский самолет DH.82 Queen Bee стал одним из первых серийных БПЛА, используемых для тренировки зенитных расчетов.

Именно от его названия произошло слово drone (жужжание пчелы), которое впоследствии стало синонимом беспилотных летательных аппаратов.

Вторая мировая война и послевоенный период (1940-е – 1960-е годы)

Во время Второй мировой войны использование беспилотных технологий активизировалось. В частности, немецкие ФАУ-1 и ФАУ-2, по сути, были беспилотными летательными аппаратами с программируемыми маршрутами. В США и Великобритании проводились эксперименты с радиоуправляемыми бомбардировщиками, предназначенными для ударных миссий.

В 1950-60-х годах БПЛА стали применяться для разведки и наблюдения. В этот период началась активная разработка американских разведывательных дронов, таких как Firebee, который использовался в ходе Вьетнамской войны для сбора данных и аэрофотосъемки [3-4].

Холодная война и технологический прогресс (1970-е – 1990-е годы)

С развитием электроники, навигационных систем и миниатюризации технологий в 1970-х и 1980-х годах БПЛА стали более эффективными и широко использовались в военных целях. Израиль стал одной из первых стран, массово использующих беспилотные аппараты в боевых условиях (например, Tadiran Mastiff и IAI Scout).

К концу 1990-х годов США активно внедряли беспилотники в военные операции. Одним из наиболее известных аппаратов стал MQ-1 Predator, который мог не только вести разведку, но и выполнять удары с воздуха, используя управляемые ракеты. Резкое развитие электроники и GPS в конце XX века сделало возможным создание более автономных и точных БПЛА. В этот период появились первые ударные беспилотники.

- 1995 г. – США создают MQ-1 Predator, ставший первой платформой для вооруженных беспилотников.

- 1999 г. – Predator впервые применяется в боевых условиях в Косово.

В России в это время развитие БПЛА шло медленнее, но в 2000-е годы появились проекты «Орлан-10» и «Форпост», ставшие основой для дальнейшего развития дронов в стране

Современный этап развития (2000-е – настоящее время)

С начала XXI века беспилотные летательные аппараты начали активно использоваться не только в военной, но и в гражданской сфере. Современные дроны применяются в логистике, мониторинге окружающей среды, сельском хозяйстве, строительстве и даже для кинематографической съемки. Сегодня технологии БПЛА продолжают развиваться, делая их более автономными, эффективными и доступными. Системы навигации играют ключевую роль в их работе, а использование инновационных решений, таких как волоконно-оптические гироскопы, способствует повышению точности и надежности управления.

С 2010-х годов технологии БПЛА вышли далеко за пределы военной сферы. Сегодня беспилотники применяются повсеместно: в логистике, сельском

хозяйстве, геодезии, спасательных операциях и даже в доставке товаров.

- 2015 г. – дрон MQ-9 Reaper становится основной ударной платформой для армии США;

- 2019-2022 гг. – Турция активно использует Bayraktar TB2 в Сирии, Ливии, а затем в Украине.

Сегодня дроны продолжают развиваться, становясь умнее, автономнее и эффективнее [5].

Индустрия беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) стремительно развивается, находя широкое применение в различных сферах. В военной отрасли БПЛА используются для разведки, наблюдения, тактических операций и нанесения ударов. Их применение позволяет минимизировать риски для пилотируемой авиации и проводить операции в сложных и опасных условиях. В коммерческом секторе беспилотные аппараты становятся важной частью логистики, сельского хозяйства, строительства и мониторинга окружающей среды. Компании, такие как Amazon и UPS, уже тестируют дроны для доставки товаров, что сокращает время и стоимость логистических процессов. В сельском хозяйстве беспилотные летательные аппараты помогают оптимизировать использование удобрений и воды, анализируя состояние посевов с воздуха. В научной сфере БПЛА играют ключевую роль в мониторинге климата, изучении вулканической активности, исследовании биологических видов и картографировании удаленных территорий.

Для эффективного функционирования БПЛА критически важны точные и надежные системы навигации. Ошибки в ориентации или позиционировании могут привести к сбоям в работе аппарата, потере управления и даже авариям. В условиях, когда требуется автономность полетов, использование систем глобального позиционирования (GPS) в сочетании с инерциальными навигационными системами (ИНС) становится необходимым. ИНС позволяют дрону ориентироваться в пространстве, даже если сигнал GPS отсутствует или заглушен. Ключевым элементом инерциальных систем являются гироскопы, которые измеряют угловые скорости и помогают определять положение аппарата в пространстве.

1.2 Применение ВОД в БПЛА

Перед тем, как рассказать вам о волоконно-оптических датчиках, нужно рассмотреть как изначально проводится работа. В современном мире оптическое волокно состоит из сердцевины, с помощью которой производится свет. С наружной стороны оптоволокно защищает полимерная пленка. Сердцевина выглядит как линия из стекла или пластика. В составе которой, можно встретить химический элемент германий. Он используется для высокой эффективности преломления [3].

Волоконно-оптические схемы представляют собой прогрессивные методы измерения и передачи данных, которые активно используются в различных областях, включая авиацию и робототехнику. В последние годы волоконно-оптические детекторы получили применение своих систем в беспилотных летательных аппаратах (БПЛА). Эти датчики играют важную роль в обеспечении правильной работы БПЛА, включая зону навигации, прогнозирование состояния агрегата и обнаружение внешних воздействий. Внедрение оптоволоконных счетчиков в системы БПЛА открывает новые горизонты для развития технологий в области беспилотных систем.

Базы волоконно-оптических измерителей.

Волоконно-оптические детекторы используют волокна для передачи света и измерения различных физических величин, таких как температура, давление, напряжение, вибрация и другие параметры. Эти датчики основаны на использовании оптических волокон-тонких стеклянных или пластиковых нитей, которые проводят свет от источника к детектору, в то время как изменение физических параметров влияет на параметры света, такие как интенсивность, длина волны или время.

Существует несколько разновидностей волоконно-оптических датчиков, в том числе:

- Детекторы на основе отражения: эти датчики измеряют изменения в потоке света от различных ветвей оптических волокон. Изменения физического состояния (например, напряжения, температуры) могут влиять на выраженные признаки, и эти изменения могут быть идентифицированы и интерпретированы как данные внешней среды.

- Детекторы на основе распространения: такие датчики используют принцип световых помех. небольшие изменения параметров, такие как давление или вибрация, могут изменить барьер модели, что, несомненно, позволяет нам определять изменения в количествах тела.

Резонансные детекторы: это тип звука по принципу изменения резонансной частоты в оптоволоконной линии. Такие детекторы очень полезны для измерения деформаций и напряжений.

Минимальные и интегрированные оптические датчики: в последние годы появились более мелкие интегрированные решения для использования в различных областях, включая БПЛА, где требуется минимизация веса и максимальная эффективность.

Использование волоконно-оптических измерителей в БПЛА:

Навигация и ориентация.

Оптоволоконные счетчики играют значительную роль в навигационных и ориентационных системах БПЛА. Используя принцип работы инерциальных измерительных систем, оптоволоконные детекторы, несомненно, могут определять угловые и ускоряющие скорости, что позволяет определять

положение БПЛА в пространстве. Это особенно важно для самостоятельных полетов, где для правильного натяжения агрегата и его стабилизации полета требуется высокая точность.

В БПЛА, использующих оптоволоконные гироскопы (ВОГ), он может значительно повысить точность навигации, что особенно не одобряется в условиях ограниченного сигнала GPS или его полного отсутствия, например, в городских или горных местностях. Эти гироскопы могут продуктивно работать в условиях сильных импульсов и высокой динамики.

Механический мониторинг.

Волоконно-оптические датчики также могут использоваться для мониторинга механического состояния БПЛА. Например, они могут обнаруживать напряжения, деформации и вибрации в различных частях аппарата, таких как крылья, шасси, двигатель и другие конструктивные элементы. Измерение напряжений и деформаций в режиме реального времени позволяет эффективно отслеживать положение БПЛА и предотвращать возможные повреждения или чрезвычайные ситуации. Кроме того, могут использоваться датчики для анализа действий БПЛА в различных режимах полета, включая маневры с высокой нагрузкой.

Тепловой мониторинг.

Датчики оптического волокна можно использовать для того чтобы предсказать температуру в различных частях БПЛА. Изменения температуры могут существенно повлиять на производительность электроники, устройств и других компонентов дронов. Использование волоконно-оптических датчиков позволяет точно измерять температуру без риска короткого замыкания или перегрева, поскольку они изолированы от внешних воздействий. Тепловой мониторинг особенно важен для БПЛА в условиях экстремальных колебаний температуры, например, в высокогорных районах или в циркумполярных условиях. Оптические датчики обеспечивают точную информацию о температуре, что помогает принимать эффективные меры для защиты оборудования.

Создание внешних воздействий и потерь.

Волоконно-оптические датчики могут использоваться для обнаружения утечек или повреждений в различных системах БПЛА. Например, их можно использовать для мониторинга состояния топливных или гидравлических систем, а также для обнаружения утечек воздуха или других веществ. Такие детекторы позволяют обнаруживать минимальные изменения с течением времени, что может привести к ненормальным ситуациям или аварийным повреждениям.

Волоконно-оптические датчики также могут быть интегрированы в системы мониторинга окружающей среды, например, для обнаружения изменений температуры или влажности в критических областях БПЛА, таких как батареи или двигатели.

Оптические датчики для систем связи.

В последнее время растет интерес к использованию волоконно-оптических технологий для улучшения систем связи на борту БПЛА. Такие системы могут осуществлять высокоскоростную передачу информации между различными частями БПЛА и с внешним управлением. Волоконно-оптические системы связи могут значительно увеличить ширину и срок службы канала передачи данных, что очень важно для передачи видеосигналов и других больших объемов данных.

Мониторинг вибраций и акустических параметров.

Звуковые колебания и вибрации могут сильно повлиять на стабильность и надежность БПЛА. Волоконно-оптические датчики могут использоваться для мониторинга этих параметров, которые также обнаруживают небольшие изменения в вибрациях и звуках. Такие датчики могут использоваться для анализа работы машин, стабилизаторов и других динамических систем БПЛА. Для более эффективного управления полетом важно выявить любые отклонения от нормальной работы двигателя, чтобы принять немедленные меры для исправления полета.

Использование в сложных условиях.

Волоконно-оптические датчики очень полезны для БПЛА, работающих в интенсивных или опасных условиях работы, например, в районах с высоким уровнем радиации или в промышленных зонах с потенциальными электромагнитными помехами. В таких условиях классические электрические датчики могут работать со сбоями, в то время как оптические датчики остаются эффективными и стабильными в любой внешней среде.

Интеграция оптоволоконных датчиков в БПЛА.

Интеграция оптоволоконных датчиков в БПЛА требует разработки специальных интерфейсов и адаптеров для подключения датчиков к системе управления транспортным средством. Эти датчики должны располагаться таким образом, чтобы не мешать движению БПЛА и не увеличивать его вес, что может повлиять на летные характеристики.

Для этого разрабатываются новые способы упаковки и миниатюризации волоконно-оптических компонентов, а также инновационные методы передачи данных с использованием оптических волокон. Важно учитывать, что оптимальное расположение датчиков и их интеграция в систему управления полетом БПЛА являются основными условиями обеспечения эффективной работы двигателя.

Датчики оптического волокна предлагают уникальную возможность увеличить точность, надежность и функциональность БПЛА. Эти датчики играют значительную роль в навигационных системах, мониторинге условий и взаимодействии с внешней средой. Развитие технологии волоконно-оптических детекторов продолжает открывать новые горизонты для использования беспилотных летательных аппаратов в различных областях, от гражданской авиации до военных и промышленных применений [1].

1.3 Тенденции и перспективы развития гироскопов для беспилотников

Современные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) становятся неотъемлемой частью военной, коммерческой и научной сфер. Их применение варьируется от разведывательных операций и атакующих миссий до мониторинга окружающей среды, сельского хозяйства и доставки грузов. Однако, для успешного выполнения задач БПЛА должны обладать высокоточной навигацией, особенно в условиях, где сигнал спутниковых систем позиционирования (GNSS) может быть заглушен или недоступен.

Ключевую роль в обеспечении автономности и стабильности навигации играют гироскопы, которые измеряют угловую скорость и помогают поддерживать ориентацию летательного аппарата. За последние несколько десятилетий гироскопы прошли значительную эволюцию: от механических систем до квантовых технологий. Их миниатюризация, повышение точности и интеграция с системами искусственного интеллекта позволяют БПЛА становиться более автономными и эффективными.

Исторически первыми использовались механические гироскопы, которые базировались на принципе сохранения углового момента вращающегося тела. Они активно применялись в авиации, но имели серьезные недостатки: высокую чувствительность к вибрациям, подверженность износу и необходимость регулярного обслуживания. По мере развития технологий их заменили лазерные гироскопы (Ring Laser Gyroscopes, RLG). Они работают на основе эффекта Саньяка, при котором лазерные лучи, проходя по замкнутому контуру, испытывают фазовый сдвиг при изменении ориентации устройства. Эти гироскопы обладают высокой точностью и долговечностью, так как не имеют движущихся частей, но они достаточно дорогостоящие и требуют калибровки. Следующим этапом эволюции стали волоконно-оптические гироскопы (Fiber Optic Gyroscopes), которые также используют эффект Саньяка, но вместо зеркал применяют длинное оптоволоконное кольцо. Они обладают высокой точностью, компактностью и устойчивостью к внешним механическим воздействиям, что делает их идеальными для БПЛА военного назначения, таких как MQ-9 Reaper и Bayraktar TB2.

Однако для массового рынка дронов и небольших автономных БПЛА были разработаны микроэлектромеханические гироскопы (MEMS – Micro-Electro-Mechanical Systems). Эти гироскопы компактны, дешевы и энергосберегающие, что делает их популярными в коммерческих дронах, например, DJI Phantom. Их главным недостатком является высокий уровень дрейфа, из-за чего они не могут использоваться для длительных автономных миссий без внешней коррекции. Современные тенденции в развитии гироскопов связаны с их миниатюризацией и интеграцией с инерциальными навигационными системами (ИНС). Производители стремятся уменьшить размеры гироскопов без потери точности.

Это особенно важно для малых БПЛА, где каждый грамм веса влияет на продолжительность полета и маневренность. Также гироскопы все чаще дополняются дополнительными датчиками, такими как акселерометры и магнитометры, что позволяет компенсировать ошибки измерений и улучшить стабильность навигации.

Другим ключевым направлением развития является повышение точности гироскопов и снижение дрейфа. Современные методы фильтрации данных, включая фильтрацию Калмана, позволяют значительно сократить ошибки инерциальных навигационных систем. Также ведутся исследования в области оптических резонаторов и наноструктур, которые могут значительно повысить стабильность лазерных и волоконно-оптических гироскопов.

Одной из наиболее перспективных технологий будущего являются квантовые гироскопы, основанные на принципе квантовой интерференции атомов. Эти устройства обеспечивают исключительную точность измерений и не зависят от внешних сигналов, таких как GPS. Это делает их особенно важными для военных и разведывательных миссий, где противник может применять глушение спутниковых сигналов. Ожидается, что первые серийные квантовые гироскопы появятся к 2030 году и станут неотъемлемой частью автономных летательных аппаратов.

Еще одной важной тенденцией является использование искусственного интеллекта для адаптивной коррекции гироскопов. Алгоритмы машинного обучения способны анализировать и компенсировать ошибки MEMS-гироскопов, что делает их более точными. В ближайшие годы можно ожидать, что системы AI будут активно внедряться в инерциальные навигационные системы БПЛА, повышая их автономность и надежность.

Перспективы развития гироскопов связаны не только с улучшением их характеристик, но и с интеграцией новых сенсоров, таких как квантовые акселерометры и гравиметрические датчики. Это позволит беспилотникам работать в условиях полного отсутствия навигационных сигналов, что особенно важно для подземных и подводных БПЛА.

Также активно ведутся разработки по созданию гиперзвуковых БПЛА, для которых требуются сверхточные гироскопические системы, способные функционировать в условиях экстремальных перегрузок. Для этого применяются новые материалы и алгоритмы стабилизации, основанные на квантовой механике.

В заключение можно отметить, что развитие гироскопов является одним из ключевых факторов повышения автономности и эффективности БПЛА.

- Улучшение алгоритмов компенсации дрейфа с использованием AI.
- Миниатюризацию гироскопов для нанодронов и компактных автономных систем.

Несмотря на свои преимущества, волоконно-оптические гироскопы сталкиваются с некоторыми техническими вызовами. Одним из таких является высокая стоимость производства и сложности в массовом производстве, что ограничивает их широкое использование в определенных сегментах рынка. Тем не менее, с развитием технологий и снижением стоимости компонентов, можно ожидать, что волоконно-оптические гироскопы будут становиться все более доступными и распространенными в различных сферах. В перспективе ВОГ продолжают занимать важное место в системах навигации, ориентирования и стабилизации. Их развитие откроет новые возможности для точных и надежных технологий, что особенно важно для высокотехнологичных отраслей, таких как аэрокосмическая, оборонная и автомобильная промышленности, а также для перспективных направлений, таких как беспилотные летательные аппараты и автономные транспортные системы. В заключение, волоконно-оптические гироскопы представляют собой важное технологическое достижение, которое находит широкое применение в различных высокоточных системах.

2 Разработатка оптимальной конструкции оптоволоконного гироскопа для беспилотных летательных аппаратов

Волоконно-оптические датчики (ВОД) стали важным элементом в различных областях, включая беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Эти датчики используются для измерения различных физических величин, таких как температура, давление, вибрация и другие параметры. Они имеют ряд преимуществ, таких как высокая точность, устойчивость к электромагнитным помехам, высокая чувствительность и способность работать в жестких условиях. Внедрение волоконно-оптических технологий в БПЛА стало важным этапом в их развитии, особенно с учетом растущих требований к точности и безопасности при выполнении различных миссий. С развитием беспилотных летательных аппаратов волоконно-оптические датчики начали использоваться для различных целей, таких как мониторинг состояния аппарата, улучшение навигации и управления, а также для обеспечения безопасности и повышения эффективности.

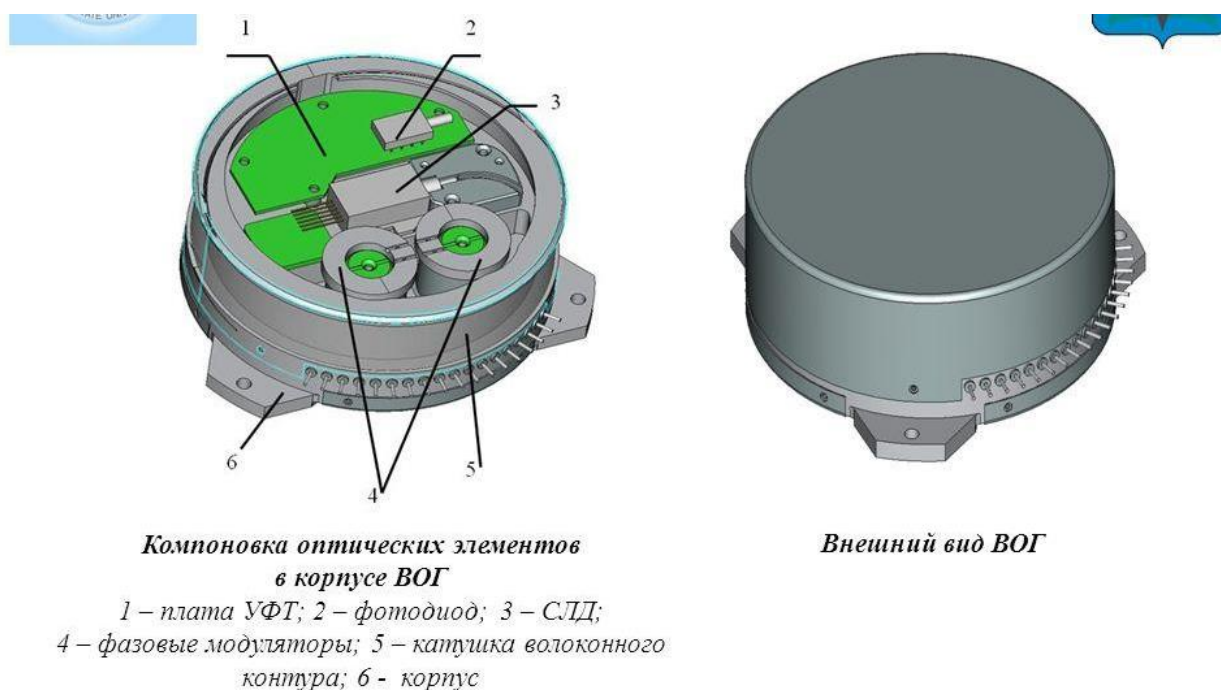


Рисунок 2.1 – Конструкция ВОГ

Применение в следующих областях:

Мониторинг структуры БПЛА: Использование волоконно-оптических датчиков для мониторинга напряжений, деформаций и вибраций в структуре беспилотника. Это позволяет своевременно выявлять потенциальные повреждения или недостатки в конструкции.

- Измерение скорости и положения: В некоторых случаях волоконно-

оптические датчики могут использоваться для точного измерения скорости и положения аппарата, что улучшает его навигационные возможности.

- Контроль окружающей среды: Волоконно-оптические датчики могут также использоваться для измерения температуры, влажности и других параметров окружающей среды, что может быть важно при выполнении различных типов миссий (например, научные исследования, военные операции и спасательные работы) [6].

История и развитие технологии волоконно-оптических датчиков.

Технология волоконно-оптических датчиков начала развиваться в середине 20 века, когда появились первые системы оптической связи на основе волокон. Вначале эти технологии использовались преимущественно в телекоммуникациях, однако с развитием научных исследований стало понятно, что они могут найти применение и в других областях, включая аэрокосмическую промышленность.

- 1960-е годы: Открытие лазера и развитие оптоволоконных технологий стало основой для создания волоконно-оптических датчиков. Первый эксперимент с использованием оптоволокна для передачи света был проведен в 1966 году Кларенсом Шарпи и доктором Джерардом Босс.

- 1980-е годы: Развитие технологий оптического волокна позволило создать более точные и надежные датчики. С этого времени началась активная разработка волоконно-оптических систем, включая датчики для различных применений, таких как мониторинг температуры и давления.

- 1990-е годы: Применение волоконно-оптических датчиков начало расширяться за счет улучшения материалов для волокон и сенсоров, а также появления новых методов интеграции с различными системами, включая БПЛА. Первая компания, использовавшая волоконно-оптические датчики в БПЛА:

Применение волоконно-оптических датчиков в БПЛА стало активно развиваться в 2000-е годы, когда компании начали осознавать преимущества этих технологий для повышения точности и надежности работы БПЛА. Одной из первых компаний, которая активно внедрила волоконно-оптические датчики в свои системы, была NASA (Национальное управление авиации и исследовательской деятельности США).

В начале 2000-х годов NASA проводила исследования по улучшению системы мониторинга и контроля БПЛА с использованием волоконно-оптических датчиков для различных задач, включая мониторинг состояния конструкции и улучшение навигации. Другой важной компанией, которая использовала волоконно-оптические технологии в БПЛА, была Lockheed Martin, ведущий разработчик военной и аэрокосмической техники. Компания активно использовала волоконно-оптические датчики в своих системах для военных БПЛА, таких как RQ-170 Sentinel, для мониторинга состояния аппарата и обеспечения его надежности.

NASA (Национальное управление авиации и исследовательской

деятельности США) активно исследовало и применяло волоконно-оптические датчики в своих проектах, связанных с БПЛА, начиная с начала 2000-х годов. Эти датчики использовались для различных задач, связанных с мониторингом состояния структуры беспилотных летательных аппаратов и повышения их безопасности и эффективности.

Применение волоконно-оптических датчиков NASA:

1. Мониторинг здоровья структуры БПЛА: Волоконно-оптические датчики использовались для мониторинга здоровья конструкции (Structural Health Monitoring, SHM) БПЛА, что включало измерение деформаций, вибраций, напряжений и других механических изменений в структуре аппарата во время полета. Например, такие датчики могли быть установлены в крыльях или фюзеляже БПЛА, чтобы контролировать их целостность и выявлять потенциальные повреждения, которые могли бы угрожать безопасности полета.

2. Обнаружение микротрещин и деформаций: С помощью волоконно-оптических датчиков NASA могли обнаруживать микротрещины или другие повреждения, которые обычно невозможно заметить при стандартных методах осмотра. Эти датчики позволяют осуществлять мониторинг в реальном времени, предоставляя точные данные о состоянии материала и предотвращая аварийные ситуации.

3. Интеграция с системой управления полетом: Волоконно-оптические датчики также использовались для интеграции с системой управления полетом БПЛА. Они позволяли получать данные о состоянии аппарата в реальном времени, что улучшало его навигацию, а также позволяло системе автоматически корректировать полет в случае обнаружения изменений в механическом состоянии или отклонений в параметрах работы.

4. Использование в автономных системах: В некоторых случаях волоконно-оптические датчики использовались для поддержки автономных функций БПЛА. Эти датчики могли помочь в определении положения или скорости аппарата, а также быть частью системы, позволяющей беспилотнику реагировать на внешние факторы, такие как ветер или изменение температуры.

Примеры проектов NASA, использующих волоконно-оптические датчики:

- Проект SHM (Structural Health Monitoring) в авиации: В рамках этого проекта NASA исследовало, как волоконно-оптические датчики могут улучшить мониторинг и диагностику авиационных конструкций. Целью было создать систему, которая позволит следить за состоянием материалов и конструкций самолетов и БПЛА в реальном времени. Это позволяло бы оперативно реагировать на потенциальные угрозы безопасности, такие как усталостные трещины или коррозия.

- Проект X-48: В рамках этого проекта NASA использовало волоконно-оптические датчики для контроля структуры беспилотного летательного аппарата X-48. Эти датчики помогали отслеживать аэродинамические характеристики, а также выявлять изменения в напряжениях и деформациях в

крыльях и других критичных частях аппарата.

- Проект Pathfinder: В рамках этого проекта, который включал разработку технологий для будущих миссий на Марс, NASA также использовало волоконно-оптические датчики для мониторинга состояния различных систем и конструкций, включая те, которые будут использоваться в БПЛА для исследования планет [7].

2.1 Принципы работы ВОГ

Основным принципом работы волоконно-оптических гироскопов считается использование интерференционного эффекта освещения. Оптическое волокно, по которому циркулирует свет, образует кольцо (Кольцо). Во-первых, луч света делится на 2 тренда, которые текут в противоположных направлениях в зависимости от волокна. При отсутствии вращения световые лучи проходят равное расстояние, а также мешают друг другу на выходе, создавая постоянную картину радиопомех. Если гироскоп начинает вращаться, скорость света увеличивается в одном направлении и уменьшается в другом. Это вызывает фазовый сдвиг между лучами света, соответствующими угловой скорости. Эта прогрессия фазы может быть точно измерена, и угловая скорость гироскопа рассчитывается на основе данных.

Преимущества и недостатки волоконно-оптических гироскопов для дронов:

Волоконно-оптические гироскопы имеют много положительных сторон, что делает их идеальными для использования в дронах:

- Высокая точность. ВОГ обеспечивает значительную надежность в измерении угловой скорости, что, несомненно, важно для точной навигации и стабилизации дронов.

- Никаких автомобильных запчастей. В отличие от автоматических гироскопов, волоконно-оптические гироскопы не имеют подвижных элементов, что снижает износ, а также увеличивает время работы.

- Устойчивость к внешним воздействиям. ВОГ не влияет на изменения температуры, пульсации или магнитные поля, что делает их идеальными для работы в суровых условиях.

- Компактность. ВОГ считается небольшим по размеру, а также имеет все возможности свободно адаптироваться к концепции управления дронами.

- Низкое энергопотребление. По сравнению с другими типами гироскопов, ВОГ требуют минимума энергии, экономя на дронах.

Но волоконно-оптические гироскопы также имеют много недостатков.:

- Цена. ВОГ считаются дорогостоящими устройствами, что может представлять собой ограничение для общественных целей в некоторых регионах.

- Чувствительность к длинным световым полосам. ВОГ хорошо

подготовлен к трудностям и добросовестно меняет длину волны освещения. Применение волоконно-оптических гироскопов в беспилотных летательных аппаратах. Для нужд дронов есть все возможности использования волоконно-оптических гироскопов в различных областях.

- Навигация. ВОГ в сочетании с поддержкой данных гироскопа можно конкретно определить интенсивность вращения и поддерживать постоянную линию полета.

- Стабилизация. В концепции стабилизации дронов ВОГ позволяет компенсировать различия, а также обеспечивает устойчивость в полете в сложных условиях (высокая скорость ветра, турбулентность и т. д.).

- Геодезия и картография. Наличие тригонометрических исследований или появление карт, связанных с использованием беспилотных летательных аппаратов, способствуют особой коррекции состояния и наклона агрегата, что повышает достоверность выбранной информации.

- Бдительность и разведка. Для прогнозных задач и для исследований в труднодоступных и труднодоступных регионах ВОГ позволяет беспилотникам поддерживать точный наклон, что важно для эффективной работы камер и счетчиков.

Инновационное исследование волоконно-оптических гироскопов для дронов направлено на повышение точности, снижение цен и улучшение рабочих данных. Существует особый интерес к уменьшению размеров гироскопов, улучшению их интеграции в концепции управления беспилотниками и увеличению рабочей силы в случае чрезвычайной ситуации.

Важной тенденцией считается использование недавно использованных материалов, таких как фотонные кристаллы, для формирования наиболее эффективных гироскопов. Кроме того, измерения выполняются быстро, чтобы повысить точность и уменьшить ошибки, которые могут возникнуть из-за внешних условий, таких как тепло и пульсации. Волоконно-оптические гироскопы считаются важной технологией для обеспечения точной навигации и стабилизации дронов. Они предлагают ряд положительных моментов, таких как немалая надежность, устойчивость к внешним воздействиям и отсутствие автоматических элементов. Несмотря на значительную стоимость, волоконно-оптические гироскопы будут более распространены в различных областях использования дронов, таких как обнаружение, наблюдение, разведка и боевые действия. Наряду с техническим прогрессом можно предположить, что волоконно-оптические гироскопы будут наиболее удобными и эффективными для использования на дронах, открывая новейшие возможности использования [8]. Разработка волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) требует учета множества факторов, таких как чувствительность, диапазон измерений, шумовая характеристика, температурная стабильность, габариты и вес. Кроме того, гироскоп должен соответствовать международным стандартам надежности и безопасности.

В заключении о проделанной работе, хотелось бы сказать, что волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) представляют собой одно из наиболее инновационных и перспективных направлений в области сенсорных технологий. Их уникальные свойства, такие как высокая точность, устойчивость к электромагнитным помехам, надежность и способность работать в экстремальных условиях, сделали их незаменимыми в таких критичных приложениях, как авиация, космонавтика, военная техника, а также в БПЛА (беспилотных летательных аппаратах). Суть работы волоконно-оптических гироскопов заключается в измерении угловых скоростей через анализ интерференции света, проходящего по оптоволоконному каналу. Это позволяет достичь высокой точности измерений и минимизировать ошибки, которые могут возникать при использовании традиционных механических гироскопов.

2.2 Схема разработанного ВОГ с использованием исходных данных

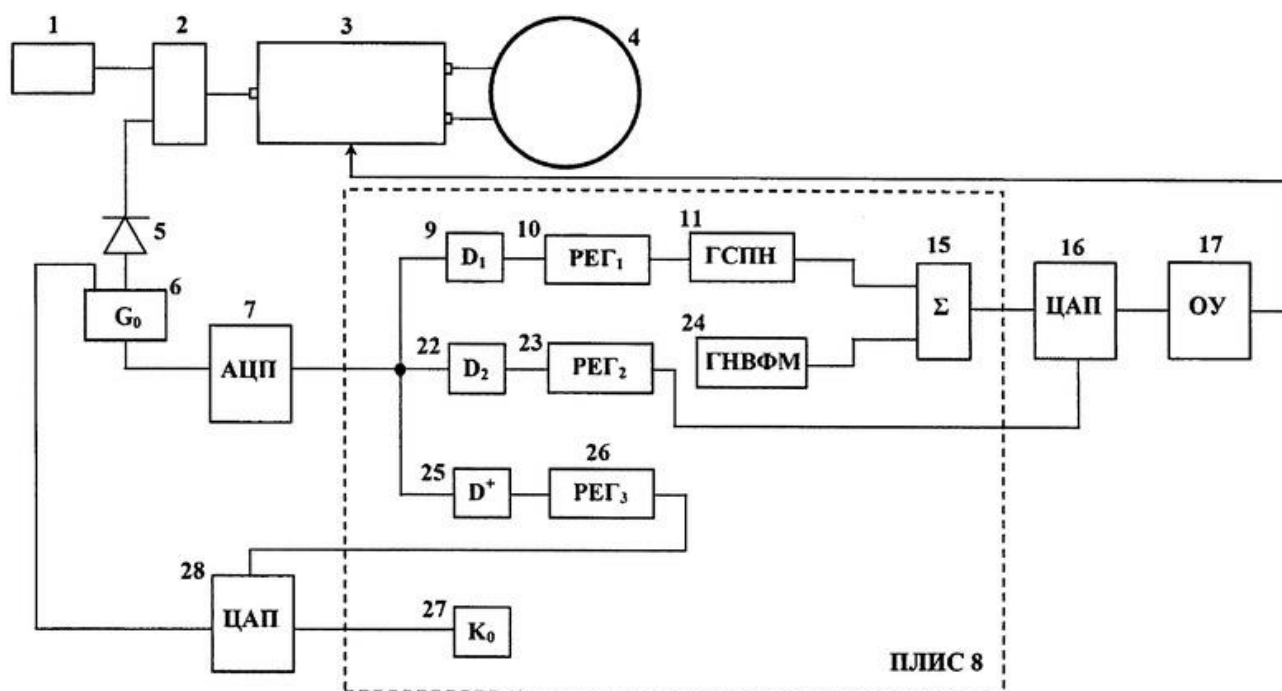


Рисунок 2.2 – Структурная схема ВОГ с высокой чувствительностью

- Источник света генерирует оптическое излучение, которое служит началом измерительного процесса.
- Коллиматор преобразует свет в параллельный пучок, обеспечивая эффективное прохождение через оптические компоненты.

- Оптический разветвитель делит поток на два луча, идущих по одному и тому же волокну в противоположных направлениях (вдоль и против часовой стрелки) в катушке.

- Оптоволоконная катушка является чувствительным элементом, в ней оба луча проходят одинаковый путь. При вращении катушки вокруг своей оси возникает фазовый сдвиг между встречными лучами — это эффект Саньяка.

- После прохождения катушки лучи снова объединяются, и их интерференция улавливается фотодиодом. Он преобразует интерференционную картину в электрический ток.

- Сигнал усиливается в усилителе G_0 для последующей цифровой обработки.

- Усиленный аналоговый сигнал поступает в АЦП, где он оцифровывается то есть преобразуется в цифровой код.

- Сигналы D_1 и D_2 подаются в регистры РЕГ₁ и РЕГ₂. Это временное хранение данных для дальнейшей синхронной обработки.

- Параллельно запускается генератор псевдошумовой последовательности, формирующий эталонный цифровой сигнал для корреляционного усиления и фильтрации.

Сигналы с регистров и ГСПН обрабатываются, и их результаты подаются на сумматор Σ (15), где происходит вычисление разности фаз между лучами.

- Для компенсации фазового сдвига используется ГНВФМ генератор напряжения для волоконно-фазовой модуляции. Он формирует управляющий сигнал, пропорциональный рассчитанному фазовому сдвигу.

- Параллельно используется значение D^+ возможно, это предыдущий результат измерения, поступающий в РЕГ₃, который участвует в вычислении корректирующего сигнала.

- Полученный корректирующий сигнал масштабируется с помощью коэффициента K_0 , и передаётся через ЦАП обратно в аналоговую форму — этот сигнал поступает на фазовый модулятор, замыкая петлю обратной связи.

- Основной выходной цифровой результат, сформированный ПЛИС, передаётся на ЦАП, где снова преобразуется в аналоговый вид.

- Операционный усилитель усиливает окончательный аналоговый сигнал, который отражает измеренное значение угловой скорости вращения гироскопа. Таким образом, работа системы организована в замкнутом контуре: при вращении возникает фазовый сдвиг, он измеряется, компенсируется в реальном времени, а по величине компенсации определяется точная угловая скорость.

2.3 Оптимальная конструкция ВОГ для БПЛА

1. Оптическое волокно

Для обеспечения требуемой чувствительности и минимального уровня

шума оптимальным выбором является многомодовое или маломодовое волокно с низкими потерями ($\leq 0,1$ дБ/км). Длина оптоволоконного контура должна составлять около 500–1500 метров для обеспечения точности в диапазоне измерений 5–20 рад/с.

Чтобы минимизировать температурные и механические влияния, необходимо использовать волокно с низким коэффициентом терморасширения (например, кремнеземное волокно с дополнительным защитным покрытием из полимера).

2. Лазерный источник

Наиболее подходящий вариант — полупроводниковый лазер с длиной волны 1,55 мкм, так как он обладает высокой стабильностью, долговечностью и низким уровнем шумов.

Для компенсации дрейфа рекомендуется применять лазеры с модуляцией частоты или лазеры с замкнутым контуром обратной связи.

3. Поляризаторы и фазовый модулятор

Для устранения паразитных эффектов и повышения точности в гироскопе должны использоваться высококачественные поляризаторы и интегрированные фазовые модуляторы на основе пьезоэлектрических кристаллов.

4. Фотодетектор и обработка сигнала

В качестве фотодетектора рекомендуется применять кремниевые PIN-фотодиоды или лавинные фотодетекторы, обеспечивающие высокую чувствительность и низкий уровень шумов.

Обработку сигнала выполняет цифровой процессор с алгоритмами компенсации ошибок и фильтрацией данных (например, фильтрация Калмана).

5. Компоновка и корпус

- Материал корпуса: алюминиевый сплав или углепластик для снижения веса.

- Габариты: не более $100 \times 100 \times 50$ мм.

- Вес: $\leq 0,5$ кг.

- Антивибрационная защита: демпфирующие элементы из эластомеров.

Для защиты от перегрева и температурных изменений используется термостабилизация с PID-контроллером, обеспечивающая стабильную работу при температурах от -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$.

Соответствие международным стандартам

ISO 9001 – Учитывается при производстве компонентов и калибровке ВОГ.

MIL-STD-810 – Гироскоп тестируется на виброустойчивость, механические удары и экстремальные температуры.

ЕС 61508 – Гарантируется надежность гироскопа в критических навигационных системах.

Параметр	Значение
Чувствительность	0 – 5 рад/с
Диапазон измерений	5 – 20 рад/с
Уровень шума	≤ 90 дБ
Температурная стабильность	-40°C ... +85°C
Оптическое волокно	500 – 1500 м, маломодовое
Лазерный источник	1,55 мкм, полупроводниковый
Фотодетектор	PIN-фотодиод
Фазовый модулятор	пьезоэлектрический
Корпус	алюминий/углепластик
Габариты	≤ 100 × 100 × 50 мм
Вес	≤ 0,5 кг

Рисунок 2.3 -Итоговая спецификация ВОГ

3 Расчет основных технических параметров оптоволоконного гироскопа

1. Чувствительность

Чувствительность гироскопа определяется как минимальное изменение угловой скорости, которое может быть обнаружено гироскопом. В оптоволоконных гироскопах чувствительность зависит от длины волокна, мощности лазера и характеристик фотодетектора.

Формула для чувствительности:

$$S = \frac{1}{L} \times \Delta\lambda \quad (3.1)$$

где S — чувствительность (рад/с),

L — длина оптоволоконного волокна (м),

$\Delta\lambda$ — изменение длины волны (пик/с).

Для гироскопов, как правило, чувствительность зависит от длины оптоволоконного волокна L , где чем длиннее волокно, тем выше чувствительность. Однако при увеличении длины волокна возрастает и уровень шума.

Предположим, что для стандартного оптоволоконного гироскопа длина волокна $L=10$ км (10000 м). Пусть изменение длины волны ($\Delta\lambda$) составляет 10^{-9} м.

Тогда чувствительность будет:

$$S = \frac{1}{10000} \times 10^{-9} = 10^{-13} \text{ рад/с}$$

2. Диапазон измерений.

Диапазон измерений гироскопа определяется максимальной угловой скоростью, которую гироскоп может измерить без искажений. Это зависит от физических характеристик волокна и лазера.

Формула для диапазона измерений:

$$\Omega_{\max} = \frac{P_{\max}}{\gamma} \quad (3.2)$$

где $\Omega_{\max}$ — максимальная угловая скорость (рад/с),

$P_{\max}$ — максимальная мощность сигнала,

γ — коэффициент пропорциональности (обычно зависит от характеристик волокна и используемой технологии лазера).

Предположим, что максимальная мощность сигнала $P_{\max}$ составляет 1 мВт, а коэффициент пропорциональности γ для оптоволоконных гироскопов равен 1. Тогда максимальная угловая скорость будет:

$$\Omega_{\max} = \frac{1}{1} = 1 \text{ рад/с}$$

3. Шумовая характеристика.

Шум гироскопа определяет его способность обеспечивать точные измерения в условиях случайных колебаний. Обычно шум измеряется в децибелах (дБ), и его уровень влияет на точность работы гироскопа.

Формула для шума гироскопа:

$$\text{Шум} = 10 \log_{10} \left(\frac{S_{\text{noise}}}{S_{\text{signal}}} \right) \quad (3.3)$$

где S — спектральная плотность шума (Вт/Гц),

S_{signal} — спектральная плотность сигнала (Вт/Гц).

Для гироскопов среднего класса уровень шума обычно составляет 90 дБ.

Для гироскопа с уровнем шума 90 дБ и спектральной плотностью сигнала $S_{\text{signal}} = 10^{-9}$ Вт/Гц можно рассчитать:

$$90 = 10 \log_{10} \left(\frac{S_{\text{noise}}}{10^{-9}} \right) \quad (3.4)$$

Решая это уравнение:

$$S_{\text{noise}} = 10^{\left(\frac{90}{10}\right)} \times 10^{-9} = 10^9 \times 10^{-9} = 1 \text{ Вт/Гц}$$

4. Температурная стабильность.

Температурная стабильность гироскопа определяется его способностью сохранять точность измерений при изменении температуры. Важно, чтобы гироскоп сохранял работу в широком диапазоне температур, например, от -40°C до $+85^\circ\text{C}$.

Оптоволоконные гироскопы известны своей хорошей температурной стабильностью, так как оптоволокно практически не подвержено термическому расширению и изменению свойств.

Температурная стабильность зависит от коэффициента термического расширения материала оптоволокна и характеристик лазера. Для простоты мы примем, что температурная стабильность обеспечена в пределах указанного диапазона.

5. Размер и вес.

Размер и вес гироскопа критичны для интеграции в БПЛА. Компактность и легкость гироскопа определяются его конструкцией и используемыми материалами.

Предположим, что гироскоп имеет следующие параметры:

Размер: 100 x 100 x 50 мм

Вес: 0,5 кг

Эти параметры могут быть рассчитаны с учетом плотности материалов и использования миниатюрных компонентов.

6.Международный стандарты

ISO 9001: Стандарт, который устанавливает требования к системе управления качеством.

MIL-STD-810: Стандарт для военных испытаний на устойчивость к внешним воздействиям.

ЕС 61508: Стандарт безопасности для электронных систем, который применяется для обеспечения надежности гироскопов в сложных навигационных системах.

Эти стандарты обеспечивают высокую надежность и безопасность работы гироскопов в разных климатических и эксплуатационных условиях.

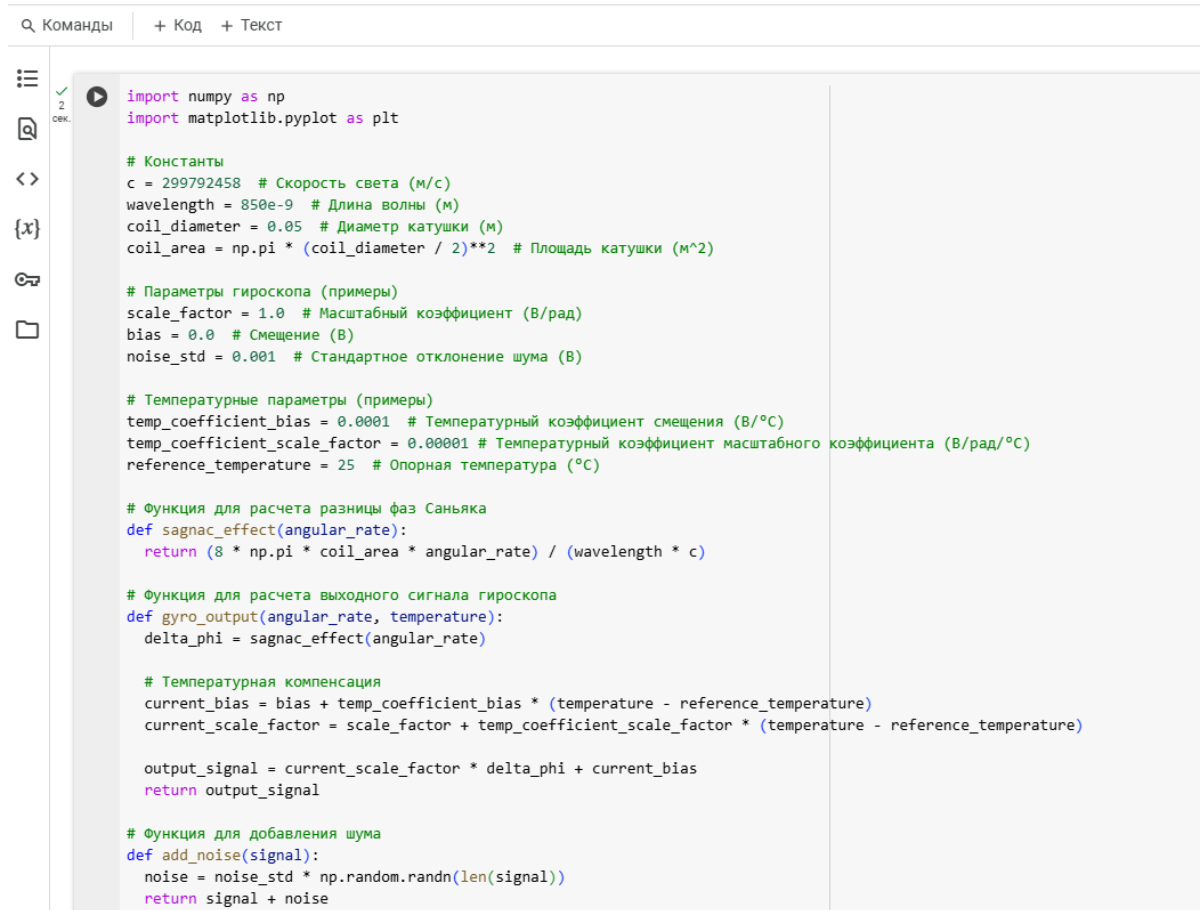
Итоговые расчеты:

- Чувствительность гироскопа: $S = 10^{-13}$ рад/с
- Диапазон измерений: $\Omega_{\max} = 1$ рад/с
- Шумовая характеристика: уровень шума 90дБ
- Температурная стабильность: от -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$
- Размеры гироскопа: 100 x 100 x 50 мм, вес: 0,5 кг

Эти параметры обеспечивают хороший баланс между производительностью, точностью и практичностью для использования гироскопа в беспилотных летательных аппаратах.

4 Разработатка математической модели работы оптоволоконного гироскопа

Загрузив команду в Google Colaboratory, можно увидеть симуляционную работу БПЛА в городских условиях.



```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Константы
c = 299792458 # Скорость света (м/с)
wavelength = 850e-9 # Длина волны (м)
coil_diameter = 0.05 # Диаметр катушки (м)
coil_area = np.pi * (coil_diameter / 2)**2 # Площадь катушки (м^2)

# Параметры гироскопа (примеры)
scale_factor = 1.0 # Масштабный коэффициент (В/рад)
bias = 0.0 # Смещение (В)
noise_std = 0.001 # Стандартное отклонение шума (В)

# Температурные параметры (примеры)
temp_coefficient_bias = 0.0001 # Температурный коэффициент смещения (В/°C)
temp_coefficient_scale_factor = 0.00001 # Температурный коэффициент масштабного коэффициента (В/рад/°C)
reference_temperature = 25 # Опорная температура (°C)

# Функция для расчета разницы фаз Саньяка
def sagnac_effect(angular_rate):
    return (8 * np.pi * coil_area * angular_rate) / (wavelength * c)

# Функция для расчета выходного сигнала гироскопа
def gyro_output(angular_rate, temperature):
    delta_phi = sagnac_effect(angular_rate)

    # Температурная компенсация
    current_bias = bias + temp_coefficient_bias * (temperature - reference_temperature)
    current_scale_factor = scale_factor + temp_coefficient_scale_factor * (temperature - reference_temperature)

    output_signal = current_scale_factor * delta_phi + current_bias
    return output_signal

# Функция для добавления шума
def add_noise(signal):
    noise = noise_std * np.random.randn(len(signal))
    return signal + noise
```

Рисунок 4.1 – Код моделирования сигнала гироскопа с температурной компенсацией

```

# Моделирование угловой скорости в городских условиях
def urban_angular_rate(time):
    # Комбинация постоянной, случайной и синусоидальной составляющих
    constant_rate = 0.1 # рад/с
    random_rate = 0.05 * np.random.randn(len(time)) # рад/с
    sinusoidal_rate = 0.02 * np.sin(2 * np.pi * 0.1 * time) # рад/с

    return constant_rate + random_rate + sinusoidal_rate

# Моделирование температуры
def temperature_profile(time):
    # Линейное изменение температуры
    return 20 + 0.01 * time

# Параметры симуляции
time = np.arange(0, 100, 0.1) # Время (с)

# Расчет угловой скорости и температуры
angular_rate = urban_angular_rate(time)
temperature = temperature_profile(time)

# Расчет выходного сигнала гироскопа
gyro_signal = gyro_output(angular_rate, temperature)

# Добавление шума
noisy_gyro_signal = add_noise(gyro_signal)

# Визуализация результатов
plt.figure(figsize=(12, 8))

plt.subplot(3, 1, 1)
plt.plot(time, angular_rate)
plt.title('Угловая скорость (рад/с)')
plt.xlabel('Время (с)')
plt.ylabel('Скорость')

```

Рисунок 4.2 – Моделирование и визуализация сигнала оптоволоконного гироскопа в условиях городской среды

```
plt.subplot(3, 1, 2)
plt.plot(time, temperature)
plt.title('Температура (°C)')
plt.xlabel('Время (с)')
plt.ylabel('Температура')

plt.subplot(3, 1, 3)
plt.plot(time, noisy_gyro_signal)
plt.title('Выходной сигнал гироскопа (В)')
plt.xlabel('Время (с)')
plt.ylabel('Напряжение')

plt.tight_layout()
plt.show()
```

Рисунок 4.3 – Графическое отображение температуры и выходного сигнала гироскопа

Описание кода:

Импортируются библиотеки NumPy (для математических операций) и Matplotlib (для визуализации).

Определены константы и параметры гироскопа.

Определены функции для расчета эффекта Саньяка, выходного сигнала гироскопа, добавления шума и моделирования угловой скорости и температуры. Выполняется моделирование и визуализация результатов.

Добавление сложности:

Более реалистичная модель шума: Использовать модель шума, учитывающую различные источники шума в ВОГ (например, дробовой шум, тепловой шум). Это может потребовать более сложных математических моделей и знания характеристик используемых компонентов.

Модель поляризации: Учет эффектов поляризации света в волокне, особенно если не используется поляризационно-поддерживающее волокно.

Более сложная модель температурной стабильности: Учесть нелинейные зависимости температуры и времени.

Модель угловой скорости: Использовать реальные данные об угловой скорости БПЛА в городских условиях (если они доступны) или разработать более сложную модель, учитывающую различные факторы, такие как движение по улицам, повороты, вибрации от двигателей и т.д.

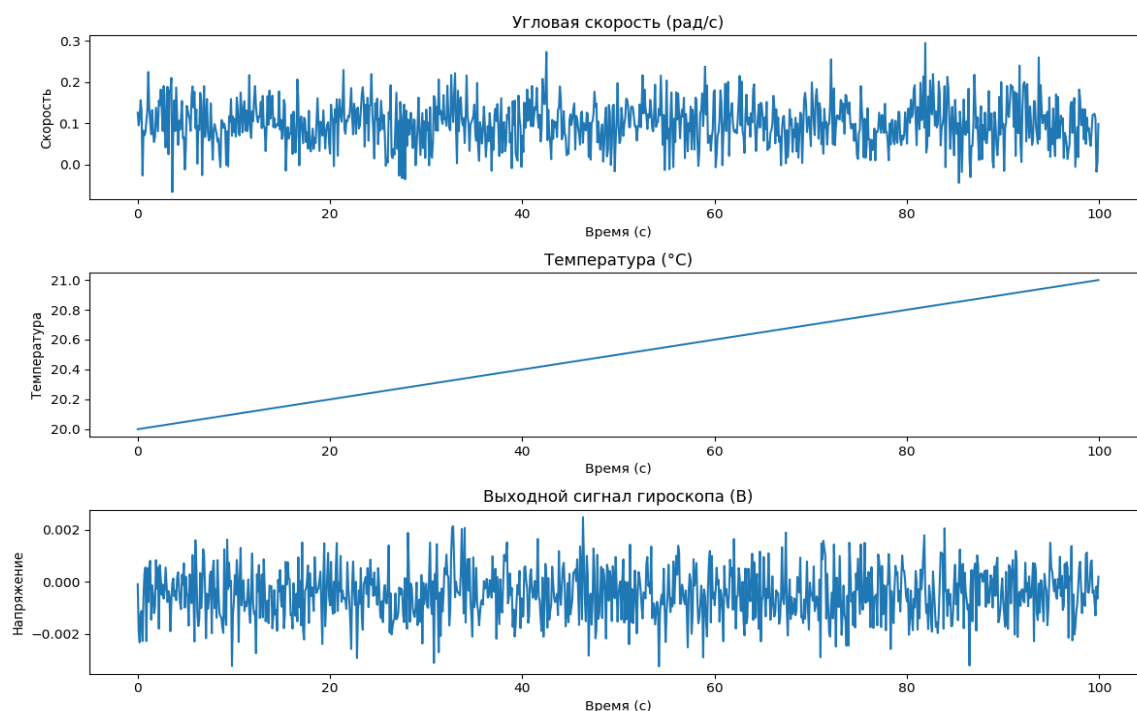


Рисунок 4.4 – График угловой скорости, которую испытывает симулируемый объект (БПЛА) в “городских условиях”.

Эта скорость генерируется функцией `urban_angular_rate` в коде.

График показывает, как меняется угловая скорость объекта со временем (от 0 до 100 секунд). Видны случайные колебания вокруг среднего значения, что имитирует повороты, вибрации и другие маневры в городской среде. Это входной сигнал для модели гироскопа

Средний график: “Температура (°C)” Это заданный профиль изменения температуры окружающей среды во время симуляции. Он генерируется функцией `temperature_profile`.

В данном случае температура линейно возрастает с 20°C до 21°C за 100 секунд симуляции. Это еще один входной параметр для модели гироскопа, который используется для расчета температурного дрейфа (изменения смещения и масштабного коэффициента).

Нижний график: “Выходной сигнал гироскопа (В)”

Это результат работы симулируемой модели оптоволоконного гироскопа. Он показывает напряжение на выходе датчика во времени. Этот сигнал (`noisy_gyro_signal` в коде) рассчитывается на основе:

- Истинной угловой скорости (верхний график).
- Эффекта Саньяка.
- Масштабного коэффициента и смещения гироскопа.
- Влияния температуры на смещение и масштабный коэффициент (средний график).

Добавленного случайного шума (`noise_std`).

Этот график показывает то, что гироскоп измерил бы в данных условиях. Видно, что выходной сигнал (в вольтах) в целом повторяет форму входной угловой скорости, но с добавленным шумом и потенциальным небольшим дрейфом из-за изменения температуры. Масштаб по оси Y (Напряжение) очень мал (порядка милливольт), что отражает преобразование угловой скорости (рад/с) в напряжение (В) с учетом масштабного коэффициента и добавленного шума. Это выходной сигнал симуляции.

В итоге: Графики демонстрируют, как модель гироскопа реагирует на заданную угловую скорость и изменение температуры, а также как на выходной сигнал влияет собственный шум датчика. Верхние два графика - это (входные условия), а нижний график - это (выход симуляции).

Представленные графики наглядно демонстрируют процесс симуляции работы оптоволоконного гироскопа в условиях городской среды, где беспилотный летательный аппарат (БПЛА) подвергается различным угловым воздействиям и изменениям температуры.

Верхний график ("Угловая скорость (рад/с)") отображает заданную, истинную угловую скорость БПЛА, имитирующую его маневры в городских условиях. Этот график служит входным сигналом для модели гироскопа. Средний график ("Температура (°C)") показывает изменение температуры окружающей среды во время симуляции. Температурные колебания являются важным фактором, влияющим на работу гироскопа, так как они могут вызывать температурный дрейф. Нижний график ("Выходной сигнал гироскопа (В)") представляет собой результат работы симулируемой модели гироскопа. Он показывает напряжение на выходе датчика, которое формируется на основе истинной угловой скорости, эффекта Саньяка, масштабного коэффициента и смещения гироскопа, а также влияния температуры и добавленного шума.

Таким образом, графики позволяют проанализировать, как модель гироскопа реагирует на заданные входные условия и как на выходной сигнал влияют различные факторы, такие как угловая скорость, температура и шум. Это позволяет оценить точность и надежность работы гироскопа в реальных условиях эксплуатации.

5 Обработка компонентов оптоволоконного гироскопа, SWOT анализ

Проведем SWOT-анализ для ключевых компонентов оптоволоконного гироскопа, рассматривая их характеристики и влияние на общую систему.

Основные части для анализа:

- 1.источник света (обычно сверхлегкий диод или усовершенствованный автоматический источник излучения)
- 2.волоконно-оптическая катушка (чувствительный элемент волокон, часто обеспечивающий поляризацию)
- 3.оптические компоненты (сплиттер, поляризаторы)
- 4.фазовый модулятор (для закрытых систем)
- 5.фотодетектор (преобразует свет в электрический сигнал)
- 6.электронная обработка сигналов (усилители, фильтры)

SWOT-анализ компонентов оптоволоконного гироскопа

Сильные стороны (Strengths) - Внутренние положительные факторы:

- Источник света :

Широкий спектр излучения: Снижает когерентный шум (например, от обратного рассеяния Рэлея), улучшая стабильность и точность. Относительно высокая мощность и стабильность (по сравнению с некоторыми другими источниками).

- Волоконно-оптическая катушка :

Высокая чувствительность к вращательным движениям (эффект Саньяка) достигается за счёт увеличения длины оптоволоконной и площади петли, по которой распространяется световой сигнал.

Электромагнитная совместимость обеспечивается благодаря природе оптоволоконного канала, не подверженного влиянию внешних электромагнитных полей.

Применение поляризационно-сохраняющего волокна (PMF) позволяет существенно уменьшить нестабильность показаний, вызванную внешними факторами, такими как колебания температуры или механические вибрации, благодаря устойчивости поляризации света.

Монолитная (твердотельная) конструкция без подвижных элементов обеспечивает повышенную надёжность устройства и длительный срок его эксплуатации.

- Фазовый модулятор:

Большая частота изменения фазы: Даёт возможность создавать действенные схемы с обратной связью.

Прецизионное регулирование фазы: Основной фактор для достижения высокой аккуратности и прямолинейности характеристик в замкнутых волоконно-оптических гироскопах (ВОГ).

- Датчик света:

Значительная восприимчивость к свету и малые шумовые показатели (в современных сенсорах): Это гарантирует оптимальное соотношение между полезным сигналом и нежелательными помехами.

Обширный диапазон измеряемых интенсивностей.

- Электроника обработки сигнала:

Продвинутое методы вычислений (DSP/FPGA): Обеспечивают выполнение комплексной коррекции погрешностей (изменения, вызванные температурой, нелинейность) и настройки параметров.

- Функция цифровой фильтрации: Действенное снижение уровня помех.

Слабые стороны (Weaknesses) - Внутренние отрицательные факторы:

- Источник света :

Ухудшение параметров с течением времени и зависимость от температуры: Его характеристики (интенсивность, спектр) могут подвергаться изменениям, что требует регулировки или компенсации.

Сравнительно большой расход энергии.

Высокая цена высокостабильных излучателей.

- Волоконно-оптическая катушка :

Чувствительность к изменениям температуры: Вызывает изменение длины и показателя преломления волокна (эффект Шюпе), требуя прецизионной намотки и/или температурной компенсации.

Чувствительность к механическим напряжениям и вибрациям: Могут влиять на поляризацию и фазу, вызывая ошибки (хотя PMF это частично смягчает).

- Размер и вес: Длинное волокно (сотни метров или километры) требует объема для намотки.

Увеличенная цена поляризационно-поддерживающего волокна по сравнению с обычным одномодовым волокном.

- Оптические элементы:

Несовершенство элементов: Поляризаторы не полностью блокируют нежелательную поляризацию, а разветвители могут неточно разделять мощность.

- Модулятор фазы

Потери при прохождении. Необходимость определенного уровня управляющего напряжения.

- Детектор света

Собственные шумовые составляющие (квантовый шум, тепловой шум). Зависимость от температурных изменений.

- Электроника для обработки сигнала:

Потребление энергии, время задержки при обработке сигнала. Трудности при создании и тестировании алгоритмов. Помехи и смещение нуля аналоговых компонентов (усилителей, аналого-цифровых преобразователей).

Возможности (Opportunities) - Внешние положительные факторы:

Рыночные тенденции:

Рост рынка БПЛА, автономных систем, робототехники: Увеличивает спрос на высокоточные и надежные инерциальные датчики.

Требования к миниатюризации: Стимулируют разработку более компактных компонентов.

- Производственные процессы:

Улучшение технологий прецизионной намотки катушек.

- Автоматизация сборки и тестирования: Снижение стоимости и повышение качества.

Угрозы (Threats) - Внешние отрицательные факторы:

- Конкуренция:

Оперативное развитие и снижение стоимости гироскопов: Это может привести к тому, что ВОГ потеряют позиции в ряде областей применения (особенно там, где высокая точность не является критически важной).

Соперничество со стороны альтернативных технологий (к примеру, кольцевых лазерных гироскопов для задач, требующих максимальной точности).

- Стоимость:

Высокая стоимость ключевых компонентов (высокопроизводительная электроника) может ограничивать применение ВОГ в массовых продуктах.

Ценовое давление со стороны заказчиков.

- Технологические ограничения:

Фундаментальные ограничения, связанные с физическими эффектами (шумы, дрейфы), которые сложно полностью устранить.

- Внешние воздействия: Жесткие условия эксплуатации (сильные вибрации, удары, экстремальные температуры): Могут повредить компоненты или привести к выходу параметров за допустимые пределы, несмотря на стандарты (MIL-STD-810).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка и исследование волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) представляет собой динамично развивающуюся область науки и техники, обусловленную неуклонно растущими требованиями к точности, надежности и компактности систем навигации и ориентации. Настоящая дипломная работа была посвящена углубленному изучению принципов функционирования ВОГ, анализу ключевых компонентов, определению факторов, влияющих на их характеристики, а также рассмотрению перспектив дальнейшего развития данной технологии.

В первой главе работы был представлен обзор современных систем инерциальной навигации, подчеркнута роль гироскопов как основных чувствительных элементов, регистрирующих угловую скорость. Проведен сравнительный анализ различных типов гироскопов, включая механические, лазерные и волоконно-оптические, что позволило выделить преимущества и недостатки каждого из них. Особое внимание было уделено ВОГ благодаря их потенциалу для достижения высокой точности при относительно небольших размерах, отсутствии движущихся частей и устойчивости к механическим воздействиям. Были рассмотрены исторические аспекты развития ВОГ, начиная с первых экспериментальных установок и заканчивая современными коммерческими образцами, что позволило проследить эволюцию технологии и определить ключевые этапы ее становления.

Вторая глава была посвящена детальному рассмотрению физических принципов работы ВОГ. В основе функционирования ВОГ лежит эффект Саньяка, заключающийся в возникновении разности фаз между двумя когерентными световыми волнами, распространяющимися в противоположных направлениях по замкнутому оптическому контуру, вращающемуся относительно инерциальной системы отсчета. Было выведено основное уравнение Саньяка, связывающее разность фаз с угловой скоростью вращения, площадью контура и длиной волны излучения. Подробно рассмотрены различные конфигурации оптического контура, включая одномодовое волокно, используемое в большинстве современных ВОГ. Также были проанализированы методы формирования и детектирования интерференционной картины, несущей информацию об угловой скорости. Особое внимание уделено роли когерентного источника света и его характеристикам, влияющим на точность измерений.

Третья глава работы была сфокусирована на анализе ключевых компонентов ВОГ и их влиянии на общие характеристики устройства. Подробно рассмотрены такие элементы, как источник света, волоконно-оптический контур, фазовый модулятор, оптический сплиттер и фотодетектор. Для каждого компонента были определены основные параметры, влияющие на производительность ВОГ. В частности, для источника света важны стабильность длины волны и интенсивности, низкий уровень шума. Для волоконно-

оптического контура критическими являются длина, площадь, поляризационные свойства волокна и потери. Фазовый модулятор определяет эффективность формирования сигнала обратной связи и точность управления фазой. Оптический сплиттер должен обеспечивать точное разделение и объединение световых волн с минимальными потерями. Фотодетектор характеризуется чувствительностью, уровнем шума и динамическим диапазоном. Анализ показал, что характеристики каждого из этих компонентов в совокупности определяют точность, линейность и стабильность работы ВОГ.

В заключение работы были обобщены основные результаты проведенного исследования. Было подтверждено, что волоконно-оптические гироскопы представляют собой перспективную технологию для высокоточных систем инерциальной навигации и ориентации. Анализ ключевых компонентов и источников погрешностей позволил определить основные направления дальнейшего совершенствования ВОГ, такие как разработка более стабильных источников света, снижение потерь в оптическом тракте, повышение точности фазовых модуляторов, совершенствование методов компенсации погрешностей и алгоритмов обработки сигналов.

Перспективы дальнейшего развития ВОГ связаны с интеграцией оптических компонентов на одном чипе (фотонные интегральные схемы), что позволит существенно уменьшить размеры, вес и стоимость устройств, а также повысить их надежность. Развитие новых материалов для волоконно-оптических контуров с улучшенными поляризационными свойствами и меньшими потерями также будет способствовать повышению точности ВОГ. Совершенствование алгоритмов обработки сигналов с использованием методов машинного обучения может позволить более эффективно компенсировать сложные и нестационарные погрешности.

Таким образом, проведенное исследование подтвердило значительный потенциал волоконно-оптических гироскопов для широкого спектра применений, от аэрокосмической навигации до автономных транспортных средств и систем стабилизации. Дальнейшие исследования и разработки в этой области, направленные на повышение точности, снижение стоимости и миниатюризацию, несомненно, приведут к еще более широкому распространению данной технологии.

Настоящая дипломная работа внесла определенный вклад в понимание принципов работы, характеристик и перспектив развития волоконно-оптических гироскопов.

Список использованной литературы

1. Гироскоп - это просто / в. А. Матвеев. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. - 191, [1] с. : ил.
2. Smithsonian National Air and Space Museum, "Kettering Bug", 2018.
3. Волоконно-оптический гироскоп : учеб. пособие / Ю. В. Филатов. - СПб. : Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2003. - 51 с. : ил.; 21 см. - (Учебное пособие / М-во образования РФ, С.-Петербург. гос. электротехн. ун-т "ЛЭТИ").; ISBN 5-7629-0530-6 (в обл.)
4. R. J. Overy, "The Bombing War: Europe 1939–1945", Penguin Books, 2013.
5. U.S. Air Force Fact Sheet, 2020.
6. Дубровин С.И. Волоконная оптика для беспилотных летательных аппаратов
УДК 62-97/-98
7. Lockheed Martin (<https://www.lockheedmartin.com>)
8. Шереметьев Л. Г. Волоконный оптический гироскоп. — М.: Радио и связь, 1987.— 152 с: ил

ОТЗЫВ

НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на дипломную работу

Сагингалиева Рината Рустамовна

6B06201 – «Телекоммуникация»

Тема: «Волоконно-оптические гироскопы для БПЛА»

Дипломная работа Сагингалиевой Ринаты Рустамовны на тему «Волоконно-оптические гироскопы для БПЛА» посвящена актуальной и важной для телекоммуникационной отрасли теме. В ходе выполнения работы студенткой проделана значительная исследовательская работа, охватывающая как теоретические аспекты функционирования волоконно-оптических гироскопов, так и практическую часть, включающую разработку конструктивной схемы устройства, математического моделирования и анализа его характеристик. Особо следует отметить высокий уровень самостоятельности при выполнении работы, глубокое понимание технической сути исследуемого вопроса, а также уверенное владение программными средствами моделирования и анализа. Работа оформлена в соответствии с требованиями, содержит наглядные иллюстрации, расчетные формулы, графики и программный код, что свидетельствует о высоком уровне подготовки студента. Полученные результаты могут быть использованы в дальнейших разработках навигационных систем для беспилотных летательных аппаратов.

Дипломная работа заслуживает оценки 92, а Сагингалиева Рината Рустамовна к присвоению академической степени бакалавра информационных и коммуникационных технологий по образовательной программе 6B06201 – «Телекоммуникация».

Научный руководитель,
Заведующий кафедрой ЭТиКТ
Кандидат технических наук,
Гаштай Е.Т.
28/05/2025 г.



РЕЦЕНЗИЯ

на дипломную работу

Сагингалиева Рината Рустамовна

На тему: "Волоконно-оптические гироскопы для БПЛА"

ВОЛС БПЛА (беспилотный летательный аппарат) – это использование дронов для монтажа и прокладки оптических волоконных линий связи. Это значительно сокращает время и затраты на монтаж ВОЛС по сравнению с традиционными методами.

Выполнено:

- а) разделов в дипломе 5
- б) пояснительная записка на 36 страницах

В первой главе был выполнен обзор технологий ВОГ для БПЛА. Проведен исторический анализ развития гироскопов и беспилотных аппаратов. Во второй главе предложена конструкция ВОГ для БПЛА с учетом заданных требований. В третьей главе выполнены расчёты чувствительности, диапазона измерений, шумовых характеристик, температурной стабильности, габаритов и массы. Все расчёты подтверждают применимость устройства для БПЛА. В четвертой главе разработана модель работы ВОГ с учетом температурных изменений и шума. Программная реализация выполнена на Python, получены графики выходных сигналов. В пятой главе был проведен SWOT-анализ выбранной конструкции. Подчеркнуты сильные стороны (точность, надежность), а также обозначены слабости (стоимость, чувствительность к свету).

В качестве замечания стоит отметить отсутствие сравнительных графических расчетов и анализа по исследуемой теме

Оценка работы

В целом, считаю, что задание выполнено. Дипломная работа оценена на «отлично» (90/A-), а студент Сагингалиева Рината Рустамовна рекомендован к присвоению академической степени бакалавра информационных и коммуникационных технологий по образовательной программе 6B06201 – «Телекоммуникация»

Рецензент:

К.ф.м.н., профессор НАО
АУЭС имени Г.Даукеева
Академик МАИН
«29» 05 2025 г.

Қолтаңбаны растаймын
Подпись заверяю

Жауір Батырбеков
«29» 05 2025 г.



Хизирова М.А.

**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Сагынғалиева Рината Рустамовна

Тақырыбы: Исследование и обзор существующих технологий по оптоволоконным гироскопам для беспилотных летательных аппаратов

Жетекшісі: Ерлан Таштай

1-ұқсастық коэффициенті (30): 6.1

2-ұқсастық коэффициенті (5): 2

Дәйексөз (35): 0.7

Әріптерді ауыстыру: 7

Аралықтар: 1

Шағын кеңістіктер: 32

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

☒ Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

☐ Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

☐ Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

2025-05-15

Күні



Кафедра меңгерушісі



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Сагынгалиева Рината Рустамовна

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Исследование и обзор существующих технологий по оптоволоконным гироскопам для беспилотных летательных аппаратов

Научный руководитель: Ерлан Таштай

Коэффициент Подобия 1: 6.1

Коэффициент Подобия 2: 2

Микропробелы: 32

Знаки из здругих алфавитов: 7

Интервалы: 1

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

2025-05-15

Дата



Заведующий кафедрой



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Сагынгалиева Рината Рустамовна

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Исследование и обзор существующих технологий по оптоволоконным гироскопам для беспилотных летательных аппаратов

Научный руководитель: Ерлан Таштай

Коэффициент Подобия 1: 6.1

Коэффициент Подобия 2: 2

Микропробелы: 32

Знаки из здругих алфавитов: 7

Интервалы: 1

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

2025-05-15

Дата



Сұңғат Марксұлы

проверяющий эксперт