*Содержание.*

Введение

1. Принципы волоконно-оптической гироскопии

1.1. Основные характеристики ВОГ

1. Принцип взаимности и регистрация фазы в ВОГ
2. Модель шумов и нестабильностей в ВОГ
3. Влияние элементов ВОГ на точностные характеристики системы
4. Характеристики источников излучения
5. Шумовые характеристики волоконно-оптического контура
6. Шумовые характеристики фотодетекторов
7. Анализ прямых динамических эффектов (температурных градиентов и механических напряжений
8. Влияние внешнего магнитного поля на точностные характеристики ВОГ
9. Методы компенсации погрешностей
10. Компенсация паразитной модуляции в волоконно-оптическом гироскопе
11. Компенсация избыточного шума в волоконно-оптическом гироскопе с ответвителем типа 3x3
12. Компенсация обратного рэлеевского рассеяния
13. Компенсация влияния эффекта Керра на точность ВОГ
14. Расчет сметной калькуляции НИР
15. Исходные положения
16. Определение трудоемкости и календарных сроков работы
17. Расчет расходов по статьям затрат и составление сметной калькуляции
18. Выводы по расчету
19. Безопасность жизнедеятельности и охрана труда
20. Организация рабочих мест
21. Температура, влажность, давление
22. Требования к освещению
23. Требования к уровням шума и вибрации
24. Требования к защите от статического электричества и излучений.
25. Требования к видеотерминальному устройству
26. Электробезопасность
27. Пожарная безопасность
28. Предполагаемые методы защиты
29. Экология и охрана окружающей среды

Заключение

*Введение*

Волоконный оптический гироскоп (ВОГ) - оптико-электронный прибор, создание которого стало возможным лишь с развитием и совершенствованием элементной базы квантовой электроники. Прибор измеряет угловую скорость и углы поворота объекта, на котором он установлен. Принцип действия ВОГ основан на вихревом (вращательном) эффекте Саньяка.

Интерес зарубежных и отечественных фирм к оптическому гироскопу базируется на его потенциальных возможностях применения в качестве чувствительного элемента вращения в инерциальных системах навигации, управления и стабилизации. Этот прибор в ряде случаев может полностью заменить сложные и дорогостоящие электромеханические (роторные) гироскопы и трехосные гиростабилизированные платформы. По данным зарубежной печати в будущем в США около 50% всех гироскопов, используемых в системах навигации, управления и стабилизации объектов различного назначения, предполагается заменить волоконными оптическими гироскопами.

Возможность создания реального высокочувствительного ВОГ появилась лишь с промышленной разработкой одномодового диэлектрического световода с малым затуханием. Именно конструирование ВОГ на таких световодах определяет уникальные свойства прибора. К этим свойствам относят:

1. потенциально высокую чувствительность (точность) прибора, которая уже сейчас на экспериментальных макетах 0,1 град/ч и менее;
2. малые габариты и массу .конструкции, благодаря возможности создания ВОГ полностью на интегральных оптических схемах;
3. невысокую стоимость производства и конструирования при массовом изготовлении и относительную простоту технологии;
4. ничтожное потребление энергии, что имеет немаловажное значение при использовании ВОГ на борту;
5. большой динамический диапазон измеряемых угловых скоростей (в частности, например, одним прибором можно измерять скорость поворота от 1 град/ч до 300 град/с);
6. отсутствие вращающихся механических элементов (роторов) и подшипников, что повышает надежность и уде­шевляет их производство;
7. практически мгновенную готовность к работе, посколь­ку не затрачивается время на раскрутку ротора;
8. нечувствительность к большим линейным ускорениям и следовательно, работоспособность в условиях высоких механических перегрузок;
9. высокую помехоустойчивость, низкую чувствительность кмощным внешним электромагнитным воздействиям благодаря диэлектрической природе волокна;
10. слабую подверженность проникающей гамма-нейтронной радиации, особенно в диапазоне 1,3 мкм.

Волоконный оптический гироскоп может быть применен в качестве жестко закрепленного на корпусе носителя чувствительного элемента (датчика) вращения в инерциальных системах управления и стабилизации. Механические гироскопы имеют так называемые гиромеханические ошибки, которые особенно сильно проявляются при маневрировании носителя (самолета, ракеты, космического аппарата). Эти ошибки еще более значительны если инерциальная система управления конструируется с жестко закрепленными или «подвешенными» датчиками непосредственно к телу носителя. Перспектива использования дешевого оптического датчика вращения, который способен работать без гиромеханических ошибок в инерциальной системе управления, есть еще одна причина особого интереса к оптическому гироскопу.

Появление идеи и первых конструкций волоконного оптического гироскопа тесно связан с разработкой кольцевого лазерного гироскопа (КЛГ). В КЛГ чувствительным контуром является кольцевой самовозбуждающийся резонатор с активной газовой средой и отражающими зеркалами, в то время как в ВОГ пассивный многовитковый диэлектрический световодный контур возбуждается «внешним» источником светового излучения. Эти особенности определяют по крайней мере пять преимуществ ВОГ по сравнению с КЛГ:

1. В ВОГ отсутствует синхронизация противоположно бегущих типов колебаний вблизи нулевого значения угловой скорости вращения, что позволяет измерять очень малые угловые скорости, без необходимости конструировать сложные в настройке устройства смещения нулевой точки;

2. Эффект Саньяка, на котором основан принцип работы прибора, проявляется на несколько порядков сильнее из-за малых потерь в оптическом волокне и большой длины волокна.

3. Конструкция ВОГ целиком выполняется в виде твердого тела (в перспективе полностью на интегральных оптических схемах), что облегчает эксплуатацию и повышает надежность по сравнению с КЛГ.

4. ВОГ измеряет скорость вращения, в то время как КЛГ фиксирует приращение скорости.

5. Конфигурация ВОГ позволяет «чувствовать» реверс направления вращения.

Эти свойства ВОГ, позволяющие создать простые высокоточные конструкции полностью на дешевых твердых интегральных оптических схемах при массовом производстве привлекают пристальное внимание разработчиков систем управления. По мнению ряда зарубежных фирм, благодаря уникальным техническим возможностям ВОГ будут интенсивно развиваться.

Зарубежные авторы констатируют, что разработка конструкции ВОГ и доведение его до серийных образцов не простая задача. При разработке ВОГ ученые и инженеры сталкиваются с рядом трудностей. Первая связана с технологией производства элементов ВОГ. В настоящее время еще мало хорошего одномодового волокна, сохраняющего направление поляризации; производство светоделителей, поляризаторов, фазовых и частотных модуляторов, пространственных фильтров, интегральных оптических схем находится на начальной стадии развития. Число разработанных специально для ВОГ излучателей и фотодетекторов ограничено.

Вторую трудность связывают с тем, что при кажущейся простоте прибора и высокой чувствительности его к угловой скорости вращения он в то же время чрезвычайно чувствителен к очень малым внешним и внутренним возмущениям и нестабильностям, что приводит к паразитный дрейфам, т. е. к ухудшению точности прибора. К упомянутым возмущениям относятся температурные градиенты, акустические шумы и вибрации, флуктуации электрических и магнитных полей, оптические нелинейные эффекты флуктуации интенсивности и поляризации излучения, дробовые шумы в фотодетекторе, тепловые шумы в электронных цепях и др.

Фирмами и разработчиками ВОГ обе эти задачи решаются. Совершенствуется технология производства элементов в ВОГ, теоретически и экспериментально исследуются физическая природа возмущений и нестабильностей, создаются и испытываются различные схемные варианты ВОГ с компенсацией этих возмущений, разрабатываются фундаментальные вопросы использования интегральной оптики. Точность ВОГ уже сейчас близка к требуемой в инерциальных системах управления.

В специальной научной и периодической литературе проблеме ВОГ уже опубликовано множество научных статей. Анализ этих статей свидетельствует о необходимости дальнейшего изучения этой проблемы и разработки новых способов улучшения качественных характеристик ВОГ.

Систематизация и обобщение узловых вопросов теории и практики создания ВОГ также является важным этапом.

Задачей дипломной работы является анализ работы ВОГ, обобщенной модели шумов и нестабильностей и оценка предельной (потенциальной) чувствительности прибора. На основе свойства взаимности необходимо рассмотреть минимальную конфигурацию ВОГ. Затем оценить современное состояние элементной базы. При этом значительное внимание уделить свойствам волоконных световодов и провести анализ возможных неоднородностей и потерь для различных типов волокон. Рассмотреть основные элементы ВОГ: волоконный контур, излучатели и фотодетекторы, а также предложить способы компенсации шумов и нестабильностей ВОГ (таких, как обратное рэлеевское рассеяние, оптический нелинейный эффект, температурные градиенты, магнитное поле и др.).

Основной задачей дипломной работы является рассмотрение ключевых аспектов теории ВОГ на основе анализа погрешностей его элементов и качественной оценки точностных характеристик устройства с учетом использования различных подходов к решению проблемы повышения его чувствительности.

Необходимо также рассмотреть различные схемотехнические методы снижения уровня шумов и нестабильностей ВОГ.

Отдельно отразить технико-экономические аспекты работы, вопросы безопасности жизнедеятельности при проведении исследований, а также проблемы экологической безопасности при использовании прибора.

*1. Принципы волоконно-оптической гироскопии*

*1.1. Основные характеристики ВОГ*

Оптический гироскоп относится к классу приборов, в которых в замкнутом оптическом контуре распространяются встречно бегущие световые лучи. Принцип действия оптического гироскопа основан на «вихревом» эффекте Саньяка, открытым этим ученым в 1913 г. [1]. Сущность вихревого эффекта заключается в следующем. Если в замкнутом оптическом контуре в противоположных направлениях распространяются два световых луча, то при неподвижном контуре фазовые набеги обоих лучей, прошедших весь контур, будут одинако­выми. При вращении контура вокруг оси, нормальной к плоскости кон­тура, фазовые набеги лучей неодинаковы, а разность фаз лучей про­порциональна угловой скорости вращения контура. Для объяснения вихревого эффекта Саньяка разработаны три теории: кинематиче­ская, доплеровская и релятивистская . Наиболее простая из них - кинематическая, наиболее строгая - релятивистская, основанная на общей теории относительности. Рассмотрим вихревой эффект Сань­яка в рамках кинематической теории.

*A*

*B*

*M*



*C*

*r*

*α*



*dϕ*

*O*

*1*

*Ω*

*2*

*Контур*

Рис 1.1. Кинематическая схема вихревого эффекта Саньяка.

На рис. 1.1 изображен плоский замкнутый оптический контур произвольной формы, в котором распространяются в противополож­ных направлениях две световые волны 1 и 2 (рис. 1.1). Плоскость контура перпендикулярна оси вращения, проходящей через произ­вольную точку О. Угловую скорость вращения контура обозначим Ω. Участок пути светового луча АВ примем бесконечно малым, его длину обозначим Δl. Радиус-вектор произвольной точки контура А обозначим r. Отрезок дуги АВ' обозначим . При вращении контура вокруг точки О с угловой скоростью линейная скорость точки А равна . Учитывая, что треугольник AB'B мал:



, (1.1)



где α - угол между вектором линейной скорости точки А и касатель­ной AM к контуру в точке А.



Проекция линейной скорости точек контура на направление вектора скорости света в этих точках

. (1.2)



Если контур неподвижен, то время обхода участка контура АВ=Δl двумя противоположными лучами одинаково; обозначим его dt.

Тогда

dt = Δl / c =. (1.3)



При вращении контура с угловой скоростью кажущееся расстояние между точками А и В для встречно бегущих лучей изменяется. Для волны бегущей из точки А в точку В, т.е. в направлении, совпадающем с направлением вращения контура, расстояние удлиняется, так как за время dt точка В переместится на угол , перейдя в точку С.



Это удлинение пути для светового луча будет равно dt, поскольку в каждое мгновение луч направлен по касательной к контуру, по этой же касательной направлена проекция линейной скорости . Таким образом, отрезок пути, проходимый лучом, равен Δl + dt. Рассуждая аналогично, для встречно бегущего луча света будет иметь место кажущееся сокращение отрезка пути Δl - dt



Считая скорость света инвариантной величиной, кажущиеся удлинения и сокращения путей для встречных лучей можно эквивалентно считать удлинениями и сокращениями отрезков времени, т.е.

(1.4)



Подставляя выражения (1.2)-(1.3) для и dt, получаем



(1.5)



Из рис 1.1. следует

,



где Δs - площадь сектора .



С точностью до бесконечно малых второго порядка площадь АОВ можно заменить на Δs. Тогда

(1.6)



Полное время распространения встречных лучей вдоль всего контура

, (1.7)



где суммирование ведётся по числу элементарных секторов, на которые разбит весь контур.

Таким образом, полное время, затрачиваемое лучом, бегущим по часовой стрелке при обходе всего вращающегося контура, больше чем полное время, затрачиваемое лучом, бегущим против часовой стрелки.

Разность времен и или относительное запаздывание встречных волн



, (1.8)



где S - площадь всего контура.

Если относительное запаздывание встречных волн (1.8) возникающее при вращении, выразить через разность фаз встречных волн, то она составит

, (1.9)



где , .



Разность фаз является фазой Саньяка. Как видно, фаза Саньяка пропорциональна угловой скорости вращения контура.



Кинематическую теорию вихревого эффекта Саньяка ещё проще объяснить, рассматривая идеальный кольцевой оптический контур радиуса (рис 1.2.).



Контур

B

Rk

З1

З2

A

Ω

Рис 1.2. Эффект Саньяка в кольцевом оптическом контуре.

Луч света приходит в точку А и с помощью зеркал и расщепляется на два луча, один из которых распространяется по часовой стрелке в контуре, а другой - против часовой стрелки. С помощью этих же зеркал, после распространения в контуре лучи объединяются и направляются по одному, пути. При неподвижном контуре пути прохождения лучей одинаковы и равны



, (1.10)



, где с - скорость света, τ - время прохождения периметра контура лучом.

Оба луча приходят в точку А на расщепитель в фазе. Если контур вращается с постоянной угловой скоростью Ω , то луч, распространяющийся по часовой стрелке, прежде чем попадет на перемещающийся расщепитель, пройдет путь

(1.11)



Это вызвано тем, что за время прохождения луча по замкнутому контуру расщепитель, находившийся ранее в точке А, уйдет в точку В. Для луча, распространяющегося против часовой стрелки, путь

(1.12)



Как видим, пути распространения противоположно бегущих лучей разные. Поскольку скорость света с величина постоянная, это эквивалентно разным временам прохождения лучей, распространяющихся в противоположных направлениях замкнутого вращающегося контура, и .



Разность времен распространения

(1.13)



В приближении первого порядка по можно записать



(1.14)



Что совпадает с выражением (1.8), полученным выше, если считать - площадь контура.



Эффект Саньяка может быть объяснен на основе понятия доплеровского сдвига частоты. Эффектом Доплера называется явление изменения частоты колебаний, излученных передатчиком и принимаемых приемником, наблюдающееся при взаимном относительном перемещении излучателя и приемника. При этом частота принятого колебания

, (1.15)



где f - частота излученного колебания, V - скорость перемещения передатчика, а знаки «+» или «-» соответствуют сближению или удалению передатчика относительно наблюдателя.

Доплеровский частотный сдвиг



пропорционален скорости перемещения излучателя.

Рассмотрим кольцевой оптический контур радиуса вращающийся с угловой скоростью Ω (рис. 1.3.). Аналогом перемещающегося излучателя в контуре является движущееся с линейной скоростью отражающее зеркало. При вращении контура встречно бегущие лучи имеют различные длины волн вследствие доплеровского сдвига , накапливаемого при отражении волны от зеркала, смещающегося со скоростью .



При вычислении фазы, накопленной в обоих плечах оптического контура, необходимо рассматривать вращающуюся систему в целом. Оба оптических пути тогда равны , но длины волн отличаются на доплеровский сдвиг . Тогда относительный фазовый сдвиг



(1.16)



Определим величину . Длина волны излучения, претерпевшего доплеровский сдвиг:



Откуда



Подставляя полученное выражение в формулу для относительного фазового сдвига, получаем

(1.17)



Фаза Саньяка

(1.18)



что полностью совпадает с выражением (1.9), полученным при вычислении разности времен обхода лучом вращающегося контура.

Таким образом, мы рассмотрели два эквивалентных подхода к объяснению эффекта Саньяка. В первой интерпретации эффект проявляется как разность времен распространения встречно бегущих лучей во вращающемся контуре; во второй - как разность длин волн лучей в двух плечах контура одинаковой оптической длины.

Измеряя электронным устройством разность фаз, можно получить информацию от угловой скорости вращения основания (объекта), на котором закреплен контур. Интегрируя измеренный сигнал, получают угол поворота основания (объекта). Эта информация затем используется для управления и стабилизации объектов.

В зависимости от конструкции замкнутого оптического контура различают два типа оптических гироскопов. Первый тип, так называемый кольцевой лазерный гироскоп (КЛГ), в котором контур образован активной средой (смесью газов гелия и неона) и соответствующими зеркалами, образующими замкнутый путь (кольцевой лазер) . Второй тип—волоконный оптический гироскоп (ВОГ), в котором замкнутый контур образован многовитковой катушкой оптического волокна. Принципиальная схема ВОГ показана на рис. 1.3.

*Устройство обработки*

*Фото-*

*детектор*

*Источник*

*излучения*

*Ω*



*R*

*Ω*

Рис 1.3. Принципиальная схема волоконно-оптического гироскопа.

Если контур ВОГ образовать нитью оптического волокна длиной L, намотанного на цилиндр радиуса R, то фаза Саньяка

(1.19)



где R - радиус витка контура; N - число витков; S -площадь витка контура.

В соответствии с рис. 1.3., излучение источника подается на светоделитель и разделяется на два луча. Два луча, обошедшие контур в противоположных направлениях, рекомбинируют на светоделителе и смешиваются в фотодетекторе. Результирующее колебание можно записать в виде

(1.20)



где - амплитуды колебаний; - частота излучения; ; ; - начальная фаза колебания; - фаза Саньяка.



Интенсивность излучения на фотодетекторе

(1.21)



Обозначив интенсивность излучения на выходе лазерного диода считая, что в волоконном контуре отсутствуют потери, и полагая, что светоделитель разделяет энергию точно поровну, имеем:



(1.22)



Тогда выражение (1.21) принимает вид:

(1.23)



Анализ выражения позволяет сделать вывод о низкой чувствительности прибора в данной конфигурации к малым угловым скоростям:

(1.24)



Для максимизации чувствительности к малым изменениям информативного параметра (фазы Саньяка) в волоконный контур необходимо поместить простой фазовый модулятор, дающий «невзаимный» фазовый сдвиг π/2 между двумя противоположно бегущими лучами. Тогда интенсивность на фотодетекторе при малых угловых скоростях изменяется почти линейно:

(1.25)



а чувствительность ВОГ будет находиться на максимальном значении 0.5.

Различные способы введения «невзаимного» фазового сдвига будут рассмотрены ниже.

В конфигурации, приведенной на рис 1.3., выходной ток фотодетектора повторяет изменения интенсивности (мощности) входного излучения, т.е.:

(1.26)



где η - квантовая эффективность фотодетектора; q - заряд электрона; h - постоянная Планка; f - частота оптического излучения.

Если пренебречь постоянной составляющей выходного тока, то на выходе фотодетектора получим сигнал

(1.27)



При введении невзаимного фазового сдвига π/2 и для малых значений выходной ток:



(1.28)



Таким образом, значения выходного тока пропорциональны фазе Саньяка, которая в свою очередь пропорциональна угловой скорости вращения контура Ω.

*1.2. Принцип взаимности и регистрация фазы в ВОГ*

В типичных экспериментальных конструкциях гироскопов используется катушка с R = 100 мм при длине волокна L = 500 м . Обнаружение скорости вращения в 1 град/ч требует регистрации фазы с разрешением порядка 10-5 рад. Это показано на рис. 1.4., где изображены значения фазового сдвига в функции угловой скорости вращения контура и величины LR при λ = 0,63 мкм .

Оптические интерференционные системы фазовой регистрации с такой чувствительностью хорошо известны, однако в гироскопах существуют некоторые особые моменты, связанные с регистрацией фазы. Первый связан с тем фактом, что зачастую гироскоп работает с номинальной почти нулевой разностью хода, и для малых изменений в относительном значении фазы имеет место пренебрежимо малое изменение интенсивности на выходе.

*Ω (рад/сек)*

*1*

*10-2*

*10-6*

*10-4*

*10-8*

*1*

*102*

*Δϕс(рад)*

*LR (м2)*

*104*

*10-2*

*103*

*102*

*101*

*100*

*10-4*

*10-6*

*10-8*

Рис 1.4. Фаза Саньяка в угловой скорости вращения для различных значений параметра LR.

Работа при смещении фазы в 90° максимизирует чувствительность, однако это вносит некоторую невзаимность для двух направлений распространения лучей в гироскопе, т. к. фаза луча, распространяющегося по часовой стрелке, отличается от фазы луча, распространяющегося против часовой стрелки, в отсутствии вращения.

Свойство взаимности - это второй важный момент в ВОГ. Фазовая невзаимность в ВОГ определяется дифференциальной разностью фаз встречно бегущих лучей. Любая фазовая невзаимность (разность фаз) для двух направлений дает изменения в показаниях гироскопа. Если невзаимность является функцией времени, то имеет место некоторый временной дрейф в показаниях гироскопа. Волокно длиной 500 м дает фазовую задержку порядка 1010 рад. Таким образом, для того чтобы зарегистрировать скорость вращения 0,05 град/ч, нужно, чтобы пути распространения противоположно бегущих лучей согласовывались с относительной точностью до 10-17 рад.

Следует, кроме того, отметить, что сам принцип действия волоконного оптического гироскопа основан на невзаимном свойстве распространения встречных волн во вращающейся системе отсчета (появление разности фазовых набегов двух лучей при вращении). Поэтому несомненна важность анализа невзаимных эффектов и устройств в ВОГ (по меньшей мере, хотя бы для определения точности прибора).

Принцип взаимности хорошо иллюстрируется известной теоремой Лоренца для взаимных систем . Если характеризовать две электрод магнитные волны векторами , и ,, где - вектор напряженности электрического поля, а - вектор напряженности магнитного поля, то принцип взаимности выполняется для систем, у которых



(1.29)



где - антисимметричные тензоры магнитной и диэлектрической

проницаемостей материальной среды соответственно.

Условием невзаимности является неравенство нулю приведенного выше соотношения. К средам, проявляющим невзаимность, относятся магнитно-гиротропные материалы (ферромагнетики): электрически гиротропные среды (диамагнетики), находящиеся под действием магнитного поля; прозрачные диэлектрики; среды, совершающие поступательное движение относительно любой системы координат, в которой задано электромагнитное поле; вращающиеся среды; канализирующие системы типа волноводов и световодов. Последние случаи представляют особый интерес, поскольку при вращении ВОГ появляется фазовая невзаимность, дающая фазовую разность Саньяка.

При вращательном движении среды условие невзаимности имеет вид

(1.30)



Наличие канализирующей среды в ВОГ (световода) приводит к появлению ряда невзаимных эффектов, приводящих к появлению «паразитной» разности фаз встречно бегущих лучей. Эта паразитная разность фаз существенно искажает «полезную» фазу Саньяка, увеличивает значение надежно регистрируемой фазы Саньяка (т.е. ухудшает чувствительность прибора). Кроме того паразитная разность фаз, обусловленная невзаимными эффектами, носит зачастую характер случайных флуктуаций.

Исключение случайных флуктуаций может потребовать длительного накопления (интегрирования) выходного сигнала ВОГ, с тем чтобы выделить полезную составляющую (как показано в [1] в некоторых экспериментальных установках высокочувствительных ВОГ время интегрирования доходит до минут и даже до десятков минут).

Применительно к ВОГ анализ принципа взаимности удобно проводить для цепи с четырьмя входами и выходами . Для оптического волновода четыре входа соответствуют вводам излучения вдоль двух взаимно перпендикулярных направлений поляризации на каждом конце волокна. Соответствующие входы и выходы определяются вдоль идентичных поляризационных осей.

Отсюда следует, что в случае ввода излучения с исходным направлением поляризации Х свет, выходящий с ортогональным направлением поляризации У, будет обладать различными набегами фазы в каждом направлении распространения, а свет, выходящий с исходным направлением поляризации X, будет обладать одинаковыми набегами фазы для каждого направления распространения.

В этом часть требований, налагаемых интерпретацией теоремы взаимности Лоренца, которая постулирует, что в случае линейной системы оптические пути в точности взаимны, если данная входная пространственная мода оказывается такой же на выходе.

Одним из параметров пространственной моды является поляризация; второй параметр также должен быть определен, например пространственное распределение (расположение) моды. Следовательно, на конце контура ВОГ должны быть как поляризационный фильтр (селектирующий исходную поляризацию), так и пространственный фильтр, что будет удовлетворять принципу взаимности Лоренца .

Эти довольно простые устройства в конструкции ВОГ (при условии, что они могут быть реализованы с достаточной точностью) будут гарантировать условия взаимности в системе, но только в том случае, если выполняется условие линейности. Если же нелинейности значительны, то ВОГ будет обладать взаимностью в том случае, если имеется точная симметрия относительно средней точки волоконного контура. Это условие подразумевает, что энергия, вводимая в каждый конец контура, одинакова и что свойства волокна равномерно распределены (или по крайней мере симметричны).

Мощность оптического излучения, вводимого в волокно, столь мала (всегда меньше чем 1...2 мВт), что, казалось бы, нелинейностями можно пренебречь. Однако чувствительность ВОГ к невзаимностям чрезвычайно высока и нелинейные эффекты (в частности, эффект Керра) приводят к заметным не взаимностям, эквивалентным скорости вращения выше 1 град/ч . В оптическом волокне имеет место вращение плоскости поляризации линейно-поляризованного света под действием внешнего магнитного поля (эффект Фарадея).

Вращение Фарадея — это другой невзаимный эффект. В случае линейно-поляризованного света полное вращение зависит от линейного интеграла тока, взятого по оптическому пути. В случае ВОГ этот интеграл равен нулю в магнитном поле Земли. Однако, более тщательное изучение взаимодействия света в волокне и магнитного поля вдоль волокна указывает на то, что истинным источником вращения является индуцированное круговое двойное лучепреломление и что упомянутый выше простой подход оказывается полезным только в том случае, если обе круговые компоненты поляризации (правая и левая) обладают одинаковыми амплитудами. Это справедливо только для случая линейно-поляризованного света.

При распространении света в волокне имеют место все возможные состояния поляризации и процент пребывания света в каждом собственном круговом поляризационном состоянии Фарадеевского ротатора изменяется вдоль оптического пути случайным образом. Это приводит в результате к определенной разности фаз для двух направлений распространения линейно-поляризованной моды на выходе.

Таким образом, ВОГ весьма чувствителен к магнитному полю Земли, и при конструировании ВОГ для измерения скорости вращения требуется магнитное экранирование (или обеспечение линейной поляризации света на всем пути в волокне). Предполагая, что магнитное поле Земли равно 27 и считая, что компенсация поля отсутствует на 5% длины волокна, можно получить значение отклонения фазы, которое эквивалентно скорости вращения Земли.



Вышеизложенные моменты включали невзаимные эффекты, индуцированные в волокне; однако, уже даже первые этапы при конструировании ВОГ с точки зрения сохранения взаимности в системе регистрации должны заключаться в том, чтобы обеспечить одинаковую длину оптических путей в ВОГ.

Из рис. 1.3. видно, что эта конфигурация не обладает свойством взаимности, так как пучок света, распространяющийся по часовой стрелке, проходит через делитель света дважды, а пучок света, распространяющийся против часовой стрелки, отражается от светоделителя дважды. Но в то же время взаимный оптический выходной путь от чувствительного контура идет в направлении обратно к источнику (от светоделителя к диоду), т. е. вдоль входного оптического пути.

Следовательно, добиться взаимности в системе регистрации можно, если поместить второй расщепитель пучка вдоль входногo оптического пути (рис. 1.5.).

Диапазон скоростей вращения, которые измеряются высокочувствительным гироскопом инерциальных систем управления, простирается от 0,1 град/ч до 400 град/ч. При LR = 100 м этим значениям скорости соответствует диапазон изменения фазы от 10 до 10 рад (рис.1.4.).



*Устройство обработки*

*Фото-*

*детектор*

*Источник*

*излучения*

*Ω*



*R*

*Ω*

*90°*

*ФМ*

*0°*

Рис 1.5. Схема ВОГ с постоянным смещением разности фаз.

К настоящему времени уже затрачены значительные усилия на увеличение чувствительности прибора к низким скоростям, и в то же время весьма мало внимания уделяется проблемам, связанным с увеличением требуемого динамического диапазона.

Как уже отмечалось, в случае необходимости измерения больших изменений интенсивности для данного изменения фазы нужно внести фазовый сдвиг π/2, т. е. интерферометр должен работать в режиме квадратуры. В этом режиме связь между изменениями интенсивности и изменениями фазы является линейной (до 1%) только до максимальных отклонений фазы в 0,1 рад. Компенсация нелинейности может быть осуществлена в самой системе регистрации, однако лишь до максимального отклонения фазы порядка 1 рад.

Существует ряд способов регистрации фазы, которые могут быть использованы при конструировании ВОГ.

Наиболее распространены схемы, где используется статическая разность фаз в 90° между двумя лучами и схемы с переменной разностью фаз в 90°.

Статическая невзаимная разность фаз между лучами, распространяющимися по часовой и против часовой стрелки, может создаваться, например, с помощью элемента Фарадея, размещаемого на одном конце волоконного контура ( рис. 1.5.). Изменения регистрируемой интенсивности на взаимном выходе соответствуют изменениям в значении относительной фазы для двух лучей, обегающих контур.

Этот способ имеет ряд недостатков. Небольшие изменения в интенсивности излучения источника эквивалентны паразитным изменениям фазы, а изменения в смещении на 90° также превращаются в эквивалентную считываемую скорость вращения.

Основываясь на принципах смещения фазы можно предложить другой принцип регистрации обладающий более высокой чувствительностью.

Относительная фаза для лучей, распространяющихся по двум направлениям, модулируется по фазе ( - π/2, π/2) на частоте 1/2Т (Т - время прохождения луча через контур). Таким образом, свет, инжектируемый в момент времени , в направлении по часовой стрелке испытывает задержку на 90°, свет, распространяющийся в направлении против часовой стрелки, не испытывает задержки (это определяется положением фазового модулятора, как показано на рис. 1.4.).



Однако, к тому моменту времени, когда движущийся против часовой стрелки луч достигнет положения фазового модулятора, смещения фазы не будет. Свет, инжектируемый по часовой стрелке в момент, времени , интерферирует с волной, распространяющейся против часовой стрелки со сдвигом фаз - 90°, и т. д.



Следовательно, результирующая волна на выходе, которая включает как эффект периодического фазового смещения (дающего в принципе постоянный уровень интенсивности на выходе), так и фазовый сдвиг из-за эффекта Саньяка, модулируется так, как это показано на рис. 1.5. Таким образом, выходной сигнал фотодетектора



При модуляции:

(1.31)



при



и

(1.32)



при



Глубина модуляции зависит от фазы, индуцированной вращением .

При создании ВОГ для модуляции обычно используется цилиндрический пьезоэлектрический датчик, вокруг которого намотано волокно. Более удобно использовать синусоидальную модуляцию относительной фазы двух противоположно бегущих лучей. Если разность фаз, индуцированная вращением, равна , то легко показать, что переменная составляющая интенсивности суммарной волны на выходе интерферометра, с учетом периодической фазовой модуляции на частоте и с девиацией будет равна



Используя стандартное разложение по Бесселевым функциям, получаем:



Таким образом регистрация на частоте модуляции дает сигнал, амплитуда которого пропорциональна ; эта величина может быть сделана максимальной, если выбрать значение , максимизирующее (т.е. 1.8 рад ).



Величина девиации является максимальной индуцированной эффективной разностью фаз между лучами, движущимися по часовой стрелке и против часовой стрелки за время цикла модуляции. При оценке этого значения надо знать не только глубину модуляции самого датчика, необходимо учитывать также пролетное время для оптического пути в волокне.



*1.3. Модель шумов и нестабильностей в ВОГ.*

Волоконный оптический гироскоп представляет собой достаточно сложную оптико-электронную систему. При конструировании реального прибора оптические элементы и электронные устройства должны выбираться и компоноваться так, чтобы минимизировать влияние внешних возмущений (температурных градиентов, механических и акустических вибраций, магнитных полей и др.). В самом приборе, кроме того, имеет место ряд внутренних источников шумов и нестабильностей. Условно эти шумы и нестабильности можно разделить на быстрые и медленные возмущения. Быстрые возмущения оказывают случайное кратковременное усредненное влияние (секунды) на чувствительность ВОГ; они отчетливо проявляются при нулевой скорости вращения (кратковременный шум). Медленные возмущения вызывают медленный дрейф сигнала, приводящий к долговременным уходам в считывании показаний ВОГ (долговременный дрейф).

Обобщенная модель источников шумов и нестабильностей в ВОГ показана на рис. 1.6.

ФД

ИИ

*Дробовые шумы*

*Мультипликативные шумы (ЛФД)*

*Тепловые шумы*

*нагрузочного*

*сопротивления*

*Флуктуации*

*интенсивности*

*Флуктуации частоты*

*Обратное рассеяние от луча, бегущего по часовой стрелке (когерентное,*

*некоге­рентное)*

*Изменение характеристик*

*светоделителя*

*(ответвителя)*

*Тепловые градиенты*

*Поляризационная связь*

*Обратное рассеяние от луча, бегущего против часовой стрелки (когерентное, некогерентное)*

*Магнитооптический эффект (Фарадея)*

*Электрооптический эффект (Керра)*

Рис 1.6. Обобщённая модель шумов и нестабильностей в ВОГ.

Если исключить влияние всех источников шумов и нестабильностей в ВОГ, что, конечно возможно лишь в принципе, то всегда остаются принципиально неустранимые шумы - так называемые квантовые или фотонные шумы; их называют также дробовыми шумами. Эти шумы появляются лишь в присутствии полезного оптического сигнала на входе фотодетектора и обусловлены случайным распределением скорости прихода фотонов на фотодетектор, что приводит к случайным флуктуациям тока фотодетектора. В этом случае чувствительность (точность) ВОГ ограничивается лишь дробовыми (фотонными) шумами. Чувствительность (точность) ВОГ, определяемая дробовыми (фотонными) шумами, как и всяких других оптических информационно-измерительных систем, является фундаментальным пределом чувствительности (точности) прибора. Фотонные шумы являются следствием квантовой природы светового излучения. Применительно к оптическим системам передачи информации предельная помехоустойчивость этих систем, обусловленная фотонными шумами, была вычислена в [2].

Следуя работам [1,2], проведем оценку фундаментального предела чувствительность (точности) ВОГ.

Уровень фотонных шумов зависит от интенсивности оптического излучения, падающего на фотодетектор, и определяется флуктуациями интенсивности оптического излучения.

Полученная выше формула для интенсивности излучения на фотодетекторе позволяет записать выражение для мощности излучения, падающего на фотодетектор в виде:

, (1.33)



где Р - мощность входного в ВОГ излучения.

Если считать, что система ВОГ имеет статическое смещение по фазе π/2, то зависимость мощности от фазы Саньяка примет вид

(1.34)



Из этого выражения следует, что дробовые (фотонные) шумы, обусловленные процессом детектирования мощности излучения, связаны с появлением "фазовых" шумов и соответственно приводят к ошибке измерения угловой скорости вращения. Если фотодетектор принимает поток фотонов, то число обнаруживаемых фотонов в единицу времени является случайной величиной, распределенной по закону Пуассона (в случае использования лазерного излучателя) Математическое ожидание числа фотонов, падающих на фотодетектор, за время интегрирования Т равно средней энергии, деленной на энергию одного фотона:

(1.35)



где h - постоянная Планка; f - частота излучения.

Среднеквадратическое значение числа фотонов пуассоновского распределения равно квадратному корню из среднего значения, т. е.



Найдем среднеквадратическое значение "фазового" шума:

(1.36)



Тогда с учётом выражения (1.35)получим:

(1.37)



где - полоса пропускания системы обнаружения и обработки сигнала.



Для типовых значений мкВт и Гц



Отсюда следует, что при ширине полосы 1 Гц предел чувствительности по измеряемой фазе составляет рад.



Для определения среднеквадратической ошибки измерения угловой скорости вращения, обусловленной фотонным шумом, воспользуемся выражением для фазы Саньяка :

(1.38)



Далее получаем:

(1.39)



Приняв что типовой ВОГ имеет L = 1 км, D = 10 см, (1 / 2)P0 = 100 мкВт, f = Гц, имеем:



(град/ч) /



Откуда следует, что для ширины полосы 1 Гц и для контура с LR = 50 порог регистрации скорости вращения составляет 0.01 град/ч. Выражая полосу пропускания через единицы, обратные часам, получаем выражение для минимального случайного дрейфа ВОГ



град/ч 1/2



Оценку предельной чувствительности ВОГ можно найти по отношению сигнал-шум на выходе устройства обработки. Устройство обработки выходного сигнала ВОГ состоит из фотодетектора с квантовой эффективностью η, усилителя с коэффициентом усиления (умножения) G , нагрузочного сопротивления Rн и низкочастотного фильтра с полосой пропускания Δf.

Выходной ток фотодетектора:

(1.40)



где , q - заряд электрона.



Учитывая коэффициент усиления G , сигнальную составляющую тока запишем в виде

(1.41)



Мощность сигнальной составляющей равна

(1.42)



Мощность дробовых шумов согласно стандартной методике вычисления отношения сигнал-шум вычисляется по формуле Шотки и равна:

(1.43)



При вычислении мощности шума учитываются только принципиально неустранимые дробовые шумы полезного сигнала.

Отношение сигнал-шум примет вид

(1.44)



Полагая (с / ш) = 1 , заменяя функцию синуса его аргументом, подставляя вместо Δϕс ее значение через угловую скорость вращения, получаем минимально обнаруживаемую угловую скорость вращения:



Полученное выражение с точностью до постоянного множителя совпадает с выражением:



Таким образом мы получили важные соотношения, дающие право полагать, что с увеличением площади контура ВОГ (LR) и ростом мощности сигнала P0  предельная чувствительность ВОГ возрастает. С уменьшением полосы Δf, вследствие уменьшения уровня фотонных (дробовых) шумов, предельная чувствительность ВОГ также возрастает.

Оценка предела чувствительности, обусловленной дробовым шумом, может измениться под влиянием действия ряда факторов.

Первым является квантовая эффективность фотодетектора, уменьшение которой приводит к уменьшению отношения сигнал-шум. Другой фактор заключается в том, что подходящим образом взвешенная средняя мощность, попадающая на фотодетектор, определяет уровень дробового (фотонного) шума, и она может быть меньше, чем максимальная мощность. Однако не всегда ясно, как проводить процедуру взвешивания. Между оценкой и достигаемым пределом дробового шума может быть разница примерно в 2 раза.

Существуют также другие более слабые расхождения, определяемые особенностями процесса детектирования. Кратковременная чувствительность ВОГ, приближающаяся к указанному квантовому пределу, была отмечена в работах [1,2]. Подобная чувствительность может быть достигнута при тщательном уменьшении всех видов других шумов до очень низкого уровня. Например, тепловой шум усилителя можно уменьшить, если соответствующим образом выбрать сопротивление нагрузки фотодиода; кроме того, можно использовать усилитель с низким коэффициентом шума; сейчас уже достигнут коэффициент шума менее 1 дБ. Другого вида шумы и нестабильности в ВОГ можно уменьшить или компенсировать способами, рассмотренными в гл. 3.

Рассмотрим обобщенную модель шумов и нестабильностей ВОГ. Дадим краткую характеристику основных возмущений реального ВОГ.

Одним из главных источников шума в системе ВОГ является обратное рэлеевское рассеяние в волокне, а в некоторых системах еще и отражение от дискретных оптических элементов, используемых для ввода излучения в систему. Физически эти шумы появляются

из-за рассеяния светового излучения прямого луча на микрочастицах и неоднородностях среды распространения.

Шумы, связанные с обратным рассеянием и отражением, могут содержать две компоненты: когерентную и некогерентную. Некогерентная составляющая увеличивает общий уровень хаотической световой мощности на детекторе, это источник дополнительных дробовых шумов. Некогерентная составляющая не интерферирует с сигналом, связанным с измеряемой скоростью вращения.

Уровень дополнительного вклада в дробовой шум вычислялся, и во всех практических ситуациях величина его не более 1 дБ [3].

Когерентная составляющая обратного рассеяния и шумы отражения суммируются векторно с противоположно бегущими лучами; это приводит к возникновению ошибки в разности фаз между двумя лучами, зависящей от фазы шумового сигнала. Например, как отмечается в работе [3], френелевское отражение от граничной поверхности стекло-воздух составляет около 4% по интенсивности.

В наихудших условиях эта компонента может сложиться когерентно с основным лучом и дать изменение фазы более чем 10-1 рад, что эквивалентно скорости вращения около 10 град/с. Ошибку за счет когерентного отражения можно исключить, если использовать в ВОГ источник излучения с длиной когерентности много меньше, чем длина волоконного контура. Тогда шум связанный с отражением на конце волокна, суммируется некогерентно с полезным сигналом.

Шум, связанный с когерентным обратным рэлеевским рассеянием, может быть уменьшен подобным же образом, т. е. посредством использования источника излучения с наиболее короткой длиной когерентности. Однако всегда имеется некий отрезок волокна, расположенный примерно в середине контура, длина которого равна длине когерентности источника, и именно этот участок волокна дает когерентную составляющую обратного рассеяния.

Оценка величины этого шума может быть сделана на основе простой модели, в которой предполагается, что потери в волокне имеют место благодаря равномерному рассеянию на крошечных неоднородностях в сердечнике волокна (рэлеевское рассеяние). Если волокно обладает потерями 10 дБ/км, то в одном метре рассеивается 0,1% падающей энергии; обратно рассеивается доля рассеянной энергии, равная квадрату числовой апертуры волокна. Таким образом, в данном одном метре волокна энергия порядка 10-5 от падающей рассеивается назад к источнику света.

Если рассматривать середину контура и если полное затухание в контуре равно 10 дБ, то центральная часть контура (длиной в один метр) дает отклонение в одну миллионную часть по мощности (10-6) по отношению к принимаемой мощности в устройстве сравнения фаз, что приводит к ошибке при оценке фазы, равной 10-3 рад (если обратное рассеяние когерентно). Тогда эквивалентная ошибка при оценке скорости вращения составляет величину около 150 град/ч (см. рис. 1.5).

Эффективная ошибка, связанная с оценкой скорости вращения, пропорциональна квадратному корню из длины когерентности излучения источника. Учитывая это, в работе [3] показано, что для обнаружения суточного вращения Земли эффективная максимальная длина когерентности равна 0,1 мм; для регистрации вращения со скоростью

0,1 град/ч длина когерентности составляет величину порядка нескольких микрометров.

Ряд исследователей используют модуляторы случайной фазы, размещаемые в середине контура для того, чтобы «декогерировать» (декоррелировать) шум обратного рассеяния .

Свойство взаимности ВОГ может нарушаться под влиянием изменений внешней температуры. Температурные градиенты, изменяющиеся во времени в волоконном контуре, приводят к появлению сигнала, эквивалентного не которому значению скорости вращения. Анализ для худшего случая указывает на необходимость жесткой температурной стабилизации контура, однако ограничения могут быть сняты в значительной степени, если сделать намотку катушки симметричной.

Отклонения от свойства взаимности имеют место лишь во время изменения температурного градиента и не имеют места, если температура всего контура изменяется однородно. Влияние температурного градиента, имеющего место между двумя стабильными распределениями температур, вызывает ошибку в считывании угловой скорости в течение температурных изменений.

Стабильность масштабного коэффициента (т. е. наклона кривой в функции от Ω весьма существенна в гироскопе. В случае ВОГ постоянство масштабного коэффициента определяется стабильностью площади витка контура и длины волны.



Площадь витка является функцией температуры и материала катушки, на которую наматывается контур. Весьма вероятно, что для прибора высокой точности потребуются стабилизация температуры. Возможно потребуется вносить температурную коррекцию в процессе обработки сигнала. Следует также заметить, что температурные коэффициенты расширения волокна и катушки для намотки должны быть хорошо согласованы с тем, чтобы минимизировать вызванные изменениями температуры потери на микроизгибах в волокне. Они имеют место в том случае, когда волокно находится под механическим напряжением, и могут составлять величину более 10 дБ/км.

Источником шумов в ВОГ, ухудшающих чувствительность прибора, являются флуктуации излучения оптического источника (лазерного диода, светодиода или суперлюминесцентного диода). Этот шум проявляется в флуктуациях измеряемого выходного сигнала. Излучение источника ВОГ может изменяться как по интенсивности, так и по длине волны генерируемого светового потока.

Шум, связанный с изменением интенсивности излучения, увеличивает общий уровень дробовых шумов; он может быть вызван либо флуктуациями тока смещения, прилагаемого к источнику, либо внутренними флуктуациями в самом источнике. В случае полупроводниковых лазерных источников шум, связанный с изменениями интенсивности, добавляет один или два децибела в общий уровень дробовых шумов. При проектировании ВОГ спектр подобного шума необходимо, конечно, знать; известно, что в случае полупроводниковых лазеров этот спектр весьма сложен.

Следует, однако, заметить, что во многих схемах регистрации, используемых в ВОГ, оптическая фаза преобразуется в интенсивность посредством интерферометрического процесса. На выходе электронного устройства считывают значения оптической интенсивности, эквивалентные фазе. Нестабильность в интенсивности излучения оптического источника (даже, если длина волны излучения остается постоянной) приводит к нестабильностям в значениях фазы.

Гетеродинные системы, а также системы регистрации с обращением фазы в нуль устойчивы по отношению к нестабильностям такого типа. Известно, что у полупроводников источников со временем появляется нестабильность интенсивности излучения, вызванная старением, однако этот эффект может быть скомпенсирован, если измерять полную интенсивность, от задней грани источника и регулировать соответствующим образом ток смещения. Неясно, насколько эффективна эта процедура, так как изменения в токе смещения вызовут соответствующие изменения температуры лазера, а это приведет к соответствующим изменениям в длине волны излучения на выходе, тем самым воздействуя на, масштабный коэффициент.

Как уже отмечалось, стабильность длины волны излучения источника излучения ВОГ непосредственно влияет на масштабный коэффициент прибора. Лазеры с термической стабилизацией могут быть достаточно стабильны, хотя изменения в длине волны излучения в зависимости от старения тока накачки и температуры теплоотвода должны быть включены в спецификацию при их предназначении для ВОГ; это позволит выбрать диоды с подходящими характеристиками.

Следует, однако, заметить, что шумы, связанные с изменением длины волны излучения источника ВОГ, незначительны в большинстве систем регистрации фазы. Они фактически декоррелируют по частоте обратное рэлеевское рассеяние излучения. Например, известны системы ВОГ, где излучение гелий-неонового лазера специально модулируется по частоте с тем, чтобы декоррелировать обратно рассеянное излучение.

Рассмотрим теперь шумы, появляющиеся в ВОГ из-за нелинейного характера взаимодействия излучения со средой, в которой оно распространяется. Несмотря на очень низкие уровни излучения, распространяющегося в ВОГ нелинейные эффекты могут быть весьма значительными, если учесть, конечно, что ВОГ очень чувствителен к фазовым невзаимностям в контуре. Нелинейный электрооптический эффект носит название эффекта Керра и состоит в изменении фазового набега световой волны, распространяющейся в среде, под действием интенсивности излучения (т. е. фаза изменяется в зависимости от квадрата амплитуды излучения). При исследованиях ВОГ было

замечено, что эффект Керра вносит значительный вклад в паразитный дрейф прибора. Рассмотрим для полноты модели шумов и нестабильностей наиболее важные аспекты влияния эффекта Керра на чувствительность ВОГ .

Фазовая постоянная распространения для волны, бегущей по часовой стрелке, пропорциональна сумме интенсивности прямой волны и удвоенной интенсивности обратной волны. То же справедливо для волны, бегущей против часовой стрелки в контуре. Следовательно вклады в нелинейность определяются как волной, распрестраняющейся по часовой стрелке, так и волной, распространяющейся против часовой стрелки. Если интенсивности встречно бегущих волн разные, а это может быть при температурных изменениях светоделителей пучков, ответвителей и т. д., то фазовые постоянные распространения для противоположно бегущих волн изменяются различным образом. Налицо фазовая невзаимность контура ВОГ, приводящая к соответствующему дрейфу прибора.

Результирующий дрейф можно записать в виде:

(1.46)



где В - постоянная; К - коэффициент расщепления светоделителя по мощности; I0 - интенсивность источника излучения.

Для компенсации паразитного дрейфа может быть предложен способ специальной модуляции излучения источника. Сущность способа состоит в том, что излучатель работает в режиме с 50%-ным излучательным циклом, что позволяет выровнять общие интенсивности встречно бегущих волн. Для обеспечения хорошей чувствительности ВОГ к измерению вращения, изменения в коэффициенте распределения энергии в расщепителе пучка должны выдерживаться с точностью до10-4 .

Самокомпенсацию влияния эффекта Керра можно также реализовать выбором источника излучения ВОГ с соответствующими спектральными и статистическими характеристиками. Как известно, гауссовский источник шумового поля, имея гауссово распределение амплитуды, обладает рэлеевским распределением огибающей или экспоненциальным распределением интенсивности. Для такого источника

(1.47)



что приводит к обращению в нуль паразитного дрейфа. Некоторые источники излучений, такие как суперлюминесцентный диод и полупроводниковый лазер, работающий в многомодовом несинхронизированном режиме, обладают распределением огибающей, близкой к рэлеевскому. Следовательно, использование таких излучателей в ВОГ позволит самокомпенсировать влияние эффекта Керра.

Нестабильность характеристик ВОГ, приводящая к появлению дрейфа в приборе, может быть обусловлена влиянием внешнего магнитного поля (эффект Фарадея).

При механическом несовершенстве конструкции ВОГ серьезным источником шумов могут быть акустические поля, механические вибрации и ускорения.

Для полноты статистической модели возмущений ВОГ следует хотя бы упомянуть о таких возмущениях, как шум типа ( низкочастотный шум фотодетектора ), спонтанные и стимулированные шумы лазерного источника излучения, мультипликативные, шумы ЛФД, рассеяние Бриллюэна (рассеяние на фононах - акустических образованиях в среде), рассеяние Ми ( рассеяние на больших неоднородностях в среде ). Однако, практически, уровень интенсивности этих шумов невысок.

Таким образом, мы рассмотрели обобщенную модель источников шумов и нестабильностей ВОГ. В зависимости от варианта конструкции ВОГ те или иные источники шумов и нестабильностей могут играть большую или меньшую роль. Основными источниками являются шумы обратного рэлеевского рассеяния, нелинейный электрооптический эффект, температурные градиенты, внешнее магнитное поле, а также нестабильность интенсивности и длины волны источника излучения. Принципиально неустранимым шумом является дробовый (фотонный) шум полезного сигнала, появляющийся в системе регистрации и определяющий фундаментальный предел чувствительности (точности) ВОГ.

Анализ свойства взаимности и обобщенной модели шумов и нестабильностей ВОГ позволяет рассмотреть схему так называемой минимальной конфигурации ВОГ . Такая конфигурация должна включать тот минимальный набор элементов, которые позволят создать работоспособный прибор достаточно высокой чувствительности.

Поскольку основные особенности работы ВОГ тесно связаны со свойством взаимности, а кроме того, даже небольшие отклонения взаимности могут привести к погрешностям в показаниях скорости вращения и к эффектам долговременного дрейфа - выбор минимальной конфигурации ВОГ должен быть основан на этом ключевом моменте - свойстве взаимности. Вариант минимальной конфигурации при веден на рис. 1.7.

Излучение источника с помощью устройства ввода излучения (возможна линзовая, иммерсионная, торцевая и другие системы) вводится в волоконный световод. Эффективность ввода излучения в одномодовое волокно зависит от степени пространственной когерентности излучения источника. Чем больше пространственная когерентность излучения, тем меньше потери при вводе излучения в волокно.

Расчет и эксперименты приведённые в [2] показали, что для уменьшения влияния обратного рэлеевского рассеяния и эффекта Керра излучатель должен обладать малой длиной временной когерентности. На практике в качестве излучателей используют светодиоды (СД),лазерные диоды (ЛД) и суперлюминисцентные диоды (СЛД). Последние два типа излучателей имеют достаточно высокую степень пространственной когерентности; СД имеет наименьшую временную когерентность.

Модовый фильтр обычно состоит из отрезка одномодового волокна (пространственный фильтр) и поляризатора. По-видимому, целесообразно пространственный фильтр выполнить из одномодового волокна, сохраняющего поляризацию.

*Поляризационное устройство*

*Модулятор*

*Пространствен-ный фильтр*

*М*

*Модулятор*

*Поляризатор*

*П*

*У*

*М*

*М*

*ИИ*

*P2*

*P1*

*Источник*

*Волоконный контур*

Рис 1.7. Минимальная конфигурация ВОГ.

Применение модового фильтра будет способствовать выполнению основных условий свойства взаимности Лоренца, тем самым уменьшая дрейф ВОГ. Стабильный модовый фильтр будет эффективен, если среда между входом и выходом волоконного контура будет сохраняться линейной и неизменной во времени.

Необходим точный контроль поляризации излучения на входе и выходе контура. Качество поляризатора зависит от степени режекции поляризатором лучей с ортогональной поляризацией. В худшем случае, когда на каждое направление поляризации приходится излучение равной интенсивности, нежелательный сигнал находится в квадратуре по фазе с полезным сигналом; именно в этом случае имеет место максимальная фазовая ошибка. Как сообщается в [3], для поляризатора с режекцией нежелательной поляризации в 70 дБ фазовое отклонение в системе регистрации составляет величину около 10-4 рад,

что эквивалентно уходу гироскопа около 20 град/ч. Однако уход можно уменьшить на один-два порядка даже и с использованием упомянутого поляризатора, если поляризации излучений на входе и выходе будут совпадать с осью поляризатора с точностью до 1°. Таким образом, вопрос стабильности поляризации излучения в ВОГ имеет весьма серьезное значение.

Экспериментальная конструкция ВОГ, рассмотренная в [3], была выполнена целиком на одномодовом волокне с устойчивой поляризацией и продемонстрировала высокую чувствительность. Сохранить устойчивой поляризацию в контуре можно, по-видимому, и при использовании обычного одномодового волокна, но намотку последнего надо производить на катушку определенного радиуса и с определенным механическим напряжением, поскольку сам факт наматывания волокна на катушку приводит к селекции и сохранению поляризационных свойств в системе.

Для улучшения степени режекции нежелательной поляризации возможно также использование двух или большего числа поляризаторов . Следует, однако, упомянуть, что полная деполяризация излучения в ВОГ дает иногда весьма хорошие результаты.

Пространственный фильтр, располагаемый между ответвителями P1 и P2, должен обладать пространственной характеристикой, перекрывающейся с модовой структурой на входе и выходе волоконного контура. Кроме того, он должен сохранять стабильное пространственное соотношение с торцами волокна; модовая структура в волок

не на входе и выходе контура должна быть идентичной.

Поскольку в ВОГ, как правило, используется одномодовое волокно, ослабление пространственным фильтром мод более высокого порядка не вызывает затруднений.

При применении в ВОГ обычного одномодового волокна (не сохраняющего поляризацию) внутрь контура помещают поляризационное устройство ПУ, которое дополнительно селектирует и контролирует поляризацию в контуре, тем самым стабилизируя оптическую мощность моды, выделяемой модовым фильтром.

На схеме минимальной конфигурации ВОГ (рис.1.7.) показаны модуляторы М, которые при необходимости могут быть включены в различные точки оптического гироскопа. Как правило - это частотные и фазовые модуляторы, назначение которых состоит в переносе фазы Саньяка на сигнал переменной частоты либо в частотной компенсации этой фазы - с тем, чтобы измерения угловой скорости проводить на переменном сигнале. Кроме того, модуляцией можно уменьшить шумы обратного рэлеевского рассеяния.

В качестве фотодетектора в практике конструирования ВОГ применяют фотодиоды (ФД), р - i - n -фотодиоды и лавинные фотодиоды (ЛФД). Мощность лазерного источника достаточна высока с тем, чтобы можно было использовать р - i - n -фотодиоды; однако при применении СЛД могут потребоваться лавинные фотодиоды с внутренним умножением. В последнем случае появляется дополнительный источник шумов - случайные флуктуации коэффициента лавинного умножения.

1. *Влияние элементов ВОГ на точностные*

*характеристики системы*

*2.1. Характеристики источников излучения для ВОГ.*

При конструировании волоконных оптических гироскопов, как правило, в качестве излучателей используют полупроводниковые лазеры (лазерные диоды ЛД), светодиоды (СД) и суперлюминесцентные диоды (СЛД). В ряде экспериментальных установок ВОГ, однако, применяют также гелий-неоновые оптические квантовые генераторы. Их использование объясняется, по-видимому, традиционным мнением о том, что в оптике при измерении фазовых соотношений предпочтительны высококогерентные источники излучений. При использовании гелий-неоновых ОКГ его излучение можно «декогерировать» частотной модуляцией, что уменьшит влияние обратного когерентного рэлеевского рассеяния, вносящего ошибку при измерении угловой скорости вращения. Более того, для компенсации эффекта Керра, также вносящего ошибку, можно применять широкополосные источники, приближающиеся по своим спектральным свойствам к тепловым источникам.

Кроме того, специфика конструкции ВОГ предъявляет дополнительные требования к источникам излучения. К ним относят: соответствие длины волны излучения номинальной длине волны световода, где потери минимальны; обеспечение достаточно высокой эффективности ввода излучения в световод; возможность работы источника излучения в непрерывном режиме без охлаждения; достаточно высокий уровень выходной мощности излучателя; долговечность, воспроизводимость характеристик, жесткость конструкции, а также минимальные габариты, масса, потребляемая мощность и стоимость.

Наиболее полно этим условиям отвечают полупроводниковые излучатели - ЛД, СД и СЛД. Рассмотрим некоторые характеристики излучателей.

Возможность использования полупроводниковых инжекционных лазеров в качестве источника излучения в ВОГ привлекает исследователей и конструкторов прежде всего их малыми габаритами и массой, высоким КПД, прямой токовой накачкой, твердотельной конструкцией и низкой стоимостью. Кроме того, вводя различные примеси, можно перекрывать требуемый диапазон длин волн.

В настоящее время создано большое количество типов полупроводниковых инжекционных лазеров или лазерных диодов (ЛД) на различных материалах. Принцип генерации излучения ЛД имеет ряд существенных отличий от принципа генерации лазеров других типов, что прежде всего связано с особенностями их энергетической структуры.

Рассмотрим в общих чертах технические параметры ЛД, что позволит нам оценить возможность использования тех или иных структур в волоконно-оптических гироскопах с учётом требований налагаемых на них.

В беспримесном полупроводнике различают следующие энергетические зоны: валентную, запрещенную и зону проводимости. В реальном полупроводнике нужно учитывать наличие примесей. Примеси являются причиной возникновения дополнительных энергетических уровней. Донорные примеси создают уровни вблизи зоны проводимости, а сами частицы примеси, ионизируясь, добавляют в возбужденную зону (зону проводимости) избыточные электроны. Акцепторные примеси имеют уровни вблизи валентной зоны. Эти примеси захватывают электроны из валентной зоны, образуя в ней избыточное количество дырок. Число электронов в зоне проводимости существенно превышает число дырок в валентной зоне (это характерно для полупроводника n-типа, для полупроводника р-типа наоборот).

При соединении полупроводников разных типов проводимости на границе их раздела образуется р-n-переход.

Характер распределения электронов по возможным энергетическим состояниям в полупроводнике зависит от концентрации легирующей примеси и температуры. Для того чтобы создать в полупроводнике условия генерации индуцированного излучения, нужно нарушить равновесное распределение по энергетическим уровням, т. е. перераспределить их так, чтобы на более высоких уровнях оказалось больше электронов, чем на нижних. В полупроводниковых материалах возможны различные переходы, электронов, такие как «зона—зона», «зона—примесь», и переходы между уровнями примеси. Переход электрона на

более высокие энергетические уровни сопровождается поглощением энергии извне. При переходе на более низкие уровни энергия выделяется. При этом выделяющаяся энергия излучается в виде электромагнитных колебаний, либо расходуется на нагрев кристаллической решетки.

Для перехода «зона—зона» инверсия населенности энергетических уровней имеет место, если число электронов в зоне проводимости больше, чем в валентной зоне. Инверсию населенности в полупроводниковых материалах можно реализовать лишь путем создания неравновесной концентрации электронов и дырок.

Основным способом создания инверсной населенности в полупроводниках является способ инжекции через р - п- переход неравновесных носителей тока. Такая инжекция реализуется подачей электрического смещения на р—п-переход в положительном направлении. Тогда потенциал на границе раздела полупроводников снижается и через

переход начинает протекать ток основных носителей дырок из р-области и электронов из n-области. Зона с инверсной населенностью возникает вблизи р - n-перехода. При переходах электронов из зоны проводимости в валентную зону возникает индуцированное излучение, т. е. процесс индуцированного перехода сопровождается излучательной рекомбинацией электронов и дырок в р - n -переходе. При излучательной рекомбинации выделяется избыточная энергия в виде светового кванта.

Эффект лазерной генерации света в полупроводниковых структурах возможен лишь при наличии положительной обратной связи по световому излучению; при этом усиление должно компенсировать оптические потери. Положительную обратную связь осуществляет оптический резонатор Фабри — Перо, образованный отражающими плоскопараллельными гранями кристалла, перпендикулярными плоскости р - n -перехода. Отражающие поверхности создаются путем полировки двух противоположных граней кристалла или путем скалывания по кристаллографическим плоскостям. Коэффициент отражения этих поверхностей составляет приблизительно 0,3. Однако даже при небольшой длине активного вещества (десятые доли миллиметра) такой коэффициент отражения достаточен для лазерной генерации благодаря большому коэффициенту усиления активной среды.

В настоящее время эффект вынужденной генерации получен на многих полупроводниковых материалах; почти перекрыт диапазон генерации от 0,33 до 31 мкм.

Одна из ранних конструкций инжекционного полупроводникового лазера была создана на материале GaAs. В лазерном диоде нижняя пластина состоит из GaAs с примесью теллура и имеет проводимость n-типа. Верхняя пластина состоит из GaAs с примесью цинка и имеет проводимость р-типа. Каждая пластина имеет контакт для соединения с источником питания. Геометрические размеры р - n -перехода составляют сотые доли миллиметра, толщина области, в которой создается излучение, 0,15...0,2 мкм. Торцевые отполированные грани образуют резонатор. Излучатель такого типа работает в импульсном режиме при достаточно глубоком охлаждении (77 К).

Для GaAs-лазеров с простым р - n-переходом пороговые плотности тока при комнатной температуре составляют значения > 105 А/см2. В таком режиме полупроводниковый лазер нагревается настолько сильно, что без хорошего теплоотвода длительная эксплуатация его иевозможия. Поэтому без охлаждения такие GaAs-лазеры работают только в импульсном режиме. Длительная эксплуатация излучателя при комнатной температуре (что важно для ВОГ) возможна лишь при уменьшении пороговой плотности тока примерно до 103 А/см2.

Требованиям низких пороговых плотностей тока и возможности длительной работы при комнатной температуре отвечают полупроводниковые лазеры на двойных гетероструктурах AIGaAs/GaAs. Они обладают еще целым рядом преимуществ, особенно важных при конструировании ВОГ.

В лазерах на структурах с двойными гетеропереходами уменьшается толщина активной области рекомбинации, обеспечивается удержание носителей и излучения в узкой области вблизи р - n -перехода. Это позволяет повысить КПД и создавать лазеры с заданной диаграммой направленности излучения. В режиме индуцированной генерации в двойной гетероструктуре затухание основной волны весьма мало, поскольку структура образует диэлектрический волновод.

При конструировании ВОГ в качестве излучателя, соединяемого с волоконным световодом, применяют полупроводниковые лазеры с полосковой геометрией контакта на двойных гетероструктурах. В таких конструкциях лазерное излучение выходит из малой области, что обеспечивает хорошие условия ввода излучения в световоды с низкой числовой апертурой. Из-за небольших размеров активной области лазер обладает малыми пороговыми и рабочими токами при достаточной выходной мощности, что обеспечивает длительную работу в непрерывном режиме при комнатной температуре. При малом размере активной

области проще получить площадь, свободную от дефектов, что важно для повышения эффективности лазера.

Типичные параметры полупроводниковых лазеров с двойной гетероструктурой, генерирующих в области 0.8 - 0.9 мкм, следующие: ширина линии генерации 0.2 - 5 нм, размеры излучающей области 0.5...30 мкм2 , средняя угловая расходимость излучения 5... 30° (в плоскости, параллельной р - n -переходу) и 30 ... 60° (в плоскости, перпендикулярной р - n -переходу), выходная мощность 1 ... 10 мВт, пороговый ток 20...200 мА, средняя долговечность 105 ч.

Современное состояние технологии изготовления кварцевых оптических световодов позволило создать световоды, имеющие минимум потерь и дисперсии в диапазоне длин волн 1,1 ... 1,7 мкм. Этот диапазон рекомендуется использовать также и разработчикам ВОГ. Эти потребности стимулировали разработку полупроводниковых лазеров на данный диапазон длин волн. Полупроводниковым материалом послужили тройные и четверные соединения. Были созданы полупроводниковые лазеры на гетероструктуре GalnAsP/lnP, излучающие на длинах воли 1,3 и 1,6 мкм. Появились сообщения о создании лазеров с гетероструктурами на основе соединений AIGaAsSb/GaAsSb, генерирующих на длинах волн 1,3 мкм и 1,5... 1,6 мкм.

При этом конструкции и параметры этих лазеров аналогичны конструкциям лазеров на AIGaAs.

Светодиоды (СД) генерируют некогерентное излучение, поскольку в них излучательная рекомбинация носит чисто спонтанный характер. Спектральное распределение линии излучения излучательной рекомбинации по крайней мере на порядок шире линии излучения лазерных диодов. Широкий спектр излучения СД весьма благоприятен для ВОГ, поскольку, за счет малой длины когерентности позволяет компенсировать влияние эффекта Керра и обратного рэлеевского рассеяния.

Коэффициент ввода излучения светодиодов в световоды с низкой числовой апертурой значительно меньше, чем для лазерных диодов. Однако СД проще в конструктивном выполнении и обладает меньшей температурной зависимостью мощности излучения. Так, в частности, выходная мощность СД с двойным гетеропереходом уменьшается лишь в два раза при увеличении температуры диода от комнатной до 100° С.

Возбуждение СД обеспечивается инжекцией носителей через р - n -переход. Как и обычный полупроводниковый лазер, простой СД содержит один р - n -переход в прямозонном полупроводнике, лишь часть инжектированных электронов рекомбинируют излучательно. Остальные теряются на безызлучательных рекомбинациях.

Уменьшить рекомбинационные и оптические потери СД можно, если выполнить прибор с гетеропереходами или даже на двойных гетероструктурах.

СД с двойным гетеропереходом, разработан специально для соедине­ния с волоконным световодом. Область рекомбинации расположена вблизи хладопровода, а в подложке из GaAs протравлена ямка, в которую вставляется световод. Конструируются светодиоды как с выводом излучения через поверхность, ограничивающую переход сверху (плоскостные СД), так и с выводом энергии в направлении, параллельном плоскости р - n -перехода (торцевые СД). При этом выходная мощность составляет несколько милливатт при плотностях тока около 103А/см . Так СД изготовленный на основе AlGaAs-структуры с полосковым контактом шириной 100 мкм при плотности тока накачки 2 103 , имеет мощность излучения 3 мВт на длине волны 0,8 мкм; СД с вытравленной ямкой и линзообразной поверхностью имеет мощность излучения 6 мВт при плотности тока 3400 А/см.

Светодиоды даже при высоких плотностях тока инжекции (свыше 10 А/см) оказываются очень надежными; их средняя долговечность достигает 105 ...106 ч.

Широкое применение получили суперлюминесцентные диоды. Как уже отмечалось, излучательная рекомбинация в обычных светодиодах приводит к спонтанному испусканию света. Это спонтанное излучение вызывает последующие излучательные переходы и усиливает само себя (поскольку концентрация электронов и дырок не является равновесной). Это усиление невелико, поскольку излучение проходит тонкую область рекомбинации в поперечном направлении. Для получения лазерного эффекта нужно это излучение направить вдоль активного слоя и обеспечить отражение от концевых плоскостей. Однако усиление спонтанного излучения в такой конфигурации наблюдается и ниже порога возбуждения и при неотражающих концевых плоскостях. Усиленное и направленное таким образом испускание называется суперлюминесценцией. На этом эффекте и основаны супсрлюминесцентиые диоды (СЛД). При этом активную среду формируют в виде оптического волновода, который замыкается на одном конце хорошо отражающим зеркалом, а на другом конце излучает свет без отражения в пространство либо в световод. Для сильной суперлюминесценции необходимо высокое усиление в активной среде, что в полупроводниках обеспечивается высокой плотностью мощности. Суперлюминесцентные диоды конструируются на основе двойной гетероструктуры с полосковой геометрией. Контактные полоски с одной стороны доходят до торцевой фронтальной поверхности, в то время как с другой стороны они не доходят до края полупроводника. Именно на этой стороне суперлюминесценция затухает, поскольку в эту область электроны не инжектируются. С фронтальной стороны генерируется суперлюминесценция, при этом раскрыв диаграммы излучения определяется шириной и длиной полоски.

При конструировании двойной гетероструктуры с полосковой геометрией для СЛД активная р-область GaAs делается толщиной 0,3 ... 0,5 мкм, контактная полоска - шириной 12... 15 мкм. При длине полоски до 1,5 мм и плотности тока 104 А/см мощность излучения в импульсном режиме достигает 50 мВт при ширине линии генерации 0,008 мкм.

1. *Шумовые характеристики волоконно-оптического контура*

В оптической гироскопии для намотки чувствительного контура используют три вида волокна: многомодовое, одномодовое и одномодовое с устойчивой поляризацией. Длина периметра контура определяется исходя из двух предпосылок. С одной стороны, увеличение длины контура повышает точность системы в целом, так как величина невзаимного фазового сдвига пропорциональна длине волокна, с другой стороны для более длинного контура в большей степени на работу системы оказывают влияние параметры затухания и нерегулярности волокна. Системы, где требуется высокая чувствительность к низким скоростям вращения подразумевают выбор оптимальной длины контура с учетом всех возможных факторов влияющих на точностные характеристики системы. Обычно используются волокна длиной от 200 до 1500 м.

Диаметр катушки выбирается по критерию минимизации потерь в волокне на изгибах и с учетом габаритных размеров устройства. Типовое значение от 6 до 40 см.

В зависимости от числа распространяющихся на рабочей частоте волн (мод) могут использоваться одно- и многомодовые световоды.

Для характеристик световода важное значение имеет профиль показателя преломления в поперечном сечении. Используя возможности неоднородных световодов в широких пределах изменять свои характеристики в зависимости от закона изменения диэлектрической проницаемости по поперечному сечению, можно для каждого конкретного применения подобрать световод с наилучшим соответствием его характеристик решению задачи.

Важной характеристикой световода является числовая апертура NA, представляющая собой синус максимального угла падения лучей на торец световода, при котором в световоде луч на границу «сердцевина-оболочка» падает под критическим углом. От значения NA зависят эффективность ввода излучения светодиода в световод, потери на микроизгибах, дисперсия импульсов, число распространяющихся мод.

В практике волоконно-оптической гироскопии важно иметь оценочные характеристики волокон различной структуры, не прибегая к сложным расчетам представлять общую модель ошибок, которые могут заметно снизить точностные характеристики системы. Получим приближенные соотношения для статистических характеристик потерь в волокнах с различными свойствами и структурой определяющей их. Так как многомодовые световоды имеют дисперсионные характеристики, сильно ограничивающие точность приборов остановимся на рассмотрении одномодовых волокон в составе общей теории распространения волн.

Рассмотрим механизм потерь мощности в одномодовом волоконном световоде. При распространении электромагнитной энергии вдоль не­регу­лярного световода часть световой мощности рассеивается. Часть рассеивающейся мощности перераспределяется между вперед и назад распространяющимися модами, а остальная часть излучается. Интерес представляет вывод выражений для определения численной оценки величины рассеивающейся мощности для волокон с известными характеристиками профиля показателя преломления и допусковыми значениями нерегуляр­ностей.

Неоднородности нерегулярных световодов удобно пред­ставлять как источники вынужденных токов, находящихся внутри регулярного световода. При этом может быть описано возбуж­дение как направленных мод, так и поля излучения.

Нерегулярности световодов приводят к зависимости пока­зателя преломления от продольной координаты, т.е. n=n(x,y,z). Полные электрическое и магнитное поля E (x,y,z) и H(x,y,z) в любой точке внутри нерегулярного световода связаны между собой уравнениями Максвелла для среды без источников. С другой стороны, эти поля можно представить в виде поля регулярного световода, в котором имеются источники тока :

(2.1)



Здесь - волновое число в свободном пространстве;



- профиль того же световода без неоднородностей.



Величину

(2.2)



называют вынужденной плотностью тока, обусловленной неоднородностью. Источник вынужденного тока (2.2) существует только внутри области неоднородности и целиком определен при условии известности полного электрического поля Е. Если световод является слабонаправляющим и n ≈ n, то поля мод являются приблизительно поперечными и в первом приближении можно считать, что E = Ex , а

(2.3)



Индекс x означает поперечную компоненту поля, а n1 - показатель преломления сердцевины волокна, иначе n(a)= n1 при а<r, где r - радиус сердцевины волокна.

Таким образом из (2.2) и (2.3) имеем:

(2.4)



В этом приближении не учтены все поляризационные эффекты, обусловленные неоднородностями, поскольку в рамках приближения слабонаправляющего световода поперечные поля всех мод ортогональны друг другу. В частности, поляризованная вдоль оси *x* чётная основная мода не может быть возбуждена нечётной или поляризованной вдоль оси *y* основной модой.

Подставив в (2.4) выражение для электрического поля в гауссовом приближении рассмотренном в [1], получим следующее выражение для плотности тока, если на неоднородность в круглом световоде падает основная мода, поляризованная вдоль оси *x* :

, (2.5)



где - фундаментальное решение скалярного волнового уравнения для поля основной моды, определяемой в зависимости от профиля показателя преломления .



Вследствие того что, волоконные световоды, используемые в волоконной гироскопии, являются слабонаправляющими, т.е. относительная разность между максимальным и минимальным значениями профиля показателя преломления n ( r ) мала, векторы Е и H аппроксимируются решениями скалярного волнового уравнения. Постоянная распространения β основной моды, направляемой по световоду, ограничивается интервалом между двумя экстремумами, которые определяются значениями β для плоских волн. В бесконечных средах с показателями преломления n1 и n2 :

, (2.6)



где n1 , n2 - максимальное и минимальное значения показателя преломления n ( r ); - длина волны в вакууме.



В силу слабой канализации волн в световодах, т.е. n1 ≈n2 из (2.6) следует β ≈ 2 π n / λ, что совпадает с постоянной распространения плоской волны в направлении Z в бесконечной среде с показателем преломления n2 ≤ n ≤ n1 .

Таким образом, основная мода волоконного световода является квазипоперечной электромагнитной (Т) волной. В простейшем случае - это волна, однородно поляризованная только в одном направлении в отличии от мод высших порядков. Если обозначить направление поляризации через Х, поле в световоде можно представить в виде



, (2.7)



где магнитная проницаемость среды;



= - диэлектрическая проницаемость среды;



- диэлектрическая проницаемость вакуума.



Здесь неявно подразумеваем временную зависимость . Компоненты поля Ey , Ez , Hx , Hz не учитываются поскольку они пренебрежимо малы, Ψ описывает пространственное изменение поля в плоскости, перпендикулярной оси световода. Следует отметить, что отражение плоской волны от границы раздела диэлектрических сред с близкими параметрами практически не чувствительно к поляризации падающей волны. Соответственно, и пространственное изменение поля Ψ должно быть нечувствительно к поляризационным эффектам, поэтому Ψ - решение скалярного волнового уравнения, т.е.



, (2.8)



где:



n ( r ) - профиль показателя преломления; λ - длина волны в вакууме.

Таким образом, основная мода описывается решением уравнения (2.8), соответствующим наибольшему β и , не зависящей от угла . Для регулярного световода n ( r ) не зависит от длины, в случае нерегулярного световода n=n(x,y,z).



В практически интересных случаях применяют в одномодовых световодах оптические волокна как со ступенчатым, так и градиентным профилем. При этом наибольшее распространение получили оптические волокна с гауссовым и ступенчатым профилями. Эти волокна целесообразно применять и в волоконной гироскопии поэтому остановимся на их анализе подробнее.

При изготовлении световодов в следствии диффузии границы между оболочкой и сердцевиной реальные профили могут отличаться как от ступенчатого, так и от гауссова, занимая некоторое промежуточное положение (сглаженный ступенчатый профиль). При этом профиль показателя преломления представляют в виде :

(2.9)



где  - параметр высоты профиля.



Численные решения волнового уравнения для ступенчатого и степенного профилей волокна [2] показывают, что форма Ψ (r) примерно гауссова. В соответствии с этими исследованиями поле моды HE11 можно представить в виде:

(2.10)



где r0 - размер светового пятна, определенный вариационным методом в [2].

Для решения волнового уравнения умножим его на



и воспользуемся тождеством:

(2.11)



После интегрирования в пределах от 0 до ∞ получаем

(2.12)



Кроме (2.12) появляется дополнительный член ,



который вычисляется при значениях r = 0 и ∞. Этот член равен нулю, поскольку конечно при r = 0 и экспоненциально стремиться к нулю при r → ∞.



Размер пятна r0 выбирается из условия обеспечения наибольшего β, которое соответствует основной моде. Подставляя приближенное выражение (2.10) в (2.12), можно определить r0 из условия dβ2/ dr0 = 0. Приближение для постоянной распространения β получается далее подстановкой найденного r0 в выражение (2.12). Таким образом, зная r0 и β можно полностью характеризовать поле с помощью формул (2.7) и (2.10). Используем полученную методику для определения параметров r0 и β для профилей применяемых в волокнах для оптической гироскопии.

В случае гауссова профиля показателя преломления:

, (2.13)



где .



Таким образом, n(r) с ростом r от 0 до ∞ уменьшается плавно от n1 до n2. Поскольку чёткой границы между сердцевиной и оболочкой нет, то форму профиля определяет радиус сердцевины a. Такая форма профиля показателя преломления представляет практический интерес, так как является хорошим приближением реального случая, когда в процессе изготовления волоконных световодов происходит взаимная диффузия материала сердцевины и оболочки.

Подставляя (2.13) в (2.10) и (2.12), из условия dβ2/dr0 = 0 находим величину

(2.14)



Выражение (2.14) имеет физический смысл только при V >>1 (r0 - положительно), однако это не уменьшает его практической ценности, так как при V ≤ 1 вблизи оси световода распространяется лишь малая доля мощности основной моды. Подставляя r0 в (2.12) получаем выражение для

, (2.15)



где

(2.16)



Размер пятна r0 и постоянная распространения β полностью характеризуют поле основной моды, а следовательно, и передаточные свойства одномодовых световодов.

Распределение плотности мощности или профиль интенсивности S(r) имеет вид :

, (2.17)



где ε,μ - относительная диэлектрическая и магнитная проницаемость вакуума.

С увеличением расстояния от оси световода интенсивность падает экспоненциально. При меньших значениях V спад происходит медленнее, поэтому чем меньше V, тем меньшая часть полной мощности распространяется вблизи оси волокна. Доля мощности, распространяющейся в интервале от 0 до r, равна

(2.18)



Таким образом в световодах с малым V распространяющееся излучение захватывает большую область поперечного сечения. Поскольку в практических ситуациях такое положение нежелательно, ограничение на V >1 (2.14) не важно. Практический интерес представляет определить ширину a профиля показателя преломления, при которой мощность пучка света будет наиболее сильно концентрироваться вблизи оси волокна при фиксированных значениях Δ и длины волны излучения, т.е. определить значение радиуса сердцевины, обеспечивающего минимальный размер пятна r0. Дифференцируя (2.14) по a и учитывая, что согласно (2.16) V пропорционально a, получим оптимальное значение a, соответствующее V=2, т.е.

) (2.19)



При V = 2 имеем r0 = a, т.е. распределение интенсивности S(r) совпадает с формой профиля показателя преломления.

В случае световода со ступенчатым профилем показателя преломления:

(2.20)



( S =1, f = 0 при r ≤ a и S =0, f =1 при r > a).

Следуя методике определения r0 и β для световодов с гауссовым профилем, получаем

(2.21)



(2.22)



Все физические процессы имеющие место в волокнах с гауссовым профилем преломления, справедливы и для волокна со ступенчатым профилем. Радиус сердцевины a, обеспечивающий максимальную концентрацию света в волокне, определим в данном случае из условия V = exp(1/2) ≈ 1.65 что соответствует

(2.23)



Таким образом, плотность мощности в ступенчатом волоконном световоде выше на 17%. Доля мощности, распространяющейся в пределах радиуса r, будет равна

(2.24)



Получим основные характеристики одномодовых световодов на основе выводов сделанных ранее. Рассмотрим амплитуду излучения и мощность распространяющихся мод.

Для j - й вперёд и назад распространяющихся мод полная мощность определяется соотношениями :

(2.25)



, (2.26)



где Nj , N-j - параметры нормировки.

Полная мощность, возбуждённая во всех направляемых модах, будет равна

(2.27)



Если световод является слабонаправляющим и круглым, а источники тока излучают вдоль оси x поперечного сечения световода, то мощность в каждой моде равна

(2.28)



где βl - скалярные постоянные распространения;

Ψl- решение скалярного волнового уравнения (2.11).

Для определения мощности излучения воспользуемся приближением свободного пространства, суть которого сводится к замене слабонаправляющего световода неограниченной однородной средой с показателем преломления оболочки n2 . В большинстве практических случаях излученная мощность достаточно точно описывается в рамках этого приближения.

Решение уравнений Максвелла для полного поля в световоде с произвольным показателем преломления, согласно методике, приведённой в [2], можно выразить через векторный потенциал А, декартовы составляющие которого удовлетворяют уравнению

, (2.29)



где - распределение плотности тока; ∇2 - скалярный оператор Лапласа. Решение уравнения (2.29) для каждой составляющей выражается через функцию Грина в виде



, (2.30)



где V - объём, в котором распределены источники тока;

- радиусы-векторы точки наблюдения поля и точки расположения источника соответственно (рис 2.1.а).



Функция Грина находится путём решения соответствующего уравнения для свободного пространства с показателем преломления n2 и имеет вид

, (2.31)



где , а χ - угол между векторами и .



Подстановка (2.31) в (2.30) приводит к выражению

, (2.32)



где



P

n2

r

χ

r/

z

Q

J(r/)

n(x,y)

O

a)

x

ϕ = ϕ/ = 0

P(S,θ,ϕ)

S

Q(S/,θ/,ϕ/)

ϕ,ϕ/

S/

θ

θ/

z

y

б)

Рис 2.1. Возмущение поля в точке P источником с плотностью тока J в точке Q (а) и сферические полярные координаты точек Р и Q (б).

Достаточно далеко в оболочке поля всех источников являются локально плоскими и имеют вид .

(2.33)



(2.34)



Отсюда запишем полную мощность излучения в виде

, (2.35)



где с - скорость света; S∞ - сферическая поверхность с радиусом ∞; Ω - пространственный угол; S = | r | - радиус среды;- единичный вектор, параллельный радиальному вектору.



Если векторы P и Q выразить в сферической системе координат (S,Q,ϕ) (рис 1.б), которая ориентирована так, что если угол ϕ равен нулю, радиус-вектор расположен в плоскости Z, то уравнение (2.35) с использованием (2.32) и (2.33) можно записать так

, (2.36)



где Mθ и Mϕ , θ и ϕ - составляющие вектора в точке Р



В случае поперечно-ориентированного источника (токи параллельны оси x) вектор будет иметь только составляющую Мх. Полную излученную мощность можно определить подстановкой в (2.36):



(2.37)



Здесь θ0 - угол, под которым происходит излучение источника к оси световода. Из рис 2.1.б следует, что

, (2.38)



где a = S/ sin (θ/) и z = S/ cos (θ/) на трубке.

Подставляя (2.38) и (2.37) в (2.33) получаем

(2.39)



Интеграл по ϕ/ является интегральным представлением функций Бесселя первого рода, нулевого порядка и тогда

, (2.40)



где J0(...) - функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Запишем величину плотности тока трубчатого источника (2.5) с учетом выражения полученного в [2]

(2.41)



где ΔS(r,z) - отклонение функции профиля показателя преломления вследствие нерегулярностей.

(2.42)



Подставив (2.41) в (2.40) получим

, (2.43)



где B =



Поскольку Мx является случайной величиной, в (2.36) необходимо подставить средний квадрат <| Мx |2>. Воспользовавшись результатами полученными в [3] запишем

, (2.44)



где DΔS - дисперсия функции профиля показателя преломления; ρΔS (τ) - нормированная корреляционная функция распределения неоднородностей по длине световода ΔS (r,z).

При радиусе корреляции l0<<l

, (2.45)



где GΔS (0) - спектральная плотность распределения неоднородностей по длине световода, определяемая соотношением :

(2.46)



Поскольку аргумент спектральной плотности должен быть равен нулю, находим величину угла, под которым в среднем происходит излучение

(2.47)



Полная средняя излученная мощность будет равна

(2.48)



Таким образом, мы получили выражение для нахождения характеристик излученной мощности по известным статистическим характеристикам функций профиля показателя преломления, определяющих трубчатый источник тока DΔS и GΔS (0) или ρΔS (τ).

Мощность основной моды P(z) на длине световода при наличии нерегулярностей затухает вследствие потерь на излучение. Если нерегулярный участок разделить на элементарные участки длиной dz, малые по сравнению с длиной z, то можно записать выражение для потери мощности моды на участке длиной dz:

, (2.49)



в котором использовались соотношения (2.25),(2.26)

, (2.50)



где a1 - амплитуда моды; N - параметр нормировки.

Интегрируя (50) по длине l, получаем:

[Нп/км], (2.51)



где α - коэффициент затухания мощности.

Подстановка выражения для N с произвольным профилем,

,



где R0 = r0 / a и использование выражения (2.51) дают

(2.52)



Полученное выражение даёт возможность, подставляя R0 для различных профилей показателя преломления, определять коэффициенты затухания вследствие потерь мощности на излучение для любого профиля показателя преломления.

В практике волоконно-оптических гироскопов интерес представляют волокна с различными профилями показателя преломления. Определим необходимые для разработчиков устройства параметры волокон используемых в этой области.

Рассмотрим световод со ступенчатым профилем показателя преломления, в котором граница между сердцевиной и оболочкой по длине деформирована случайным образом, т.е.

r(z) = a + F(z) , (2.53)

где а - радиус сердцевины регулярного световода;

F(z) - функция искажения границы, которая может отражать изгибы оси, изменение радиуса сердцевины или эллиптичность поперечного сечения.

При этом в случаях

искривления оси:

F(z) = f(z) / a (2.54)

отклонения радиуса:

F(z) = - ξ(z) / a, (2.55)

эллиптичности:

F(z) = - η(z) cos 2ϕ / a. (2.56)

На рис 2.2. показано изменение радиуса сердцевины. Отклонение показателей преломления регулярного и нерегулярного световодов Δn = n - изменяется как ± (n1 - n2) в области нерегулярностей и равно нулю во всех остальных областях. Поскольку отклонения F(z) малы, можно предположить , что вынужденные токи сосредоточены в области границы сердцевины с оболочкой, поэтому имеем:



Δn = (n1 - n2) δ (r-α) F(z), (2.57)

a

ΔS = F(z). (2.58)

n2

n1

z

**Jx**

l

O

Рис 2.2. Нерегулярный ступенчатый световод со случайными колебаниями радиуса сердцевины и эквивалентное распределение токов.

Таким образом, нерегулярный световод заменяем регулярным, возбуждаемым трубчатым источником тока, радиус которого равен радиусу сердцевины световода, ток направлен параллельно оси x, а амплитуда его определяется выражением (2.57).

Корреляционная функция ΔS будет равна

,



где ρF (τ) - нормированная корреляционная функция распределения неоднородностей по длине.

Дисперсия ΔS равна

DΔS = KΔS(0) = DF,

а соответствующая ρF (τ) спектральная плотность имеет вид:



В случае гауссова профиля отклонение функции профиля показателя преломления определяется выражениями полученными в [2]:

изменения радиуса сердцевины

ΔS(r,z) = (2 r2 / a3) ξ(z) exp [-(r/a)2]

случайные изгибы оси

ΔS(r,z) = (2 r/ a2) ξ(z) exp [-(r/a)2]

эллиптичность сердцевины

S(r,z) = exp [-(r/(a+η(z)cos 2ϕ)]

Определим статистические характеристики ΔS

для изменения радиуса сердцевины

DΔS = ( 4r4/ a6 )Dξ exp [-2(r/a)2] (2.59)

ρΔS (τ) = ρξ (τ)

для случайных изгибов оси:

DΔS = ( 4r2/a4Dfexp [-2(r/a)2]

ρΔS (τ) = ρf(τ)

для эллиптичности

DΔS = ( 2r4/a6Dηexp [-2(r/a)2]

ρΔS (τ) = ρη(τ)

Для световодов со степенным профилем показателя преломления отклонение функции профиля преломления описывается выражением :

ΔS(r,z) = - [q (r/a)q ξ(z)]/a

для флуктуаций радиуса,

ΔS(r,z) = q (r/a)q f(z)]/r

для случайных изгибов и эллиптичности,

Исходя из этих выражений запишем:

для флуктуаций радиуса:

DΔS = (q2/a2)(r/a)2q Dξ

ρΔS (τ) = ρξ(τ)

для случайных изгибов оси

DΔS = (q2/a2)(r/a)2q Df

ρΔS (τ) = ρf(τ)

для эллиптичности

DΔS = (q2/2a2)(r/a)2q Dη

ρΔS (τ) = ρη(τ)

На основании полученных выражений можно проводить оценку статистических характеристик волокон с различными профилями пока­зателя преломления. Численная оценка параметров волокна обеспе­чивающего одномодовый режим работы показывает, что с уменьше­нием радиуса корреляции нерегулярностей (точности изготовления и эксплуатационных параметров) коэффициент затухания падает, причём у световодов со ступенчатым профилем показателя преломления его относительная величина пре­вышает коэффициент затухания световода с гауссовым профилем примерно в 1.6 раза. (рис 2.3.)

В волоконно-оптической гироскопии целесообразно использование импульсной модуляции для повышения точности детектирования и дальнейшей обработки сигналов. В связи с этим представляет интерес оценка искажения импульсов при наличии различного рода неоднородностей в волоконном контуре, которые приводят к появлению невзаимностей для лучей бегущих во встречных направлениях.

1l,мкм

ρΔS (

1102

ρΔS (

110

ρΔS (

11

ρΔS (

1106

ρΔS (

1105

ρΔS (

1104

ρΔS (

1103

ρΔS (

1102

ρΔS (

11

ρΔS (

12

ρΔS (

α/DΔS , дБ/км мкм2

Рис 2.3. Зависимость коэффициента затухания от радиуса корреляции нерегулярностей функции профиля показателя сердцевины : 1 - для ступенчатого профиля; 2 - для гауссова профиля.

(n1=1.5; Δ=0.01;λ=1.3 мкм; V=2.4;a=2.3 мкм)

Импульсы конечной длительности, возбуждаемые реальными источниками, обладают протяженным спектром и по мере распространения по световоду уширяются, что связано как с частотной зависимостью показателя преломления, так и с волноводной (внутримодовой) дисперсией, обусловленной нелинейной зависимостью β от частоты. Оба эффекта в зависимости от природы материальной дисперсии могут комбинироваться различным образом и при определённых длинах волн обычно компенсируются .

Рассмотрим влияние волноводной дисперсии на уширение импульсов. Среднюю скорость распространения импульсного сигнала по волокну определяет групповая скорость

(2.60)



которая может быть получена для различных профилей показателя преломления дифференцированием выражений для β .

Для

гауссова профиля :

1/Vгр = (ωμaεa1 /β)(1-2Δ/V)

ступенчатого профиля :

1/Vгр = (ωμaεa1 /β)(1-2Δ/V2) (2.61)

сглаженного ступенчатого профиля :

1/Vгр = (ωμaεa1 /β)(1-2Δ/V2(m+1)/(m+2))

Степень отклонения групповой скорости от полученных значений определит отклонение коэффициента распространения вследствие нерегулярностей. Отклонение коэффициента распространения вследствие нерегулярностей в случае гауссова профиля определяется в зависимости от вида нерегулярностей. Воспользуемся полученными выражениями [2].

Для

изменения радиуса сердцевины



случайных изгибов

(2.62)



случайной эллиптичности

,



где l0f , l0ε , l0η - радиусы корреляции соответствующих нерегулярностей.

Для ступенчатого профиля показателя преломления :

(2.63)



где DF и l0 - дисперсия и радиус корреляции соответствующих неоднородностей.

Численный анализ соотношений позволяет сделать выводы о том, что при прочих равных условиях наибольшее влияние на дисперсионные характеристики световодов с гауссовым профилем показателем преломления оказывают случайные изгибы оси световода, которые превышают действие нерегулярностей отражающей границы как минимум на порядок. Меньшее влияние оказывает эллиптичность сердцевины световода. Дисперсия отклонений уширения импульсов для волокон со ступенчатым профилем показателя, вне зависимости от вида нерегулярностей, одного порядка со случайными изгибами оси световода с гауссовым профилем показателя преломления.

Таким образом полученные соотношения описывают математическую модель нерегулярных одномодовых волоконных световодов с произвольной формой поперечного сечения и произвольным профилем показателя преломления. При этом не требуется привлечение сложного математического аппарата, численных или графических методов. Это дает возможность наиболее просто анализировать особенности технологии изготовления различных волоконных световодов и принимать решения по улучшению их качественных характеристик при использовании в волоконной гироскопии.

Оценим потери мощности и уширение импульсного сигнала в одномодовом ступенчатом оптическом волокне dс = (5±0.01) мкм со случайными колебаниями радиуса сердцевины (радиус корреляции примем типичным для современных волокон изготавливаемых зарубежом l0ξ = 0.01 мкм ). Показатель преломления сердцевины n1= 1.5; показатель преломления оболочки - n2 = 1.495 мкм.

Величину коэффициента затухания мощности определим по выражению (2.52) . Радиус светового пятна r0 находим по формуле (2.21), принимая V=2.4. Дисперсию функции колебания радиуса Dξ определим из условия нормального закона распределения ξ(z): Dξ = (0.005/3)2 = 2.78 10-6 мкм2 . Соответственно DΔS находим по (2.59) . Угол, под которым происходит излучение, принимаем равным нулю, вследствие чего функция Бесселя равна 1 , а потери мощности по (2.52) будут равны ≈0.6 дБ/км.

Уширение импульса вследствие волноводной дисперсии находим по (2.63) . Подстановка численных значений даёт

DΔτ(l) = 3.02 10-8 x l пс2 , а максимальное уширение импульса на длине l ( l в км ) будет равно Δτmax = ±5.2 10-4 пс.



Полученные значения позволяют оценить невзаимность условий распространения волн бегущих во встречных направлениях и сделать вывод о необходимости точного соблюдения технологии изготовления волокон и обеспечения требуемых технологических параметров при сборке волоконного контура и его дальнейшей эксплуатации.

Как уже отмечалось, в круглом одномодовом световоде основная мода может существовать в двух ортогональных поляризациях и . В идеальном аксиально-симметричном и свободном от механических напряжений волоконном световоде эти моды вырождены. В реальных световодах наблюдается различие в постоянных распространения указанных мод, вызванное отклонением геометрии от идеальной и различием в значениях остаточных напряжениях в направлениях x и y. Остаточные напряжения являются результатом процесса вытяжки световода. Наличие связи между двумя ортогонально поляризованными модами приводит к вращению плоскости поляризации вдоль оси световода. Определенное состояние поляризации может сохраняться в круглом волоконном световоде на длине не более чем несколько метров.



В волоконно-оптических гироскопах для решения этой проблемы на входе и выходе волоконного контура помещают специальное устройство - поляризатор, позволяющее отфильтровать моды с нежелательной поляризацией. Параметры этого устройства не идеальны, к тому же при распространении энергии по волокну происходит взаимодействие мод с различными поляризациями что приводит к изменению уровней сигналов а следовательно и фазовых задержек. Необходимо обеспечить распространение по волокну сигнала только с одной поляризацией и тем самым снизить требования к поляризатору и устранить взаимное влияние мод друг на друга .

Разработаны однополяризационные световоды с линейной и круглой поляризациями. Световоды с линейной поляризацией представляют собой аксиально-несимметричные структуры, в которых может распространяться или мода только одной поляризации, или две моды различной поляризации, но с большой разностью между значениями постоянных распространения этих мод. Первые являются абсолютно поляризационными световодами, вторые - световодами с линейным двулучепреломлением.

Устойчивость поляризации в световоде можно реализовать, если использовать двухслойные прямоугольные эллиптические световоды или круглые световоды с осесимметричным распределением показателя преломления. В этих световодах снимается вырождение ортогонально поляризованных мод, и две ортогональные компоненты фундаментальной моды будут иметь разные фазовые постоянные распространения. Это уменьшит связь по мощности между двумя поляризациями и, следовательно, уменьшит преобразование мод на нерегулярностях.

Вырождение можно снять комбинацией геометрической анизотропии и (или) анизотропии силовых напряжений в поперечной xy-плоскости световода. Можно вводить либо геометрическую эллиптичность сердечника волокна, либо индуцированное двулучепреломление материала световода.

В последнем случае для изготовления световода можно использовать разнородные материалы с различными температурными коэффициентами расширения. Это позволит вводить анизотропию напряжений в волокно посредством эффекта фотоупругости, что приводит к соответствующему двулучепреломлению. При изготовлении такого волокна оболочка (SiO2) легируется В2O3 , можно использовать также GeO2 . P2O5 . Сердечник изготавливается из безпримесного кремния. Вследствие разных коэффициентов термического расширения и поверхностных натяжений получаемое волокно имеет цилиндрический сердечник, эллиптическую внутреннюю оболочку и круговое внешнее покрытие. При такой структуре наблюдается сильная анизотропия напряжений. Мерой этой анизотропии является так называемое модальное двулучепреломление:

(2.64)



Чем больше модальное двулучепреломление В, тем меньше связь между поляризационными модами.

Для количественного измерения В часто вводят новое понятие - так называемую «длину биений» Lб, связанную с модальным двулучепреломлением соотношением:

(2.65)



или



Длину биений Lб можно непосредственно измерить несколькими способами (например, модуляционным способом). Требуемое большое значение модального двулучепреломления В, существенно уменьшающее поляризационную связь, будет определять весьма малое значение длины биений Lб (длина биений должна быть много меньше критического периода возмущений,действующих на волокно).

Таким образом, наилучшим способом обеспечения работы световода на одной собственной поляризационной моде является увеличение двулучепреломления между двумя собственными поляризационными модами. В соответствии с этим возможны три структуры волокна.

В первой структуре предлагается использовать геометрически асимметричный профиль показателя преломления (рис 2.4.). Двулучепреломление, обусловленное асимметричным профилем показателя преломления, не всегда достаточно для ряда применений: кроме того в этой структуре трудно уменьшить потери, так как на границе сердечник-оболочка имеет место резкий перепад показателя преломления.

n1

n2

n1

n0

n0

n1

n2

б)

а)

n3

г)

в)

n1

n2

n0

n0

Рис 2.4. Структуры одномодовых световодов с устойчивой поляризацией: а - волокно с эллиптическим сердечником; б - волокно с боковым ячеечным распределением показателя преломления; в - волокно с эллиптической внешней оболочкой; г - волокно с боковым ячеечным напряжением.

Во второй структуре предлагается использовать двулучепреломление, индуцированное внеосевым внутренним напряжением. Эта структура имеет большие преимущества, чем структуры с простой анизотропией профиля, как с точки зрения увеличения двулучепреломления, так и вследствие уменьшения потерь. Длина биений менее 1 мм может быть получена в волокне с эллиптической оболочкой, легированной . В волокне, структура которого показана на рис 2.4.г, составляют порядка 0.3-0.5 дБ/км. В таких световодах распределенные перекрестные искажения между двумя линейно-поляризованными модами определяются, главным образом, случайными изгибами и скрутками.



Дисперсия поляризованной моды в этих световодах составляет (0.1...2) нс/км, что все же велико по сравнению с обычным одномодовым волокном. Но в волоконно-оптическом гироскопе принципиальное значение имеют не потери в волокне, а невзаимность условий прохождения лучей в противоположных направлениях, что по существу и определяется именно искажениями поляризованных мод. Именно поэтому применение в ВОГ волокон с устойчивой поляризацией могут заметно снизить погрешности гироскопа и повысить его чувствительность.

При изготовлении одномодовых световодов с устойчивой поляризацией применяют также комбинированные структуры, сочетающие принцип создания двулучепреломления как с по мощью геометрической асимметрии анизотропии, так и с помощью напряжений.

Третья структура одномодового световода с устойчивой поляризацией использует крученое одномодовое волокно. Эта структура волокна отличается от рассмотренных выше тем, что две собственные поляризационные моды являются циркулярно поляризованными, а не линейно-поляризованными. Длина биений крученого волокна 5..10 см при частоте скрутки в несколько оборотов (5..15) на метр.

Это значение длины биений очень велико по сравнению с достигнутым для волокна с внеосевым напряжением. Поляризационное состояние в крученном волокне сохраняется на длинах волокна 1...1,2 км при любой входной поляризации (это достаточно для использования в ВОГ). Объясняется это тем, что модовая дисперсия в крученном волокне уменьшается с увеличением частоты скрутки, и поэтому нежелательные поляризационные компоненты могут быть исключены фазовой компенсацией. Модовые перекрестные искажения в крученом волокне между двумя циркулярно поляризованными модами определяются главным образом изгибами. Крученое волокно более чувствительно к внешним возмущениям, что объясняется относительно большой длиной биений.

Таким образом можно сделать важный вывод о том, что использование волокон с сохранением поляризации в ВОГ имеет две стороны. С одной стороны, оно позволяет существенно повысить чувствительность устройства засчет снижения поляризационных искажений и невзаимностей, но с другой увеличивает требования налагаемые на режим эксплуатации прибора и делает необходимым более точное изготовление всех его элементов и сохранение постоянными параметров окружающей среды (температурные градиенты, магнитные и электрические поля).

*2.3. Шумовые характеристики фотодетекторов.*

Фотодетектор волоконного оптического гироскопа преобразует оптическую интерференционную картину на входе в выходной электрический сигнал. Поскольку интенсивность интерференционного оптического сигнала зависят от соотношения фаз двух интерферирующих лучей, амплитуда электрического сигнала, линейно связанная с интенсивностью оптического сигнала, отображает упомянутые фазовые соотношения. В свою очередь, в соответствии с эффектом Саньяка разность фаз двух лучей пропорциональна угловой скорости вращения ВОГ. Именно эта специфика применения фотодетектора в ВОГ налагает определенные требования на параметры и характеристики фотодетектора. Прежде всего фотодетектор должен обладать очень высокой чувствительностью или высоким разрешением с тем, чтобы «чувствовать» такие градации изменения интенсивности, которые соответствуют разности фаз оптических колебаний порядка 10 -7 рад, что эквивалентно угловой скорости вращения ВОГ примерно град/ч (требуемая точность для систем инерциальной навигации). Для реализации такой чувствительности нужно минимизировать собственные шумы фотодетектора (темновой ток и тепловые шумы нагрузочного сопротивления). Фотодетектор должен обеспечивать требуемый динамический диапазон и быстродействие. Зависимость характеристик фотодетектора от изменений окружающих условий (температуры, вибраций и т, д.) должна быть минимальной. Спектральная характеристика должна быть согласована с длиной волны излучателя. Кроме того, фотодетектор должен иметь малые габариты и массу, отвечать условиям совместимости со световодами и электронными устройствами, потреблять малую энергию. При массовом производстве ВОГ фотодетектор должен быть дешевым и по возможности изготовлен в твердотельном исполнении.

В настоящее время этим требованиям с наибольшей полнотой удовлетворяют твердотелые полупроводниковые фотодиоды (ФД), р-i-n фотодиоды и лавинные фотодиоды (ЛФД). При выборе фотодетекторов для ВОГ сравнение их производится по ряду характеристик, основные из которых приводятся ниже.

1. Квантовая эффективность (квантовый выход) - отношение среднего числа эмиттированных фотоэлектронов (или других носителей заряда)
2. Интегральная (общая) чувствительность - отношение среднего тока фотодетектора к среднему значению мощности оптического излучения, падающего на детектор (измеряется в А/Вт).
3. Пороговая чувствительность (эквивалентная мощность шумов) - среднеквадратическое значение потока излучения, промодулированного по синусоидальному закону, который создает на выходе фотодетектора напряжение, равное среднеквадратическому значению напряжения шумов (измеряется в Вт/Гц1/2).
4. Спектральная характеристика — это зависимость квантовой эффективности или чувствительности фотодетектора от длины волны падающего на него монохроматического излучения. При выборе фотодетектора необходимо, чтобы максимум спектральной характеристики совпадал с длиной волны принимаемого излучения.
5. Частотной характеристикой называется зависимость чувствительности фотодетектора от частоты синусоидальной модуляции интенсивности оптического излучения.
6. Постоянной времени фотодетектора называется время от начала воздействия входного светового потока до момента, когда выходной сигнал фотодетектора достигает 0,63 максимального значения.
7. Темновой ток - это ток фотодетектора при отсутствии внешнего облучения.

При выборе фотодетектора для ВОГ необходимо в требуемом спектральном диапазоне обеспечивать максимальную интегральную чувствительность, минимальную эквивалентную мощность шумов и минимальный темновой ток.

Частотная характеристика и быстродействие фотодетектора играют менее значительную роль, поскольку максимальная частота изменения угловой скорости, измеряемой ВОГ, всегда укладывается в полосу пропускания ФД, не зависимо от применения вспомогательной модуляции.

Полупроводниковые фотодиоды характеризуются хорошей спектральной и интегральной чувствительностью. Они обладают высокой квантовой эффективностью и малой инерционностью; их параметры стабильны во времени.

Принцип работы полупроводникового диода основан на фотовольтаическом эффекте, который состоит в том, что при облучении неоднородного полупроводника светом возникает фототок (или фото-ЭДС). Высокочувствительные фотодиоды и лавинные фотодиоды с внутренним усилением тока конструируются на основе р-n-переходов, р-i-n-структур или переходов металл-полупроводник.

Во всех структурах фотовозбужденные электроны н дырки, образующиеся внутри области перехода и в объеме полупроводника, диффундируют к переходу, образуя фототок. Для образования свободной электронно-дырочной пары с обеих сторон от p-n-перехода необходимо, чтобы энергия поглощенного фотона была больше ширины запрещенной зоны. Образование и диффузия пар электрон-дырка сопровождается появлением потенциала в сечении перехода. Под действием электрического поля перехода электрон движется в направлении n-области, а дырка - в направлении p-области.

Таким образом происходит расщепление пар. Избыток электронов в n-области и дырок в p-области приводит к тому, что n-область заряжается отрицательно, а p-область - положительно. На разомкнутых концах детектора появляется ЭДС; подсоединение к концам сопротивления приведет к появлению продетектированного тока.

Фотодиоды могут включаться как без источников тока, так и последовательно с источником постоянного тока напряжением от нескольких вольт до 100 В. Во втором случае чувствительность детектора значительно повышается. При анализе шумовых свойств фотодиодов (т.е. при необходимости найти отношение сигнал/шум или опреде­лить чувствительность ВОГ, ограниченную только фото­приемником) обычно требуется учитывать три вида шумовых токов:

1) шумовой ток, возникающий при детек­тировании светового потока (дробовой шум); 2) шумовой ток, обусловленный случайным тепловым движением элек­тронов в нагрузочном сопротивлении и в последующих электронных цепях; 3) шумовой ток самого фотодиода, основная составляющая которого обусловлена темновым током.

Если уменьшить тепловой шум нагрузочного сопротив­ления изменением эффективной температуры сопротивле­ния, а принципиально неустранимый дробовой шум счи­тать малым, то пороговую чувствительность фотодиода будет определять темновой ток. С этой точки зрения для реализации максимальной пороговой чувствительности не­обходимо выбирать фотодиод с минимальными темновыми токами. Величина темнового тока зависит от свойств ма­териала фотодиода, температуры, площади *р-n* - перехода, конструктивных особенностей и т. д.

В фотодиодах с *р - i - n* - переходом до­вольно широкая область собственной проводимости ( *i* - об­ласть) расположена между двумя областями полупровод­ника противоположного знака проводимости; в *i*-области распределено сильное однородное электрическое поле, что способствует увеличению чувствительности фотодиода.

Чувствительность германиевых и кремниевых *р - i - n -* фотодиодов составляет 0.5... 0.6 А/Вт, темновой ток при глубоком охлаждении (77 К) может быть доведен до 10-11 А.

В последнее время разработаны *р-i-n* - фотодиоды на основе InGaAs/InP, которые совместно с усилителем на полевом транзисторе (FЕТ) образуют интегральную схему; такой *р-i-n-* FEТ- приемник работает в диапазоне длин волн 1,3...1,5 мкм, имеет высокую квантовую эф­фективность 0.65 ... 0.7, малую емкость - 0.15 *рF,* что определяет высокое быстродействие. Фотодиод смонтиро­ван в кварцевом блоке, в котором имеется небольшое от­верстие для ввода волоконного светодиода с диаметром сердечника 50 мкм, при этом оптический сигнал с волокна полностью перехватывается фотодиодом. Кварцевый блок монтируется на толстопленочной гибридной схеме предва­рительного усилителя. Подвод световода к схеме герметизирован. Предварительный усилитель содержит транзистор (GaAs МЕSFЕТ), сопротивление смещения 10МОм, два кремниевых биполярных транзистора с граничной частотой около 7 ГГц и толстопленочные сопротивления, изготовленные на гибридной схеме. Чувствительность такого модульного *р - i - n -F*ЕТ-приемника составляет -53 дБм; интересно отметить, что при изменении окружающей температуры от 20 до 60" С чувствительность изменяется только на 1 дБ.

Лавинный фотодиод (ЛФД) является твердотельным аналогом фотоэлектронного умножителя. В нем используется механизм ударной ионизации в области сильного поля обратносмещенного перехода. Умножение тока происходит вследствие столкновения возникающих в результате фотоионизации электронно-дырочных пар с атомами кристаллической решетки полупроводника. Этот эффект под влиянием сильного поля смещения в условиях лавины порождает большое количество электронно-дырочных пар. В результате ток существенно увеличивается даже на сверхвысоких частотах. При лавинном усилении тока для средних уровней светового потока и высокого коэффициента лавинного умножения чувствительность приемного устройства определяется отношением сигнала к квантовому шуму. Для низких уровней светового потока и малого коэффициента лавинного умножения отношение сигнал-шум и порог чувствительности ограничиваются тепловым шумом.

Лавинные фотодиоды характеризуются большим темновым током, чем фотодиоды, а следовательно, и более низкой чувствительностью, даже если реализовано достаточно высокое усиление тока, позволяющее при низких уровнях сигнала превзойти тепловой шум. Кроме того процесс умножения вносит избыточный шум. Однако лавинный фотодиод имеет более высокую квантовую эффективность. Использование кремниевых или германиевых лавинных фотодиодов позволяет существенно повысить общую чувствительность широкополосных приемных устройств. При выборе лавинного фотодиода для приемной системы необходимо, помимо квантового выхода и широкополосности, учитывать специфические факторы, присущие только лавинному фотодиоду, такие, как усиление по току и связанные с ним ограничения, а также избыточные шумы. Технология изготовления лавинных фотодиодов сложна. Это обусловлено необходимостью обеспечения пространственной равномерности умножения носителей по всей светочувствительной площадке диода и минимизации утечки по краям перехода. Для уменьшения утечки используют защитные кольца. Обычно разброс в усилении из-за пространственной неравномерности умножения носителей составляет от 20 до 50% при среднем усилении 1000.

В лавинном фотодиоде усиление максимально в режиме, когда смещение на диоде приближается к пробивному напряжению. При напряжениях, больших пробивного, протекает самоподдерживающийся лавинный ток, который все менее и менее зависит от концентрации носителей, появляющихся под действием светового потока. В рабочем режиме максимальное усиление лавинных фотодиодов ограничивается либо эффектами насыщения, вызванными протекающим током, либо произведением коэффициента усиления на полосу пропускания. Эффект насыщения умножения носителей обусловлен тем, что носители, выходящие из области, в которой происходит умножение, уменьшают электрическое поле внутри перехода и создают падение напряжения на последовательном резисторе и на нагрузке диода. Ограничение же полосы пропускания объясняется перемещением вторичных электронов и дырок (образованных посредством ионизации) по области умножения в противоположных направлениях еще некоторое время после того, как первичные носители покинули переход. Избыточный шум в лавинных фотодиодах обусловлен флуктуациями процесса умножения носителей.

Простейшими лавинными фотодиодами являются кремниевые диоды с защитным кольцом и с диаметром светочувствительной площадки от 40 до 200мкм; рабочий диапазон волн - примерно от 0,4 до 0,8 мкм. Германиевые лавинные *п+-* р-диоды имеют рабочий диапазон волн от 0,5 до 1,5 мкм. Произведение коэффициента усиления по току на полосу пропускания для кремниевых и германиевых лавинных фотодиодов равно соответственно 100 и 60 ГГц. Следовательно, при усилении по току 100 и 60 использование в приемной системе кремниевого или германиевого лавинного фотодиода обеспечивает полосу про пускания в 1 ГГц.

В настоящее время ведутся интенсивные разработки лавинных фотодиодов на основе GaAs, InAs и InSb, обладающих высоким усилением и ничтожным избыточным шумом.

На основе соединения GaAlAsSb созданы ЛФД на диапазон длин волн 1... 1,4 мкм, превосходящие по параметрам германиевые ЛФД. Для длин волн 1... 1,7 мкм применяют соединения типа InGaAsP; значительного улучшения характеристик ЛФД ожидают при использовании гетероструктур на основе InGaAsP/InP. Кроме того, продолжаются работы по созданию интегральных схем, являющихся комбинацией ЛФД и входного усилителя на полевом транзисторе (так называемые FЕT-ЛФД), что позволяет улучшить качество фотоприемника.

*Входной оптический сигнал*



*Фоновая засветка*

*(помеха)*

*Дробовый шум*

*темнового тока*

*Квантовый шум внутреннего фотоэффекта*

*Избыточный шум внутреннего усиления*

*Тепловой и дробовый*

*шумы усилителя*

*Модуляционный и пороговый шумы преобразователя*

*Фотоэлектрическое поглощение-генерация электронно-дырочных пар*

*Внутреннее усиление*



*Выходной фототок*

*фотоприёмника*

*Формирование выходного сигнала фотоэлектронного преобразователя*

*Выходной электрический сигнал*



n p

<G>

n,p n,p p,n p,n



Рис 2.4. Основные этапы фотоэлектрического преобразования при детектировании оптического сигнала.

Независимо от вида полупроводникового приемника основные этапы фотоэлектрического преобразования можно проиллюстрировать схемой на рис.2.4. Она включает в качестве первичного акта поглощение излучения и генерацию свободных носителей заряда, механизм внутреннего усиления, обусловленный размножением носителей, если такой предусмотрен, а также этап формирования выходного сигнала, что определяет условия согласования фотоприемника с нагрузкой, включая выходные цепи усилительных звеньев в случаях внешнего усиления сигнала. Каждому этапу соответствуют свои параметры процесса, уровень шумов, ограничивающих для фотоприемников различного типа и различных комбинаций приемников с усилителями добротность, пороговую чувствительность, надёжность. Необходимость в ряде случаев усиления сигнала после его детектирования предполагает модуляцию светового потока поступающего на вход приемника, или его фототока.

Чувствительность фотоприемника и ее спектральное распределение определяется отношением

,



(2.66)

где λ в мкм. В этом выражении



- фототок, сигнал на выходе фотоприемника, соответствующий

входной оптической мощности

;



n, N0 - скорости генерации фотоносителей в фотоприемнике и фотонов на его поверхности соответственно;



-заряд электрона, постоянная Планка, скорость света соответственно;



- квантовая эффективность - количественная характеристика внутреннего фотоэффекта. Зависимости , как правило, экстремальны с максимумом при , что обусловлено спектральной зависимостью коэффициента поглощения излучения в данном материале.



Для правильно сконструированных фотоприемников с антиотражающими покрытиями оптимальные значения , что позволяет при расчетах в первом приближении принимать .



Чувствительность фотоприемника определяется также средним

значением коэффициента внутреннего усиления фототока величина которого флуктуирует относительно <G>. Если внутреннее усиление является следствием лавинного размножения носителей (как в лавинных фотодиодах), то <G> определяется как средняя статистическая величина за время действия светового импульса.

Если усиление обусловлено пролётным временем носителей (как в фоторезисторах), то <G> определяется средним (объемным и поверхностным) временем жизни фотоносителей

, (2.67)



ограничивающим быстродействие фотоприёмника.

Для фотодиодов без внутреннего усиления ( p - n, p - i - n, с барьером Шотки)

(2.68)



У лавинных фотодиодов с <G> ≈ 50-100



У быстродействующих фотоприёмников с фотопроводящим каналом на основе гетероэпитоксиальных плёнок AlGaAs/GaAs, AlInAs/GaInAs, GaInAs/InP



Минимальная детектируемая мощность (порог чувствительности) ограничивается отношением сигнал-шум (с/ш) фотопреобразователя. Его шумовые свойства удобно характеризовать эквивалентной мощностью шума (Вт/Гц1/2)



, (2.69)



где - входная оптическая мощность, при которой отношение с/ш равно 1.



При правильно спроектированном фотопреобразователя электронная часть не вносит дополнительных шумов, превышающих дробовый шум приёмника и

, (2.70)



где - шумовой ток являющийся эмпирическим параметром фотоприёмника. Для фотоприёмников без внутреннего усиления ограничивается в основном токами поверхностной утечки ().



При <G> = 100-50 ток и определяется типом, материалом и конструкцией фотоприёмника. Для кремниевых p - i - n фотодиодов , для лавинных



, NEP являются функцией полосы пропускания системы.



Для широкополосного усиления малых фототоков (А) при низких порогах чувствительности применяются преимущественно два типа электронных усилителей: трансимпедансный и интегрирующий.



*2.4. Анализ прямых динамических эффектов (температурных градиентов*

*и механических напряжений)*

Случайные временные изменения окружающей температуры и механических напряжений волокна приводят к изменениям оптических постоянных распространения и геометрических параметров волокна. Это приводит к тому, что в контуре ВОГ появляется фазовая невзаимность, следствием которой являются «фазоразностные шумы» на фотодетекторе (свойство взаимности приложимо лишь к линейным системам, инвариантным во времени).



Для моделирования «фазоразностных» шумов будем считать, что локальный одиночный источник фазовых шумов размещен в произвольной точке волоконного контура (рис 2.5.)

t1

НО

t2

ϕш(t)

*.*

Рис 2.5. Волоконный контур с локальным источником фазовых шумов.

Этот источник вносит случайные фазовые приращения в каждый из противоположно бегущих лучей. Если спектральную плотность этих фазовых флуктуаций обозначить , то спектральную плотность «фазоразностных шумов можно записать в виде:



, (2.71)



где - разность времён распространения лучей в двух противоположных направлениях между источником фазовых шумов и направленным ответвителем контура (НО).



Для низких частот , где τ - групповое время прохождения луча в контуре,



(2.72)



Из этого выражения видно, что положение источника фазовых шумов вблизи концов контура, где Δt наибольшее приводит к максимальной спектральной плотности, а следовательно, к большим шумам. Кроме того, наивысшие частотные составляющие, попадающие в частотную полосу устройства обработки, вносят наибольший вклад в уровень шумов. Расчет показывает, что для источника фазовых шумов с полосой в 1 Гц при размещении его на одном конце волоконного контура длиной 1000 м величина примерно на девять порядков меньше, чем ; а при размещении источника фазовых шумов вблизи центра контура уменьшается ещё на несколько порядков. Из этого следует, что обеспечение свойства взаимности замкнутого оптического интерферометра позволяет существенно уменьшить фазовые шумы, индуцированные влиянием окружающих условий. Дальнейшее уменьшение этих шумов возможно, если считать, что источник шумов не точечный, а пространственно распределен по всему волокну. При произвольном распределении для определения Δϕ необходимо интегрирование вдоль волоконного контура. Очевидно, однако, что для распределения симметричного относительно середины контура Δϕ(t) равна нулю. Такая ситуация может быть приблизительно реализована намоткой волокна так , чтобы части его, равностоящие от середины контура, лежали вблизи друг от друга, (что обеспечит схожее влияние на них окружающих условий).



Как уже ранее от­мечалось, применение в ВОГ одномодового волокна, сохра­няющего одно состояние поляризации, позволяет сущест­венно уменьшить взаимные шумы, а следовательно, повы­сить чувствительность прибора. 0днако даже при исполь­зовании такого волокна точность прибора может быть су­щественно снижена из-за наличия термически индуцированной невзаимности в волоконном контуре. Эта пробле­ма может служить препятствием успешному конструирова­нию ВОГ.

Термически индуцированная невзаимность имеет место, когда вдоль волокна действуют зависящие от времени тем­пературные градиенты. Невзаимность возникает, если соот­ветствующие волновые фронты двух противоположно бегу­щих лучей проходят одну и ту же область волокна за раз­личное время. Если фазовая постоянная распространения волокна (набег фазы на единицу длины)

, (2.73)



где -коэффициент преломления сердечника волокна, изменяется по-разному вдоль волокна, то соответствующие вол­новые фронты двух противоположно бегущих лучей прохо­дят несколько отличающиеся эффективные длины путей. Это, в свою очередь, приводит к относительно большим невзаимным фазовым сдвигам, маскирующим фазовый сдвиг Саньяка, вызываемый вращением.



Оценим влияние тем­пературных градиентов на точность ВОГ. Запишем фазу Саньяка в виде

, (2.74)



где *N -* число витков катушки, - площадь витка,



Каждый элемент волоконного контура вносит при­ращение фазовой задержки в оба противоположно бегущих луча. Если температура *Т* изменяется во времени *t* и в зависимости от положения участка вдоль волокна, то дифференциальное приращение фазы за временной пе­риод τ в любой точке волокна можно приближенно выра­зить в виде



, (2.75)



где β - фазовая постоянная распространения волокна; α - линейный коэффициент теплового расширения.

Первое слагаемое в квадратных скобках уравнения соответствует приращению фазы на 1° С на длине при изменении постоянной распространения β; второе слагаемое соответствует приращению фазы на элементе длины при температурном удлинении волокна и при из­менении температуры на 1° С. Если - температурный градиент во времени, то множитель в круглых скобках уравнения соответствует перепаду температур за время τ. Полученное уравнение справедливо для времен­ных интервалов порядка времени распространения луча в волоконном контуре (несколько микросекунд).



Соответствующие волновые фронты противоположно распространяющихся лучей пересекают дифференциальный элемент волокна *,* расположенный на расстоянии l от конца волоконного контура, в моменты, разделенные ин­тервалом времени:



, (2.76)



где *L -*  длина контура; ω - частота излучения.

Для получения невзаимного фазового сдвига, обусловленного температурным градиентом подставим выражение для τ в выражение для dϕ и проинтегрируем по длине волокна L:

(2.77)



Приравнивая этот фазовый сдвиг, появившийся за счет температурного градиента, фазовому сдвигу Саньяка, , можно определить «кажущуюся» угловую скорость вращения ( обусловленную термически индуцированной невзаимностью контура ВОГ), т.е.



. (2.78)



Интегрирование «кажущейся» угловой скорости по времени дает угловую ошибку ВОГ за счет температурных градиентов



Выражение в квадратных скобках под интегралом соответствует перепаду температур за время 0 - t.

Для количественной оценки влияния термически индуцированной невзаимности вычислим величину для типового ВОГ, работающего в соответствующих рабочих условиях. Считаем, что многослойный волоконный контур намотан на цилиндр, при этом разница между внешним и внутренним диаметрами мала по сравнению со средним диаметром. Полагаем, что температура контура изменяется линейно от его внутреннего слоя к наружному слою.



Если между начальным моментом работы ВОГ (t=0) и более поздним моментом разница температур по сечению катушки изменяется на величину ΔТ, то

(2.79)



Следовательно:

(2.80)



Произведем численную оценку требуемой стабильности температуры при невзаимности для типовых значений параметров ВОГ:



R = 10 см

L = 1,56 км

N = 2480

Время интегрирования 1 час.

°C



Сохранение такого постоянства температуры в относитель­но стабильных рабочих условиях является серьезной зада­чей, не говоря уже о периоде прогрева или изменений ок­ружающих условий, что часто имеет место при применениях гироскопов.

Можно предложить два возможных метода уменьшения термически индуцированной невзаимности. Первый метод состоит в поиске материалов для волокна с малым тем­пературным коэффициентом индекса преломления .Второй метод состоит в намотке волоконного контура так, что части волокна, которые находятся на равных расстояни­ях от середины контура, располагаются рядом друг с дру­гом. Это приводит к тому, что температура *Т ( t , l )* рас­пределяется симметрично вокруг *l =L/2;* в этом случае ин­теграл в уравнении для становится исчезающе малым. Однако, если катушка намотана таким образом, ее витки будут часто пересекаться, что приведет к избыточным по­терям на микроизгибах или потребует достаточно толсто­го буферного покрытия. Таким образом, теоретическое рассмотрение влияния температурных градиентов показы­вает, что термически индуцированная невзаимность нала­гает практический предел на чувствительность ВОГ, кото­рый значительно выше фотонного предела. Если использу­ется одномодовое волокно из обычного материала, то температурные градиенты могут ограничить применение ВОГ лишь в системах управления невысокой точности.



1. *Влияние внешнего магнитного поля на*

*точностные характеристики ВОГ.*

Существует много веществ, оптические параметры ко­торых зависят от величины напряженности внешнего маг­нитного поля. Коэффициент преломления среды есть один из таких параметров. Изменение коэффициента преломле­ния связано с вращением плоскости поляризации излуче­ния, распространяющегося в среде. Вращение плоскости поляризации светового луча, распространяющегося в среде, под действием магнитного поля обусловлено эффектом Фарадея. Иногда эффектом Фарадея называют искусствен­ную оптическую активность, возникающую в среде под дей­ствием магнитного поля.

Оптической активностью является способность вещест­ва поворачивать вектор поляризации линейно-поляризованного светового луча. Если причиной возникновения враща­тельной способности является какое-либо внешнее воздей­ствие (например, магнитное поле), то активность этого ти­па является искусственной. В оптически активном вещест­ве оптическое излучение распадается на две волны, поля­ризованные циркулярно - по правому и левому кругам. Векторы поляризации этих волн вращаются в противопо­ложных направлениях, а коэффициенты преломления для них различны.

Линейно-поляризованный световой луч можно предста­вить суперпозицией двух волн, поляризованных по кругу, со взаимно противоположным вращением вектора поляри­зации и равными амплитудами колебаний. Рассмотрим распространение линейно-поляризованной волны в среде, проявляющей эффект Фарадея. Для анализа распространения волны в среде, помещенной в магнитное поле, представим волну в виде суммы двух волн, поляризованных по кругу с противоположными направлениями вращения и различными скоростями распространения:

, (2.81)



где n- и n+ - показатели преломления для волн, поляризованных по правому и левому кругу.

Фазовые задержки каждой из волн на пути l

(2.82)



где n0 - показатель преломления среды при отсутствии магнитного поля.

Выйдя из оптически активной среды, циркулярно поляризованные волны складываются. Различные фазовые задержки для волн, поляризованных по правому и левому кругу, приводят к повороту вектора поляризации волны по отношению к вектору поляризации падающего линейно-поляризованного излучения.

Угол поворота плоскости поляризации на пути l

(2.83)



где Vλ - постоянная Верде; Н - напряженность магнитного поля.

Обратимся теперь к контуру ВОГ. В нем даже в отсутствие магнитного поля существует взаимное двулучепреломление (см 2.2). Кроме того, взаимодействие магнитного поля индуцирует невзаимное круговое двулучепреломление, которое зависит от направления распространения луча. Это двулучепреломление суммируется с уже существующим взаимным двулучепреломлением в волокне. Именно комбинация двух двулучепреломлений в контуре В0Г определяет его чувствительность к внешнему магнитному полю. При отсутствии взаимного двулучепреломления невзаимная фазовая разность после интегрирования по замкнутому волоконному контуру будет равна нулю, поскольку интеграл по контуру тангенциальной составляющей внешнего магнитного поля равен нулю. Невзаимная фаза, накопленной в другой половине контура при учете реверса направлений распространения оптических колебаний по отношению к направлению магнитного поля. При наличии взаимного двулучепреломления эта компенсация будет неполной.

H

Hn

A1

Hτ

A1

Направленный ответвитель

A

A2

A2

Рис 2.6. Волоконный контур, находящийся под действием внешнего однородного магнитного поля.

Таким образом, можно утверждать, что если состояние поляризации остается постоянным вдоль волокна (в отсут­ствие магнитного поля), то внешнее магнитное поле не оказывает влияния на измеряемую фазу Саньяка. В ре­альном одномодовом волокне, однако, состояние поляриза­ции изменяется случайным образом вдоль волокна.

При действии магнитного поля разность фаз противо­положно бегущих в контуре волн можно записать в виде:

(2.84)



где Δϕс - фаза Саньяка, обусловленная вращением контура;

Ψm - разность фаз, обусловленная влиянием магнитного поля; при этом:

, (2.85)



где Vγ - постоянная Верде; H - напряженность магнитного поля и l - длина части контура, на которой рассматривается действие магнитного поля; γ1 - угол поворота плоскости поляризации на данном участке контура.

Таким образом, вместо измерения фазы Саньяка Δϕс регистрирующее устройство измеряет разность фаз , ис­кажаемую . Значение зависит не только от напря­женности магнитного поля (вследствие эффекта Фарадея), но и от угла γ1.



Если на участке контура отсутствует поворот плоскости поляризации (γ1 = 0), то также равна нулю. Наихудший случай может иметь место при γ1 = π/2, когда участок контура является аналогом λ/4 - пластины, преобразующей линейную поляризацию в круговую, и наоборот.



Таким образом, если состояние поляризации изменяется вдоль волоконного контура, окружающие магнитные поля могут вносить значительную ошибку при измерении фазы Саньяка. В реальном волокне, состояние поляризации является случайным ( за исключением волокон с устойчивой поляризацией), поэтому можно считать, что случайные флуктуации γ1 дадут случайную ошибку прибора.

Численная оценка показывает, что для ВОГ с:

λ=830 нм (Vλ= 2.6 10-6 рад/А);

H=40 А/м (магнитное поле Земли)

l=5м;

ошибка измерения фазы Саньяка составляет величину порядка 0.001 рад. Следовательно влияние магнитного поля Земли может приводить к значительной ошибке в определении угловой скорости вращения.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что однородное магнитное поле за счет эффекта Фарадея вызывает ошибку в измерении угловой скорости вращения ВОГ. Эта ошибка определяет уход прибора, который зависит от величины и ориентации магнитного поля, а также от двулучепреломления волокна в контуре. Изменение любого из этих факторов будет вызывать соответствующее изменение ухода. Ошибка ВОГ, связанная с магнитным полем Земли, имеет типовое значение порядка 10 град/ч. Уменьшить эту ошибку можно путем экранирования контура от магнитного поля; кроме того, может быть также эффективным уменьшение чувствительности системы к магнитному полю путем контроля состояния поляризации волн.

*3. Методы компенсации погрешностей.*

*3.1. Компенсация паразитной поляризационной модуля­ции в волоконно-оптическом гироскопе*

Паразитная поляризационная модуляция, сопровождающая работу волоконных и интегрально-оптических фазовых модуляторов, является серьезным фактором, ограничивающим точностные характери­стики волоконно-оптического гироскопа .

Одним из путей умень­шения паразитной поляризационной модуляции может быть изготовле­ние фазового модулятора в виде двух номинально идентичных поло­вин, между которыми устанавливается модовый конвертор, преобразую­щий поляризационные моды друг в друга. При этом дифференциальная фазовая модуляция поляризационных мод, возникшая в первой поло­вине фазового модулятора, компенсируется дифференциальной фазовой модуляцией противоположного знака, имеющей место во второй поло­вине модулятора.

При изготовлении фазового модулятора из одномодо­вого волоконного световода модовый конвертор может быть реализован с помощью соответствующим образом расположенных сжимателей во­локна, в виде двойной симметричной скрутки участка волокна определенной длины, сварного или клеевого соединения волокон с разворотом их осей двулучепреломления на 90° и т. п.

Поскольку, однако, трудно добиться полной идентичности упомянутых половин фазового мо­дулятора и условий, в которых они находятся, такой метод компенсации паразитной поляризационной модуляции во многих случаях оказыва­ется недостаточно эффективным.

Ситуация существенно улучшается, если фазовый модулятор устроен таким образом, что после конверсии поляризационных мод излучение без временной задержки снова проходит в прямом или обратном направлениях по тому же оптическому пути, что и до конверсии. Технически, по-видимому, проще обеспечить обратное прохождение излучения. Поэтому мы ограничимся рассмотрением только этой возможности, и будем называть соответствующий фазовый модулятор модулятором отражательного типа.

Матрицу Джонса модового конвертора в фазовом модуляторе отражательного типа, с точностью до множителя, можно представить в виде

или (3.1)



В первом случае вся картина поля поворачивается на 90°, а во втором поля мод поворачиваются навстречу друг другу. Предположим, что мы имеем дело с модовым конвертором первого типа. Обозначив матрицу Джонса отрезка волокна (или интегрально-оптического волновода), на котором осуществляется модуляция *N*(*t*), будем иметь для матрицы Джонса всего фазового модулятора *M1* (*t* ) (штрихом обозначена операция транспонирования):

*M1* (*t*) =*N /* (*t*)*K1* *N*(*t*) = [det*N*(*t* )] *K1* (3.2)

При записи (3.2.) был использован тот факт, что матрицы Джонса взаимных элементов для встречных направлений распространения излучения связаны друг с другом операцией транспонирования.

Из (3.2) видно, что временная зависимость матрицы Джонса модулятора содержится только в численном фазовом множителе, откуда и

следует, что паразитная поляризационная модуляция в рассматриваемом случае отсутствует. Заметим, что при этом устраняется любой из типов паразитной поляризационной модуляции, в том числе и за счет модуляции дихроизма, причем эффективность фазовой модуляции удваивается по сравнению со случаем однократного прохождения излучения по модулирующему отрезку волокна или интегрально-оптического волновода.

1

6

5

3

7

6′

7′

4

5′

3′

2

Рис 3.1. Вариант включения отражательного фазового модуля- тора в схему волоконно-оптического гироскопа.

Возможная реализация отражательного фазового модулятора с модовым конвертором первого типа на основе Фарадеевского зеркала и способ его включения в схему интерферометрического волоконно-оптического гироскопа показаны на рисунке; отражательные фазовые модуляторы *3*, *3∫*  , состоящие из модулирующих отрезков волокна или интегрально-оптического волновода *5*, *5∫* , ячеек Фарадея с углом вращения 45° *6*, *6∫* и зеркал *7*, *7∫* , выделены на этом рисунке штриховой линией.

В схеме интерферометрического волоконно-оптического гироскопа кроме контурного направленного ответвителя *1* используется еще один направленный ответвитель *4*, с помощью которого и осуществляется включение в чувствительный контур *2* волоконно-оптического гироскопа одного или двух фазовых модуляторов отражательного типа.

При использовании в интерферометрическом волоконно-оптическом гироскопе двух фазовых модуляторов частоты модуляции и законы изменения фазы в модуляторах могут быть как одинаковыми, так и различными. Оптические длины путей с заходами в модуляторы *3* и *3∫* могут быть либо одинаковыми, либо отличаться на величину, существенно превышающую длину когерентности источника излучения. Это открывает дополнительные возможности в обработке сигнала интерферометрического волоконно-оптического гироскопа и его конструктивных решений.

Очевидно, что в интерферометрическом волоконно-оптическом гироскопе не обязательно устанавливать два фазовых модулятора.

При установке только одного фазового модулятора свободный выход направленного ответвителя *4* может быть использован для других целей. Для исключения влияния отраженного сигнала источник излучения должен подключаться к оптическому тракту волоконно-оптического гироскопа через оптический изолятор (на рисунках не показан). При использовании в фазовом модуляторе модового конвертора второго типа вместо (3.2) будем иметь:

(3.3)



Здесь = (*t*) (*i*, *j* = 1 , 2) - элементы матрицы *N*(*t* ), введенной выше. Из (3) следует, что, в отличие от предыдущего случая, паразитная поляризационная модуляция при произвольной матрице *N*(*t*) не устраняется.



Предположим, однако, что элементы *N*(*t* ) удовлетворяют соотношениям . Тогда вместо (3.2) имеем



M2(t ) = [ per N (t) ] K2 (3.4)

где per *N* (*t* ) = n11 n22 + n12 n21 - перманент матрицы *N*(*t* ).

Таким образом, если равенства (3.4) имеют место, то и в модуляторе с модовым конвертором второго типа паразитная поляризационная модуляции будет устраняться.

Рассмотрим один частный случай. Предположим, что модулирующий отрезок волокна или интегрально-оптического волновода представляет собой линейную фазовую пластинку с азимутом быстрой оси, равным 0°. Тогда n12 = n21 = 0, так что паразитная поляризационная модуляция будет скомпенсирована.

Одна из возможных реализаций отражательного фазового модулятора с модовым конвертором второго типа представляет собой последовательное включение линейной фазовой пластинки с изменяющейся во времени фазовой задержкой и азимутом быстрой оси 0° , четвертьволновой фазовой пластинки с азимутом быстрой оси 45° и зеркала. Включение такого фазового модулятора в схему интерферометрического волоконно-оптического гироскопа может быть осуществлено так же, как и в предыдущем случае.

*3.2. Компенсация избыточного шума в волоконно-оптическом гироскопе с ответвителем типа 3×3.*

Один из путей повышения точности волоконно-оптических гироскопов связан с использованием в них суперфлуоресцентных волоконных источников излучения. Такие источники близки по свойствам к тепловым и характеризуются высоким уровнем избыточного шума. Эксперименты показывают, что избыточный шум доминирует над другими шумами уже при мощностях на фотодетекторе порядка 10 mW . Поэтому проблема уменьшения его влияния на точность гироскопов представляет большой интерес.

В когерентно-оптической связи для подавления избыточного шума гетеродина используется балансное детектирование. Балансное детектирование можно применить и в волоконно-оптических гироскопах, используя в качестве опорного сигнала излучение источника, задержанное на время прохождения света по оптическому тракту волоконно-оптических гироскопов.

Однако реализация балансного детектирования в обычной ”минимальной” схеме волоконно-оптических гироскопов с входным и контурным ответвителями типа 2×2 сопряжена с рядом трудностей, связанных с обеспечением когерентного взаимодействия информативного и опорного сигналов. Эта проблема решается значительно проще при использовании в схеме волоконно-оптического гироскопа направленного ответвителя типа 3 × 3.

7

2

I2

E2

4

5

3

6

I1

Iout

8

E1

L

S

1

Рис 3.2. Схема волоконно-оптического гироскопа с ответвителем типа 3×3.

На рис.3.2. представлена простейшая схема волоконно-оптического гироскопа с ответвителем типа 3 × 3. Излучение от источника (*3*) поступает через направленный ответвитель типа 3 × 3 (*4*) на входы чувствительного контура (*5*), а затем - на фотодетекторы (*1*) и (*2*), выходы которых подключены к дифференциальному усилителю (*6*). Каждая из встречных волн *L* и *S* в схеме (см. рисунок) является и информативной (сигнальной) и одновременно — опорной для другой волны, причем с точностью до множителя, в случае идеального направленного ответвителя имеем:

(3.5)



(3.6)



Здесь *A* и ϕ - соответственно амплитуда и фаза волн, а ϕ0-невзаимный (саньяковский) фазовый сдвиг. Сигналы, поступающие на фотодетекторы:

(3.7)



(3.8)



где ϕ1 - разность фаз сигналов, прошедших через направленный ответвитель по ”прямому” и ”перекрестному” каналам.

Токи фотодетекторов (которые считаются идентичными):

(3.9)



где n1 и n2 - шумы фотодетектирования.

На выходе дифференциального усилителя

(3.10)



Таким образом, избыточный шум, обусловленный фоновой засветкой фотодетекторов, оказывается скомпенсированным. Из (3.9-3.10) следует также, что волоконно-оптический гироскоп с контурным направленным ответвителем типа 3×3 и балансным детектированием работает в квадратурном режиме, его оптический масштабный коэффициент такой же, как и в ”минимальной” схеме, однако электрический масштабный коэффициент меньше, поскольку ϕ1 ≠ π/2.

Рассмотренная схема представляет интерес для волоконно-оптического гироскопа грубого и среднего классов точности. Для волоконно-оптических гироскопов высокой точности можно использовать модифицированную ”минимальную” схему с направленным ответвителем типа 3×3. В этом случае в оба канала включаются дополнительные элементы 7, 8, обеспечивающие возможность повышения точности устройства за счет снижения уровня поляризационных шумов, устранения паразитной модуляции и других неблагоприятных факторов, рассмотренных в дипломной работе.

1. *Компенсация обратного рэлеевского рассеяния*

Обратное рэлеевское рассеяние (основной механизм потерь в волокне с низкими потерями) является важным фактором, который может существенно снижать чувствительность ВОГ.

Сущность этого эффекта состоит в том, что каждая первичная волна, противоположно распространяющаяся в световодном контуре, возбуждает маломасштабные неоднородности в волокне, которые в свою очередь действуют как индуцированные дипольные излучатели. Световод «захватывает» часть рассеянного излучения и канализирует его в обратном направлении.



*3*

*1*

*2*

Рис 3.3. Обратнорассеянные волны в контуре ВОГ (схема).

Вклады от каждого элементарного рассеивателя суммируются векторно и образуют полное рассеянное поле в каждом направлении. Если контур не возмущен, то амплитуда и фаза поля стабильны во времени. Поскольку элементарные рассеиватели распределены случайно вдоль волокна, можно оценить лишь среднеквадратическое значение амплитуды каждой обратнорассеянной волны относительно полной обратнорассеянной мощности.

Предсказать фазу каждой волны весьма затруднительно. Обратнорассеянные волны обладают некоторой степенью когерентности относительно двух первичных волн и поэтому суммируются с первичными волнами также векторно со случайными фазами. Фазы результирующих двух волн в общем случае из-за влияния окружающих условий не идентичны (рис. 3.3.).

Следовательно, на выходе волоконного контура появляется составляющая фазового сдвига, обусловленная обратным рэлеевским рассеянием, и при любом одиночном измерении неразличимая от фазы, индуцированной вращением контура (фазы Саньяка), т. е. появляется ошибка в измерении угловой скорости вращения контура.

*ϕ2*

*Δϕс*



*А*

*В*

*ϕ1*

Рис 3.4. Обратнорассеянные волны в контуре ВОГ (векторная диаграмма).

Интерес представляет оценка ошибкиВОГ**,** обусловленной обратным рэлеевским рассеянием. Оценить неопределенность измерения фазы Саньяка и соответственно ошибку в измерении угловой скорости, обусловленной обратным рэлеевским рассеянием, можно по упрощенной методике, предложенной в работе [4].

Полагаем, что затухание излучения в волокне обусловлено рэлеевским рассеянием ( коэффи­циент ослабления, *L -* длина контура). При этом теряе­мая энергия равномерно рассеивается по длине волокна с коэффициентом направленного рассеяния *G* вдоль волок­на (1 < G < 1,5). Для равномерно рассеянного излучения приближенно справедлив закон Ламберта.



Учитывая эти условия, можно получить отношение мощности части от полного рассеянного излучения, «перехватываемой» во­локонным сердечником, и появляющегося на выходе кон­тура, к мощности первичной волны на выходе контура ( векторная диаграмма на рис. 3.3.):

(3.11)



В соотношении (3.11) PS - мощность обратнорассеянной (вторичной) волны на выходе контура, P1 - мощность пер­вичной (сигнальной) волны после одного прохождения в контуре, P0 - мощность излучения на входе одного плеча контура, - телесный угол ввода излучения волокон­ного сердечника ( β - линейный угол).



Величину можно разложить в ряд Маклорена, и при малом ограничиться двумя первыми членами раз­ложения. Тогда получим



(3.12)



Как следует из векторной диаграммы (рис. 3.4.), при ком­бинации двух пар противоположно распространяющихся в контуре волн максимальное приращение фазы, обуслов­ленное эффектом обратного рассеяния, можно выразить в виде

(3.13)



Это значение фазы, полученное при одиночном измерении, приводит к ошибке в измерении угловой скорости враще­ния. Для определения угловой скорости вращения, соответ­ствующей этому значению фазы (эквивалентной ошибке измерения угловой скорости), используем ранее получен­ную формулу Саньяка:

(3.14)



Имеем

(3.15)



где *N -*  число витков контура; *D -*  диаметр витка.

Подставляя *N=L / πD* в это выражение, имеем

(3.16)



Для получения численной оценки используем следующие значения параметров:

λ = 1 мкм,

N = 318,

D = 1 м,

β = 0.1 рад,

G = 1,

L = 1000 м .

Подставляя эти значения, получаем максимальную фазовую ошибку при одном обходе контура рад, которая линейно преобразуется в ошибку измерения угловой скорости = 341 град/ч ( 0.095 град/с). Полученный результат свидетельствует о значительности ошибки и приводит к выводу о необходимости применения специальных мер или использования устройств, минимизирующих ошибку, обусловленную обратным рэлеевским рассеянием.



Способы минимизации ошибки ВОГ, обусловленной обратным рэлеевским рассеянием могут быть связаны *с* уменьшением взаимной когерентности между первичной и вторичной (рассеянной) волной. При этом, однако, ряд способов, уменьшающих когерентность, одновременно уменьшают взаимность между двумя первичными волнами, что весьма нежелательно. Но такие способы, как частотная модуляция первичного сигнала или физическая моду­ляция длины контура (контролируемым образом), умень­шая когерентность, не вносят дополнительной невзаимно­сти в контур.

Если эффективность модуляции достаточно высока, т. е. если в отсчетный интервал времени число длин волн, укладывающихся на длине контура, изменяется зна­чительно, то вторичная (рассеянная) волна суммируется с появляющейся первичной волной со случайной фазой. Ес­ли измерение осуществляется с частотой *q* в единицу вре­мени и если фаза вторичной волны изменяется случайно между отсчетами, то неопределенность углового положения контура по истечении данного интервала времени опреде­ляется процессом «случайного блуждания» и дается вы­ражением :

(3.17)



Для приведенных выше численных значений контура ВОГ, приняв *q = 10* отсч./с. и интегрируя в течение часа, полу­чается ошибка (экстраполированный дрейф) 1,27 град/ч1/2.

Следует отметить, что в существующих ВОГ ошибка, обусловленная обратным рассеянием, уменьшается за счет некоторых неизбежно присутствующих факторов, еще не­достаточно изученных, но уменьшающих степень когерен­тности между первичной и вторичной волнами .

Например, во многих системах ВОГ используется модуляция излучения, которая может рандомизировать до некоторой степени фазу рассеяной волны, хотя эта модуляция может ис­пользоваться в ВОГ для совершенно других целей (к приме­ру для удобства регистрации сигнала). Некоторая сте­пень рандомизации фазы неизбежно имеет место вследст­вие механических и тепловых воздействий на волоконный контур; эти воздействия, однако, производят другие ошиб­ки (если они не полностью взаимны). Изменения частоты лазерного излучателя также могут быть источником рандомизации.

Все же, несмотря на указанные факторы, вклад в общую ошибку ВОГ эффектами обратного рассеяния может быть еще значительным или даже доминирующим. При непрерывном совершенствовании конструкции ВОГ чувствительность последнего к механическим и теп­ловым возмущениям будет уменьшаться, естественно ожидается неизбежное увеличение степени когерентности рас­сеянных волн. Эффекты остаточных влияний окружающих условий (механических и температурных изменений) раз­виваются медленно, что не позволяет выбрать частоту не­зависимых случайных отсчетов достаточно высокой для существенного уменьшения ошибки, обусловленной обрат­ным рассеянием. Частоту отсчетов нужно выбирать так, чтобы вторичные (рассеянные) волны были некоррелиро­ваны по фазе.

Для этого необходим дополнительный ана­лиз, однако кажется вероятным, что влияние вторичных волн может быть сделано очень малым. К примеру, если в ВОГ использовать импульсную генерацию с импульса­ми, вводимыми в контур на частоте c */ nL* (т. е. длитель­ность импульса равна времени обхода контура), а часто­ту несущей импульса сдвигать на величину *c / nL* в течение периода (т. е. размах частотного сдвига составляет *(c / nL)* в секунду) для рандомизации фазы рассеянной волны, то при *п = 1.5* и L = 1000 м число отсчетов q = в секунду.



Тогда ошибка (экстраполированный дрейф) за счет рэлеевского рассеяния становится равной град/ (при «случайном блуждании» 1 с) или град/ч1/2 (при «случайном блуждании» 1 ч) . Для волоконного контура длиной 1000 м такая ошибка потребует измене­ния частоты источника излучения в 200 кГц на проход (на импульс) или 40 ГГц/с.



Ошибка измерения угловой ско­рости вращения контура за счет обратного рэлеевского рассеяния может быть минимизирована уменьшением сте­пени взаимной когерентности между первичной и рассеян­ной волнами. Она может быть уменьшена снижением ве­личины проинтерферировавшей с прямой волной мощно­сти обратнорассеянной волны.

Уменьшение когерентности можно реализовать с помо­щью фазовой модуляции первичной волны, что рандомизирует фазы обратнорассеянных волн. Изменения окружа­ющих условий и уменьшение длины когерентности источ­ника излучения также могут сыграть роль в уменьшении влияния эффектов обратного рэлеевского рассеяния. Одна­ко, даже с учетом выше указанных моментов, неопреде­ленность в измерениях угловой скорости, обусловленная обратным рассеянием, может составлять значительную ве­личину (намного больше фотонного предела).

Величину мощности обратнорассеянной волны, интер­ферирующей с прямой волной, можно значительно умень­шить используя импульсный сигнал, длительность которо­го значительно короче времени распространения луча в контуре τ . Это уменьшение имеет место вследствие того, что в любой данный момент короткий импульс лока­лизуется в соответственно коротком сегменте волоконного контура. В результате лишь часть поля обратнорассеянной волны может приходить на выход в совпадении с прямым сигнальным импульсом. (рис 3.5.). Несовпадающее с импульсом обратнорассеянное поле может быть исключено временным стробированием.

Использование короткого импульса не только значи­тельно снижает уровень мощности обратнорассеянного из­лучения при совпадении (примерно в 1000 раз при длитель­ности импульса = 5 нс в контуре длиной 1000 м), но и позволяет определить расположение сегмента волоконно­го контура, где это излучение «зарождается». Обратнорассеянное излучение, обнаруживаемое в течение интер­вала

(3.18)



(в совпадении с прямым импуль­сом), «зарождается» только от рассеивателей, сосредото­ченных в пределах соответствующего сегмента волокна на середине контура в интервале

(3.19)



где *L -* длина контура и - групповая скорость импульса.



Таким образом, если входной импульс сделать корот­ким, то число источников обратного рассеянного излучения уменьшается и определяется длиной короткого сегмента волокна *.*

Например, если Δt = 5 нс, то Δz *= 1* м; при Δt =1 нс, Δz = 0,2 м. Поскольку расположение этого сегмента известно, его границы могут быть определены и физически изолированы от оставшейся части контура. Дальнейшего увеличения чувствительности ВОГ можно достигнуть уменьшением обратного рассеянного излучения лишь от этого короткого сегмента контура (по-видимому, это можно реализовать соответствующей оптимальной об­работкой сигнала).

Для уменьшения фазовой ошибки, обусловленной обратным рэлеевским рассеянием, может быть предложен способ усреднения в течении постоянной интегрирования системы обработки.

1. *Компенсация влияния эффекта Керра*

*на точность ВОГ .*

Оптический нелинейный эффект Керра проявляется в виде возмущения коэффициента преломления среды при изменении интенсивности воздействующего на среду элек­трического поля. Для одномодового волокна это означает, что фазовая постоянная распространения среды становит­ся функцией мощности распространяющейся волны. Если мощности оптических лучей, противоположно распростра­няющихся по контуру ВОГ, неодинаковы, а следователь­но, неодинаковы постоянные распространения, то это при­водит к фазовой невзаимности контура, и в результате к ошибке измерения угловой скорости. Характерно, что раз­ность мощностей порядка 10^ Вт в таком материале, как плавленый кварц, дает ошибку, выходящую из пределов допусков для систем инерциальной навигации. Слу­чайные вариации разности мощностей, зависящие от изме­нений окружающих условий, дают случайный дрейф ВОГ. В типовых условиях для измерения выходного сигнала при малой угловой скорости вращения требуемая полная мощ­ность на входе фотодетектора составляет величину около 100 мкВт (с тем чтобы превысить уровень электронных или фотонных шумов). Поэтому разность мощностей должна контролироваться или быть известной с точностью до 10 от полной мощности. Сохранение такого жесткого допуска является трудной задачей. Однако это требование можно ослабить до практических значений специальной модуля­цией источника излучения ВОГ или выбором источника с подходящими спектральными и статистическими характеристиками.

Возможный метод сущест­венного уменьшения невзаимности контура, обусловленной влиянием оптического эффекта Керра (неравенства фазо­вых задержек для противоположно бегущих лучей в нели­нейной среде) сос­тоит в соответствующей прямоугольной модуляции источ­ника излучения ВОГ, что согласует нелинейное взаимо­действие между противоположно бегущими лучами и обес­печивает приблизительно одинаковые взвешенные средние значения фазовых задержек обоих лучей.

Изменения постоянной распространения волокна в за­висимости от интенсивности волны является функцией так­же состояний поляризации двух противоположно бегущих волн. Для ВОГ необходимо, чтобы эти состояния поляри­зации были идентичны. С целью упрощения последующего анализа предположим, что состояния поляризации идентичны и линейны. Тогда возмущения постоянных распространения будут равны:

(3.20)



где - импеданс среды; *-* коэффициент Керра среды; δ - коэффициент, зависящий от поперечного распределе­ния моды (порядка единицы); - пиковые интенсивности волн, которые в общем случае зависят от положения на волоконном контуре *Z* и времени *t* (рис. 3.5).



Важной особенностью этих уравнений является то, что интенсивность второй волны оказывает удвоенное воздей­ствие на постоянную распространения по сравнению с воз­действием первой волной. Подобным об­разом, удвоенный эффект на постоянную распространения оказывает первая волна, по сравнению со второй. Это так называемые «кросс-эффект» и «само-эффект». Если интенсивности двух волн не одинаковы, то появляются различные возмущения постоянных распрост­ранения и , что приводит к появлению фазовой не­взаимности в контуре. Если возмущения зависят просто от суммы двух интенсивностей, то невзаимный эффект отсут­ствует (даже при неравенстве интенсивностей).



Модуляция волн служит для уменьшения относитель­ного влияния «кросс-эффекта» (по времени). На рис. 3.6. показано распространение в контуре двух волн, интенсивности которых не равны друг другу.

I1( z , t )

Направленный ответвитель

I(t)

I2( z , t )

Z = 0

Z = L

Рис 3.5. Волоконный контур с направленным ответвителем.

z

I1

I2

Рис 3.6. Встречно бегущие прямоугольные волны неравной

интенсивности.

Как видно из рисунка, кросс-эффект имеет место, когда ин­тенсивности двух волн совпадают, при несовпадении кросс-эффект отсутствует.

Каждая дискретная часть каждой волны «проявляет» само-эффект в течение всего времени при движении по длине контура *L,* а половину этого временного интервала проявляется кросс-эффект (за счет временной модуляции ти­па «меандр»). Поэтому множители 2 в квадратных скоб­ках уравнений сводятся к единице (время совпадения двух волн уменьшилось вдвое) и невзаим­ность контура за счет эффекта Керра компенсируется. Дру­гими словами, невзаимный фазовый сдвиг, накопленный в одну половину цикла модуляции, компенсируется невзаим­ным фазовым сдвигом противоположного знака, накоп­ленным в течение другой половины цикла. Фаза, накоп­ленная каждой из волн в течение одного полного цикла, будет определяться равным вкладом двух интенсивностей. Выразим интенсивность противоположно распространя­ющихся волн через интенсивность источника излучения на входе волоконного контура в момент t, I ( t ), и коэффици­ент расщепления *К* направленного ответвителя:

, (3.21)



где L - длина волоконного контура; υ - групповая скорость волны.

Накопленные фазовые сдвиги за счет влияния эффекта Керра для волн на выходе контура в момент t равны:

(3.22)



где в каждом случае имеет место синхронизация подынтегрального выражения с распространением волны.

Используя уравнения для фазовых постоянных и интенсивностей, получим

,



где - групповое время распространения луча в волоконном контуре.



Переходя к новым переменным интегрирования

(3.23)



в первом уравнении и

(3.24)



во втором, получаем:



(3.25)



Эти соотношения справедливы для любого закона вре­менной модуляции интенсивности источника излучения. Первый член в квадратных скобках каждого соотношения описывает «само-эффект», который пропорционален интен­сивности света на выходе волоконного контура в момент *t.* Второй член описывает «кросс-эффект». Он не зависит от времени, если удвоенное групповое время распростра­нения луча в контуре, 2τ , равно целому числу периодов модуляции интенсивности (в дальнейшем предполагается, что это условие выполняется). Невзаимная разность фаз двух лучей, обусловленная действием нелинейного эффекта Керра:

,



где угловые скобки указывают на среднее по времени.

Для определения ошибки измерения угловой скорости вращения, индуцированной эффектом Керра, допуска­ется, что устройство детектирования формирует сигнал, про­порциональный средневзвешенному по интенсивности зна­чению невзаимного фазового сдвига. Такое устройство де­тектирования основано на использовании фазовой модуля­ции для смещения и последующего синхронного метода выделения сигнала; при этом разность между основ­ной частотой и гармоническими составляющими модуля­ции интенсивности и фазовой модуляции должна быть мно­го больше частотной полосы детектирования полезного сигнала. Тогда ошибка в измерении угловой скорости вращения, обязанная влиянию эффекта Керра,



, (3.26)



где R - радиус витка контура; с - скорость света в вакууме.

Следовательно:

(3.27)



Это выражение связывает модулированную интенсив­ность I(t) и коэффициент расщепления по мощности *К* с ошибкой измерения угловой скорости за счет эффекта Керра. Ошибка становится равной нулю, если направленный ответвитель делит мощность поровну, т. е. если К = 0,5. Допуски на точность и стабильность коэффициента деле­ния *К* очень малы для навигационного применения ВОГ. Для увеличения допуска на коэффициент деления *К.* мож­но ослабить интенсивность света уменьшением мощности излучателя либо увеличением поперечных размеров рас­пространяющейся моды.

Первое, однако, ведет к возрастанию фотонного преде­ла чувствительности ВОГ [см. главу 2], а второе вызывает другие проблемы, такие, например, как переход в многомодовый режим работы.

Оценка допуска .на коэффициент *К* применительно к использованию ВОГ в инерциальной навигации дает результаты представленные ниже (при этом использованы следующие значения входящих в формулу коэффициентов):

град/ч 1 / c ,



1/c,



мкВт/(мкм)2,



(мкм) 2/мкВт.



Результат подстановки:

(3.28)



При постоянной интенсивности сигнала (непрерывный ре­жим работы) значение в квадратных скобках выражения равно -1. Следовательно, коэффициент деления не­обходимо настроить и сохранять настройку с точностью K=0.5±10-4 . Для практических реализуемых допусков не­обходимо снова рассмотреть модуляцию но интенсивности. При «квадратной» модуляции левая часть формулы обращается в нуль, как и ожидалось. Можно ожидать по­добного результата для sin2-модуляции.

Однако эта форма модуляции сводит значение левой части уравнения к половинному значению для слу­чая с постоянной интенсивностью. По-видимому, выбор формы импульса, в общем случае, должен быть согласо­ван с рабочим циклом импульсной последовательности в целях обеспечения полной компенсации.

Таким образом, упрощенный анализ по­казывает, что модуляция источника излучения может су­щественно уменьшить ошибку в измерении угловой скоро­сти вращения ВОГ, обусловленную влиянием эффекта Керра.

Выбор источника излучения ВОГ с соответствующими статистическими и спектральными характеристиками. Из выражения для следуют, что ошибка в измерении угловой скорости вращения за счет влияния эффекта Керра определяется:



~ <I2(t)>-2< I(t)> 2, (3.29)



где I(t) - интенсивность излучения источника.

Тогда может быть сведена к нулю, если правая часть соотношения обращается в нуль.



Широкий класс ис­точников излучения обладает статистикой, обладающей этим свойством. В частности, излучение суперлюминесцентного диода обладает статистикой, близкой к статис­тике поляризованного теплового источника. Излучение ла­зера, генерирующего в режиме большого числа аксиаль­ных мод, с увеличением числа мод переходит в тепловую радиацию (что, впрочем, легко объяснить физически - с увеличением числа статистически независимых осцилляторов примерно одинаковой интенсивности суммарное излучение приближается к тепловому излучению).

*4. Расчёт сметной калькуляции НИР.*

*4.1. Исходные положения.*

По согласованию с консультантом технико-экономического обоснование будет выполнено в виде условного расчёта сметной стоимости разработки.

При проведении расчёта предполагается, что работа выполняется в научно-исследовательском институте или конструкторском бюро с привлечением специалистов своего и смежных подразделений, а дипломник выступает в качестве руководителя темы.

В ходе расчёта необходимо выполнить следующие этапы:

1. определение трудоёмкости и календарных сроков работы;
2. расчёт расходов по отдельным статьям затрат и составление сметной калькуляции темы;
3. заключение

*4.2. Определение трудоёмкости и календарных сроков работы.*

Планирование работы было проведено на основании ленточного графика представленного в таблице 4.1.

Для сокращения общей продолжительности выполнения НИР, работы следующие друг за другом и поручаемые разным подразделениям, проводятся одновременно или, по крайней мере, с перекрытием по срокам. Считаем, что дипломник выступает в качестве научного руководителя темы и занят ее выполнением вместе с группой сотрудников своего подразделения и привлекает по мере необходимости специалистов смежных отделов в соответствии с закреплённым за ними профилем работ.

*4.3.Расчёт расходов по статьям затрат*

*и составление сметной калькуляции*

Под сметной калькуляцией понимается предварительный расчёт ожидаемых затрат, выполненный по номенклатуре статей.

Сметная калькуляция является основным документом, определяющим сумму ассигнований, необходимых для выполнения работы.

Проведем расчёт затрат по статьям.

1. Основная зарплата.

По этой статье учитываются расходы на выплату заработной платы, а также премий из фонда зарплаты всем участникам НИР, работающим в подразделениях.

В состав исполнителей не включаются руководители указанных подразделений, а также работники вспомогательных отделов и служб, зарплата которых входит в состав накладных расходов.

Расходы по заработной плате приведены в таблице:

Основная зарплата,

руб.

Трудо-емкость,

чел.-мес.

Подразделение

Средняя

зарплата,

руб./чел.-мес.

Отдел №1 600 22 13200

Отдел научно-технической 500 2 1000

информации

Итого - 24 14200

1. Дополнительная заработная плата и отчисления на

социальное страхование.

Сумма расходов по основной заработной плате используется при расчёте дополнительной зарплаты и расходов по социальному страхованию, которые включаются в сметную калькуляцию в виде отдельных статей и определяются по формуле:

, (4.1)



где З1 - основная заработная плата.

Таким образом:

руб.



1. Накладные расходы.

Накладные расходы редко удаётся конкретно спланировать на всё время выполнения работы, поэтому величина накладных расходов выбирается пропорционально объёму расходов по основной заработной плате.

(4.2)



руб.



1. Прочие расходы.

По статьям «Материалы и комплектующие изделия», «Специальное оборудование для экспериментальных работ», «Производственные командировки», «Контрагентские и прочие производственные расходы» расходы и расчет сметной калькуляции не планировался.

На основании расчётов затрат по статьям составляется калькуляция сметной стоимости НИР, которая служит для обоснования плановых ассигнований по теме и отчёта по использовании ассигнований.

Итого сметная себестоимость:

руб.



Цена НТП:

Ц = 1.25 С = 35145 руб.

*4.4.Выводы по расчету*

На основании сделанных допущений и проведенных расчётов получены следующие результаты:

1. общая продолжительность работ .............................. 6 мес.
2. общая трудоёмкость...........................................24 чел.-мес.
3. цена НТП...............................................................35145 руб.

Затраты по этой теме целесообразны, так как результаты этой работы могут быть использованы как для дальнейших научно-технических работ исследовательского характера, так и для разработки и конструирования устройств рассмотренного типа, обладающих более совершенными точностными и технико-эксплуата-ционными характеристиками. Использование таких устройств позволит в будущем снизить их себестоимость засчёт совершенствования элементной базы, а при массовом производстве засчёт постепенного вытеснения более дорогостоящих приборов этого типа.

Результаты расчета сметной калькуляции представлены в табл.4.2.

№ Наименование Сумма, руб.

п/п статей

1 Основная заработная плата 14200

2 Дополнительная заработная

плата и отчисления на соци- 2556

альное страхование

3 Накладные расходы 11360

Итого: 28116

Ленточный график работ

Подраз-деление

Продолжительность работ, мес.

Числен-ность

чел.

Трудоём-кость

чел.-мес.

Наименование

работ

№

п/п

11

10

9

8

7

6

5

4

3

2

1

9 Разработка рекоменда- Отдел 2 2

ций по конструирова- №1

нию ВОГ

8 Разработка схемотех-

нических методов Отдел 4 2

решения проблем №1

10 Обобщение результатов Отдел 4 2

и составление отчёта №1

5 Изучение и анализ ре- Отдел 3 2

зультатов смежных НИР №1

4 Расчёт планово-эконо- Отдел 0.5 1

мических показателей №1

3 Составление обзора Отдел 1 1

№1

2 Сбор информационных ОНТИ 2 1

материалов

1 Составление и анализ Отдел 0.5 1

задания №1

6 Составление и утверж- Отдел 3 2

дение методик и алго- №1

ритмов исследования

7 Теоретические исследо- Отдел 4 2

вания и расчёты №1

*5. Безопасность жизнедеятельности*

*и охрана труда*

Дипломная работа посвящена анализу погрешностей волоконно-оптического гироскопа. В ходе ее выполнения были проведены необходимые расчеты и сделаны выводы, которые могут послужить материалом для дальнейших исследований в этой области. При разработке алгоритмов анализа и математическом моделировании описываемых процессов использовался персональный компьютер IBM с процессором Pentium, а также ряд дополнительного оборудования (принтер, модем и т.д.)

Вся пояснительная записка также оформлялась в электронном виде. В связи с этим раздел безопасности жизнедеятельности целесообразно рассмотреть с учетом ГОСТ 12.4.113-82, а также "СНиП для работников ВЦ".

Так как работа на персональных ЭВМ предполагалась в учебной лаборатории, то основные требования к условиям работы соответствуют «Гигиеническим требованиям к видедисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы в ВЦ»

Используемые программные продукты:

1. Microsoft Word 7.0
2. МathCad 6.0+

Нормальная работа человека-оператора во многом зависит от того, в какой мере условия его работы соответствуют оптимальным. При этом под условиями работы подразумевается комплекс различных факторов, установленных стандартами по безопасности труда.

*5.1. Организация рабочих мест*

Организацию рабочих мест необходимо осуществлять на основе современных эргономических требований. Конструкция рабочей мебели (столы, кресла и стулья) должна обеспечивать возможность индивидуальной регулировки соответственно росту работающего и создавать удобную позу. Часто используемые предметы и органы управления должны находится в оптимальной рабочей зоне.

Рабочее место для выполнения работ в положении сидя должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-88, ГОСТ 22269-88, ГОСТ 21829-88 и требованиям технической эстетики. Рабочие места должны располагаться между собой на расстоянии не менее 1,2 м, рабочий стол должен регулироваться по высоте в пределах 680-760 мм, высота поверхности сиденья должна регулироваться в пределах 400-500 мм.

*5.2. Температура, влажность, давление*

Системы вентиляции и отопления в лабораторном помещении должны обеспечивать параметры микроклимата в соответствии с требованием ГОСТ 12.1.005-88, а также в соответствии с главой СНиП 2-33-75 "Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха".

1. температура: 20 - 2°С;
2. влажность: 50 - 10%;
3. давление: нормальное по ГОСТ 12.1.005-88.

Для поддержания заданных значений температуры и влажности в лабораторных помещениях применяют кондиционирование и вентиляцию. Кондиционирование воздуха должно обеспечивать автоматическое поддержание параметров микроклимата в необходимых пределах в течении всех сезонов года, очистку воздуха от пыли и вредных веществ, создание небольшого избыточного давления в чистых помещениях для исключения поступления неочищенного воздуха. Рекомендуемая интенсивность вентиляции для помещений с ЭВМ составляет 0,5-1 куб. м. свежего воздуха в минуту на каждый квадратный метр пола.

*5.3. Требования к освещению*

Освещение в помещении должно быть смешанным (естественным и искусственным). Освещенность поверхности рабочего стола должна находиться в пределах 300-500 лк, а общая освещенность должна быть не менее 400 лк. Освещенность экрана ( в плоскости экрана) 200 лк (СНиП 2.2.2.542-96).

Естественное освещение в помещении должно осуществляться в виде бокового освещения. Величина коэффициента естественной освещенности (к.е.о.) должна соответствовать нормативным уровням по СНиП 2-4-79 "Естественное и искусственное освещение. Нормы проектирования".

Искусственное освещение в помещении следует осуществлять в виде комбинированной системы освещения с использованием люминесцентных источников света в светильниках общего освещения. Уровни искусственной освещенности на рабочих местах в помещении должны соответствовать нормативным величинам по СНиП 14-4-79.

В помещении должно быть предусмотрено аварийное освещение для продолжения работы и других целей.

Осветительные установки должны обеспечивать равномерную освещенность с помощью преимущественно отраженного или рассеянного светораспределения, они не должны создавать слепящих бликов на клавиатуре и других частях пульта, а также на экране видеотерминала в направлении глаз оператора.

Источники света по отношению к рабочему месту следует располагать таким образом, чтобы исключить попадание в глаза прямого света.

Пульсация освещенности используемых ламп не должна превышать 10%.При естественном освещении следует применять средства солнцезащиты, снижающие перепады яркости между естественным светом и свечением экрана.

В поле зрения оператора должно быть обеспечено соответствующее распределение яркости. Отношение яркости экрана к яркости отражающей поверхности не должно превышать в рабочей зоне 3:1.

*5.4. Требования к уровням шума и вибрации*

Допустимые уровни звукового давления, уровня звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах должны соответствовать требованиям "Санитарных норм допустимых уровней шума на рабочих местах" (СН 3223-85) и не должны превышать предельно допустимых величин.

Уровни звука и эквивалентные уровни звука в лабораторных помещениях определены в ГОСТ 12.1.003-83 и составляют:

1. там, где работают математики-програмисты и операторы видео-дисплейных терминалов, не должны превышать 50 дБА;
2. в помещениях, где работают инженерно-технические работники - 60 дБА.

*5.5. Требования к защите от статического*

*электричества и излучений*

Для предотвращения образования влаги и защиты от статического электричества в помещении необходимо использовать нейтрализаторы и увлажнители, а полы должны иметь антистатическое покрытие. Допустимые уровни напряженности электростатических полей не должны превышать 20 кВ в течении 1 часа (ГОСТ 12.1.045-84).

Напряженность электромагнитного поля:

1. по электрической составляющей: < 50 В/м;
2. по магнитной составляющей: < 5 А/м.

Устройства визуального отображения генерируют несколько типов излучений, в том числе рентгеновское, радиочастотное, видимое и ультрафиолетовое, однако уровни этих излучений достаточно низки и не превышают действующих норм.

1. для ультрафиолетового излучения: <10 Вт/м;
2. для рентгеновского: <100 мкР/ч.

В компьютерных классах необходимо контролировать уровень аэроионизации. Оптимальным уровнем аэроионизации в зоне дыхания работающего считается содержание легких аэроионов обоих знаков от 150 до 5000 в 1 куб.м. воздуха.

*5.6. Требования к видеотерминальному устройству*

В соответствии с нормами для работников ВЦ (СниП 2.2.2.542-96) видеотерминальное устройство должно отвечать следующим техническим требованиям:

1. Яркость свечения экрана- не менее 100 кд/м¤;
2. Минимальный размер светящейся точки- не более 0,31 мм;
3. .Контрастность изображения знака- не менее 0,8;
4. Частота регенерации изображения при работе с позитивным контрастом в режиме обработки текста- не менее 72 Гц;
5. Низкочастотное дрожание изображения в диапазоне 0,05-1 Гц должно находиться в пределах 0,1 мм;
6. Экран должен иметь антибликерное покрытие;
7. Размер экрана по диагонали должен быть не менее 31 см, при этом расстояние от глаз до экрана должно быть в пределах 40\*80 см.
8. Количество точек в строке - не менее 640;
9. Использование в виде отдельного устройства с возможностью перемещения;
10. Опорное приспособление клавиатуры, позволяющее регулировать наклон в горизонтальной плоскости в пределах 5-15 град;
11. Высота среднего ряда клавиш не более 30мм;
12. Выделение групп клавиш цветом, размером, формой;
13. Минимальный размер клавиш 13 мм, а оптимальный 15 мм;
14. Расстояние между клавишами не менее 3 мм;
15. Одинаковый ход клавиш с сопротивлением 0,25Н-1,5Н;
16. Звуковая обратная связь;
17. Яркость бликов монитора не должна превышать 40 кд/кв.м

Неиспользуемое рентгеновское излучение, а также излучения в ультрафиолетовом, инфракрасном и радиочастотном диапазонах должны соответствовать гигиеническим нормам (ГОСТ 12.2.003-74, ГОСТ 12.3.002-75, ГОСТ 12.1.006- 84).

Для защиты глаз от экранного излучения рекомендуется использовать защитные экранные сетки. Видеомонитор должен быть оборудован поворотной площадкой, позволяющей перемещать дисплей в горизонтальной и вертикальной плоскостях в пределах 130\*200 мм и изменять угол наклона на 10\*15°. Клавиатура не должна быть жестко связана с монитором.

*5.7. Электробезопасность*

Питание лабораторного электрооборудования должно осуществляться от сети не более 380 В при частоте 50 Гц. Сопротивление изоляции токоведущих частей электроустановок до первого автомата максимальной токовой защиты должно быть не менее 0,5 МОм.

Для обеспечения безопасности обслуживающего персонала и нормальной работы ЭВМ в электрических установках 380/220 В предусматривается защитное заземление. Защитному заземлению подлежат металлические конструкции, которые могут оказаться под напряжением. В качестве сети заземления внутри зданий используются стальные трубы, электропроводка, нулевые провода силовой и осветительной сети.

*5.8. Пожарная безопасность*

Помещение для проведения лабораторных работ по пожарной опасности относится к категории Д, и должно удовлетворять требованиям по предотвращению и тушению пожара по ГОСТ 12.1.004-85. Обязательно наличие телефонной связи и пожарной сигнализации.

Материалы, применяемые для ограждающих конструкций и отделки рабочих помещений, должны быть огнестойкими. Для предотвращения возгорания в зоне расположения ЭВМ обычных горючих материалов (бумага) и электрооборудования, необходимо принять следующие меры:

1. в лаборатории должны быть размещены углекислотные огнетушители типа ОУ-2, ОУ-5, ОУ-8;
2. в качестве вспомогательного средства тушения пожара могут использоваться гидрант или устройства с гибкими шлангами;
3. в некоторых случаях, если этого требуют местные строительные инструкции, в помещениях лаборатории устанавливается спринклерная система;
4. для непрерывного контроля помещения лаборатории и зоны хранения носителей информации необходима система обнаружения пожаров. Для этого можно использовать комбинированные извещатели типа КИ-1.

Система должна быть сконструирована так, чтобы обеспечить отключение систем питания и кондиционирования воздуха. В сочетании с системой обнаружения следует использовать систему звуковой сигнализации.

Меры пожарной безопасности определены в ГОСТ 12.1.004-85.

Студенты допускаются к выполнению работ только после прохождения инструктажа по безопасности труда и пожарной безопасности в лаборатории в целом и на каждом рабочем месте.

*5.9. Предполагаемые меры защиты*

В связи с тем, что основным источником вредных воздействий является монитор видеотерминального устройства, основное внимание должно быть уделено ему.

Исходя из этого можно выделить два основных направления:

1. Использование монитора удовлетворяющего санитарным нормам.
2. Оснащение монитора защитным фильтром.

При покупке монитора необходимо отдавать предпочтение мониторам, соответствующим международному стандарту MPR-II. Так-же следует обращать внимание на маркировку монитора NI (без чередования строк) и LR (низкая радиация), такие мониторы наименее опасны для здоровья и не требуют защитного фильтра.

*6. Экология и охрана окружающей среды.*

В настоящее время очень важными являются исследования, которые прямым или косвенным образом могут повлиять на экологиче­скую обстановку, позволят улучшить технологические параметры прибо­ров и механизмов, в производственном процессе изготовления которых используются вредные химические вещества и материалы.

В данной дипломной работе были проведены исследования погрешностей волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) и предложен ряд схемо­технических методов улучшения их точностных и технологических харак­теристик. В настоящее время эти оптико-электронные приборы находят широкое применение в различных областях благодаря их потенциальным возможностям использования в качестве чувствительных элементов вращения в инерциальных системах навигации, управления и стабилиза­ции.

Применение в авиации и космонавтике более качественных и точных приборов несомненно благоприятно отразится на экологической обстановке окружающей среды. С созданием автоматизированных систем посадки и управления летательными аппаратами нового поколения сни­зиться процент аварий вызванных сбоями в аппаратуре старого образца. В частности, волоконно-оптические гироскопы могут полностью вытеснить сложные и дорогостоящие электромеханические (роторные) гироскопы и трёхосные гиростабилизированные платформы, которые помимо вред­ного воздействия на окружающую среду ( использование смазочных материалов подвижных частей, высокие электромагнитные поля, вредное производство) имеют гораздо низкий срок службы, а следовательно более высокие требования к их утилизации.

Использование новейших технических разработок позволит зна­чительно повысить качество выпускаемых приборов и тем самым снизить требования по экологическому контролю за производством и эксплуата­цией устройств, обладающих свойствами уникальными по сравнению с используемыми ранее.

Малые габариты и масса конструкций приборов, анализируемых в дипломной работе позволят заметно снизить нагрузку на механическую часть летательных аппаратов, что даст возможность использовать освободившиеся ресурсы для аппаратуры экологического мониторинга.

Вопросы, рассмотренные в главе 2 позволяют сделать вывод о невысокой стоимости производства и конструирования гироскопов при массовом изготовлении, относительной простоте и пониженной вредности технологии. Важное значение имеет низкое потребление энергии при использовании волоконно-оптических устройств и полупроводниковых приборов, входящих в состав ВОГ, так как получение дополнительной энергии на борту всегда связано с использованием генераторных устройств, обладающих низкими экологическими характеристиками. Применение горюче-смазочных материалов повышает вероятность возникновения аварийных пожарных ситуаций и как следствие этого экологических катастроф.

Использование ВОГ заметно снижает требования предъявляемые к утилизации отработавших свой срок механизмов, так как при производстве этих приборов используется значительно меньшее количество вредных веществ и материалов. Продолжительный срок работы и высокие ремонтные качества ВОГ также могут благоприятно сказаться на их использовании, так как использование ненадёжных механических приборов негативно влияет на экологическую обстановку.

Сделанные в работе выводы позволят продолжить исследования в области повышения как технических, так и производственно-эксплуатационных характеристик приборов что несомненно благоприятно скажется на увеличении срока службы, снижении стоимости и улучшении экологической обстановки, связанной с их работой.

*Заключение*

В ходе выполнения дипломной работы проведен анализ работы ВОГ, обобщенной модели шумов и нестабильностей произведена оценка предельной (потенциальной) чувствительности прибора. На основе свойства взаимности рассмотрена минимальная конфигурация ВОГ. Оценено современное состояние элементной базы. При этом значительное внимание уделено свойствам волоконных световодов и проведен анализ возможных неоднородностей и потерь для различных типов волокон. Рассмотрены основные элементы ВОГ: волоконный контур, излучатели и фотодетекторы, а также предложены способы компенсации шумов и нестабильностей ВОГ .

Отражены технико-экономические аспекты работы, вопросы безопасности жизнедеятельности при проведении исследований, а также проблемы экологической безопасности при использовании прибора.

На основании анализа проведенного в дипломной работе можно выделить два направления совершенствования ВОГ. Первое направление связано с улучшением параметров и характеристик существующих элементов BOГ и с созданием новых элементов, т. е. с развитием и освоением новой технологии изготовления элементов. Второе направление состоит в разработке методов и устройств исключения или компенсации различного рода шумов инестабильностей прибора, в разработке новых схемотехнических вариантов ВОГ, что в конечном счете приведет к увеличению точности измерения угловой скорости. Оба направления тесно взаимосвязаны.

Совершенствование элементов ВОГ во многом, по-видимому, должно зависеть от перехода в диапазон 1,2.. ...1,3 мкм. Этот переход потребует создания и массового производства одномодового волокна и волокна, сохраняющего поляризацию, с малыми потерями (около 0,1 дБ/км).

Проектирование датчиков может быть сущест­венно упрощено, если вместо обычного одномодового во­локна будет использовано волокно, сохраняющее поляри­зацию. Однако такое волокно с требуемой эффективно­стью еще пока находится в экспериментальной стадии; тре­буется дальнейшее улучшение его качества и уменьшение стоимости. Задача промышленности состоит в создании волокна, сохраняющего поляризацию, с малыми потерями и стоимостью не намного более обычного одномодового волокна.

Переход в длинноволновый диапазон, давая выигрыш в потерях, потребует увеличения физической длины контура с тем, чтобы сохранить требуемую чувствительность. Одним из преимуществ перехода к длинным волнам яв­ляется увеличение сердечника волокна, что облегчает со­единение излучателя с волокном, волокна с волокном, волокна с интегрально-оптическими схемами. Кроме этого, может встать проблема выбора излучателей и фотоприемников длинноволнового диапазона. Фотоприемники диапазона 1,2... 1,6 мкм, главным образом на основе InGaAsP, менее чувствительны, чем кремниевые фотоприемники диапазона 0,85 мкм. Длинноволновые диоды много дороже, чем диоды на 0,85 мкм. Таким образом, компоненты длинноволнового диапазона следует использовать в датчиках скорости вращения высокой эффективности (точности).

При выборе излучателя для датчика скорости вращения наряду с длиной волны важным является также ширина спектра излучения.

Одной из характерных особенностей излучателей ВОГ является та, что излучатель должен инжектировать в одномодовый волоконный световод достаточную оптическую мощность, примерно около 100 или более микроватт.

Это условие наталкивается на необходимость надлежащей фокусировки света от большинства лазеров, генерирующих преимущественно на одной поперечной моде. Излучение полупроводникового диодного лазера генерирующего на одной поперечной моде, нелегко ввести в световод, поскольку излучение имеет эллиптическое поперечное распределение с аберрациями. Если волокно соединяется встык с выходной гранью лазера, то коэффициент связи составляет от 10 до 20%; с помощью линз коэффициент связи можно увеличить до 50%. Для суперлюминесцентных диодов коэффициент связи несколько меньше.

Другое ограничение, налагаемое на источник излучения в ВОГ, определяется шумом обратного рэлеевского рассеяния света в волокне. Этот шум в основном может быт уменьшен за счет уменьшения длины когерентности излучения светового источника. Для получения хорошей точности ВОГ длина когерентности излучения должна составлять около 1 см. Некоторые диодные источники имеют длину когерентности менее 1 мм, и поэтом без всяких модификаций могут применяться в ВОГ.

Учитывая сказанное предпочтительно использование суперлюминесцентных диодов.

Отсутствие достаточного количества выпускаемых промышленностью соединителей одномодового волокна является серьезной помехой развитии интерферометрических датчиков.

Оптические соединители для волокна, сохраняющего поляризацию еще находятся в стадии разработки.

Для сборки соединителей и сборки других волоконных компонент в подсистемы волоконных датчиков эффективно ши­роко использование технологического процесса сращивания концов волокна плавлением.

В зависимости от конструктивных особенностей ВОГ, изготовление последнего может потребовать следующих элементов: пространственных и поляризационных фильтров, вращателей поляризации или «выравнивателей» поляризации, фазосдвигающих ячеек (ячеек смещения), частотных и фазовых модуляторов, переключателей и других элементов. Применение волокна, сохраняющею поляризацию, способствует значительным упрощениям. Применение интегрально-оптических схем также может содействовать решению проблемы элементной базы.

Кроме упомянутых в дипломной работе дестабилизирующих факторов, действующих на ВОГ, необходимо изучение еще ряда источников ошибок прибора, вносящих, однако, меньший вклад в суммарную погрешность ВОГ. К ним относятся рассеяние Ми, рассеяние Бриллюэна, спонтанные шумы, дробовые и тепловые шумы, амплитудные шумы источника излучения и др.

Изучение физической природы этих шумов и нестабильностей позволит разработать устройства, компенсирующие их влияние на точность прибора.

Проводимые работы по созданию ВОГ должны носить исследовательский и конструкторский характер:

а) изучаться источники погрешностей и нестабильностей в ВОГ;

б) анализироваться схемотехнические решения и экспериментально проверяться конструкторские варианты ВОГ, позволяющие добиться требуемой точности;

в) продолжать поиск материалов и элементов, позволяющих реализовать оптимальную структуру ВОГ.

Можно предположить, что результаты анализа проведенного в данной дипломной работе послужат материалом для дальнейшей исследовательской и конструкторской работы, направленной на улучшение характеристик волоконно-оптических гироскопов.

*Литература*

1. Шереметьев А.Г. Волоконно-оптический гироскоп. -М.:

Радио и связь, 1987.

1. Ионов А.Д. Статистически нерегулярные оптические и электрические кабели связи. -Томск: Радио и связь, 1990.
2. Гроднев И.И. Волоконно-оптические линии связи. -М.:

Радио и связь, 1990.

1. Чео П.К. Волоконная оптика. -М: Энергоатомиздат,1988.
2. Свечников Г.С. Элементы интегральной оптики. -М.:

Радио и связь, 1987.

1. Федоров Б.Ф. Оптический квантовый гироскоп. -М: Машиностроение, 1973.
2. Методические указания к технико-экономическому обоснованию дипломных проектов по специальностям «электронно-медицинская аппаратура» и «конструирование и производство радиоаппаратуры». -Л.: ЛЭТИ,1985.
3. Безопасность жизнедеятельности. Методические указания по дипломному проектированию. -СПб.:ЛЭТИ,1996.

Дипломная работа посвящена анализу погрешностей волоконно-оптического гироскопа и является попыткой последовательного рассмотрения принципов построения ВОГ исходя из минимизации влияния элементов на его точностные характеристики. В работе рассмотрены основные принципы волоконно-оптической гироскопии, дана характеристика основных элементов ВОГ различных типов и предложены методы компенсации некоторых погрешностей, обусловленных различными факторами.

Возможность создания реального высокочувствительного ВОГ появилась лишь с промышленной разработкой одномодового диэлектрического световода с малым затуханием. Конструирование ВОГ на таких световодах определяет уникальные свойства прибора:

1. потенциально высокая чувствительность (0.01 град/сек и менее);
2. малые габариты и масса конструкции, благодаря возможности создания ВОГ на интегрально-оптических схемах;
3. невысокая стоимость производства и относительная простота технологии по сравнению с роторными гироскопами;
4. низкое потребление энергии;
5. большой динамический диапазон измеряемых угловых скоростей;
6. отсутствие вращающихся механических элементов (роторов) и подшипников, что повышает надежность;
7. практически мгновенная готовность работы (не затрачивается время на раскрутку ротора);
8. низкая чувствительность к линейным ускорениям;
9. высокая помехоустойчивость;

Принцип действия ВОГ основан на вихревом эффекте Саньяка, открытым в 1913 году. Если в замкнутом оптическом контуре в противоположных направлениях распространяются два световых луча, то при неподвижном контуре фазовые набеги обоих лучей, прошедших весь контур, будут одинаковыми. При вращении контура вокруг оси, нормальной к плоскости контура, фазовые набеги лучей неодинаковы, а разность фаз лучей пропорциональна угловой скорости вращения контура. Для объяснения вихревого эффекта Саньяка разработаны три теории: кинематическая, доплеровская и релятивистская. В дипломной работе рассмотрены первые две.

В рамках кинематической теории рассмотрен плоский замкнутый оптический контур произвольной формы, в котором распространяются в противоположных направлениях две световые волны. Плоскость контура перпендикулярна оси вращения. Приняв участок пути светового луча бесконечно малым и выразив линейную скорость точки через ее радиус-вектор получим выражение для времени обхода участка контура двумя противоположными лучами.

При вращении контура с некоторой угловой скоростью кажущаяся длина участка для двух волн оказывается различной. Считая скорость света инвариантной величиной связываем удлинение и сокращение путей с удлинением и сокращением отрезков времени и получаем выражение для относительного запаздывания, которое можно выразить через разность фаз встречных волн. Суммирование по всей длине контура определяет итоговую разность фаз.

Рассмотрение идеального кольцевого оптического контура с системой из двух зеркал позволяет получить тот же результат для разности времен распространения встречных лучей.

Явление изменения частоты колебания, излученного передатчиком и принимаемого приемником, наблюдающееся при взаимном относительном перемещении излучателя и приемника позволяет рассмотреть эффект Саньяка в рамках доплеровской теории.

Относительный фазовый сдвиг в данном случае определяется разностью частот волн, претерпевших доплеровский сдвиг и также выражается через угловую скорость вращения контура.

На основе рассмотренного эффекта можно построить принципиальную схему простейшего ВОГ. Излучение от источника попадает на светоделитель, где разделяется на две равные части, которые пройдя замкнутый контур, состоящий из многовитковой катушки волокна попадают на фотодетектор. Выделенная фаза Саньяка преобразуется устройством обработки в угловую скорость вращения и при необходимости интегрируется с целью определения угла поворота системы.

Интенсивность излучения на фотодетекторе пропорциональна косинусу разности фаз встречных волн, что определяет низкую чувствительность прибора к малым угловым скоростям.

Для максимизации чувствительности к малым изменениям информативного параметра в волоконный контур необходимо поместить простой фазовый модулятор, дающий невзаимный фазовый сдвиг π/2 между двумя противоположно бегущими лучами. Тогда интенсивность на фотодетекторе при малых угловых скоростях изменяется почти линейно.

Так как показания прибора полностью определяются разностью фаз встречно бегущих волн все ошибки ВОГ связаны с невзаимностью условий их распространения.

Основными факторами, влияющими на условия распространения встречно бегущих волн являются:

1. флуктуации интенсивности и частоты источника излучения;
2. изменение характеристик светоделителя;
3. обратное рассеяние от лучей движущихся в разных направлениях;
4. электрооптические эффекты в волокне;
5. магнитооптические эффекты в волокне;
6. тепловые градиенты;
7. поляризационные эффекты;
8. тепловые шумы нагрузочных элементов выходного тракта;
9. дробовые шумы фотодетектора.

В работе проведена оценка предела чувствительности (точности) ВОГ , определяемая уровнем фотонных шумов и зависящая от интенсивности оптического излучения падающего на фотодетектор. Полученные теоретические выражения для ошибки обусловленной дробовыми шумами позволяют сделать вывод о необходимости увеличения длины контура и уменьшения полосы пропускания НЧ-фильтра выходного каскада. (график)

Использование высококогерентных лазерных источников позволяет снизить уровень дробовых шумов, однако когерентная составляющая обратного (рэлеевского) рассеяния в волокне приводит к возникновению ошибки в разности фаз между двумя лучами. Исходя из этого предпочтительно использование источника с длиной когерентности много меньшей, чем длина волоконного контура. В этом случае шум связанный с отражением на конце волокна, суммируется некогерентно с полезным сигналом.

Использование дополнительной модуляции сигналов также позволяет «декогерировать» шум обратного рассеяния.

Во второй главе рассмотрены вопросы влияния элементов ВОГ на точностные характеристики системы.

Анализ характеристик источников излучения позволяет сделать вывод о предпочтительности использования суперлюминесцентных диодов, являющихся низко когерентными и позволяющими компенсировать влияние эффекта Керра и обратного рассеяния. Также они обладают меньшей температурной зависимостью, проще в конструктивном исполнении и являются очень надежными.

Большое внимание уделено характеристикам волоконного контура, так как именно контур является основным источником погрешностей в ВОГ. Рассмотрение количественных значений потерь в волокне является недостаточным для анализа точности ВОГ. Интерес представляет оценка статистических характеристик параметров контура. В работе рассмотрены дисперсионные свойства волокон с различными профилями показателя преломления, проведена качественная оценка зависимостей дисперсии профиля от корреляционных свойств для различных типов неоднородностей в волокне. (графики)

Полученные соотношения позволяют по известным параметрам неоднородностей косвенно определить как вносимые потери так и характер невзаимностей для различных участков волокна.

Наибольшее влияние на характеристики ВОГ могут оказывать изменение радиуса сердцевины и случайные изгибы волокна приводящие к увеличению дисперсии профилей и уширению импульсов.

Важным источником шумов в ВОГ является также фотоприемник. Фоновая засветка, дробовый шум темнового тока, квантовый шум внутреннего фотоэффекта, избыточный шум внутреннего усиления, тепловой шум усилителя и модуляционный шум преобразователя оказывают непосредственное влияние на точность ВОГ.

Качественная оценка эквивалентной мощности шума фотоприемника для различных значений полосы пропускания системы позволяет сделать вывод о необходимости использования лавинных фотодиодов обладающих минимальным уровнем шума и позволяющих значительно увеличить отношение сигнал/шум при низких уровнях сигнала.

Анализ прямых динамических эффектов позволил качественно оценить термически индуцированную невзаимность фазы Саньяка для различных значений длины контура и сделать вывод о необходимости высокой термостабилизации прибора.

Необходимость поляризационной стабильности обусловлена влиянием магнитного поля на разность фаз колебаний. (график)

Использование волокна с устойчивой поляризацией снизит требования к поляризационным устройствам и обеспечит высокую точность прибора.

В качестве компенсации погрешностей предложены два схемотехнических метода и рассмотрены варианты использования некоторых элементов ВОГ. Проведена качественная оценка выигрыша в чувствительности прибора.

Паразитная поляризационная модуляция, сопровождающая работу волоконных фазовых модуляторов, является серьезным фактором, ограничивающим точностные характеристики ВОГ. Одним из путей уменьшения паразитной поляризационной модуляции может быть изготовление фазового модулятора в виде двух номинально идентичных половин, между которыми устанавливается модовый конвертор, преобразующий поляризационные моды друг в друга. При этом дифференциальная фазовая модуляция поляризационных мод, возникшая в первой половине фазового модулятора, компенсируется дифференциальной фазовой модуляцией противоположного знака, имеющей место во второй половине модулятора. Поскольку трудно добиться полной идентичности половин фазового модулятора необходимо спроектировать фазовый модулятор, таким образом, чтобы после конверсии поляризационных мод излучение снова проходило в прямом или обратном направлении по тому же оптическому пути что и до нее. Этого можно достичь используя фазовый модулятор отражательного типа.

Одним из путей повышения точности ВОГ может быть использование в них суперфлуоресцентных источников излучения. Такие источники близки по свойствам к тепловым, но характеризуются высоким уровнем избыточного шума. Для подавления избыточного шума можно использовать балансное детектирование. В качестве опорного сигнала использовать излучение источника, задержанное на время прохождения света по оптическому тракту ВОГ.

Для обеспечения когерентного взаимодействия информативного и опорного сигнала можно использовать в качестве ответвителя направленный ответвитель 3x3. Излучение от источника поступает через направленный ответвитель на входы чувствительного контура, а затем на фотодетекторы, выходы которых подключены к дифференциальному усилителю. Каждая из встречных волн является и информативной (сигнальной) и одновременно - опорной для другой волны. На выходе дифференциального усилителя избыточный шум, обусловленный фоновой засветкой оказывается скомпенсированным.

Основным механизмом потерь в волокне является обратное рэлеевское рассеяние. Каждая первичная волна, противоположно распространяющаяся в волоконном контуре, возбуждает маломасштабные неоднородности в волокне, которые в свою очередь действуют как индуцированные дипольные излучатели. Световод захватывает часть рассеянного излучения и канализирует его в обратном направлении. Вклады от каждого элементарного рассеивателя суммируются векторно со случайной фазой и образуют полное рассеянное поле в каждом направлении. На выходе контура появляется составляющая фазового сдвига отличная от фазы Саньяка, что приводит к ошибке в измерении скорости.

Способы минимизации ошибки ВОГ, обусловленной обратным рэлеевским рассеянием могут быть связаны с уменьшением взаимной когерентности между первичной и вторичной (рассеянной) волной. Частотная модуляция первичного сигнала, уменьшая когерентность не вносит дополнительной невзаимности в контур. Изменения частоты лазерного излучения также могут быть источником рандомизации фазы. Уменьшение когерентности можно также реализовать с помощью дополнительной фазовой модуляции первичной волны.

Уменьшить ошибку можно используя способ усреднения в течении постоянной интегрирования системы обработки.

Оптический нелинейный эффект Керра проявляется в виде возмущения коэффициента преломления среды при изменении интенсивности воздействующего на среду электрического поля. Если мощности оптических лучей, распространяющихся в противоположных направлениях неодинаковы, а следовательно неодинаковы и постоянные распространения, то это приводит к фазовой невзаимности контура и в результате к ошибке измерения угловой скорости.

Компенсации этого эффекта можно достичь прямоугольной модуляцией источника излучения или выбором источника с соответствующими спектральными характеристиками.

оптической гироскопии

*A*

*B*

*M*

*C*

*r*

*α*



*dϕ*

*О*

*1*

*Ω*

*2*

*Контур*

Эффект Саньяка в кольцевом оптическом контуре

Контур

B

Rk

З1

З2

A

Ω

Принципы Волоконно

*Устройство обработки*

*Фото-*

*детектор*

*Источник*

*излучения*

*Ω*

*R*

*Ω*

*90°*

*ФМ*

*0°*



Доплеровская теория.

1.



2. 3.



Кинематическая теория.

1. 2. 3.



4. 5.



6.



7.



Зависимость коэффициента затухания от радиуса корреляции нерегулярностей

функции профиля показателя сердцевины :

1 - для ступенчатого профиля; 2 - для гауссова профиля.

(n1=1.5; Δ=0.01;λ=1.3 мкм; V=2.4;a=2.3 мкм)

l,мкм

100

10

1

105

104

103

102

1

2

α/DΔS , дБ/км мкм2

Основные этапы фотоэлектрического преобразования при детектировании оптического сигнала.

*Входной оптический сигнал*



*Фотоэлектрическое поглощение-генерация электронно-дырочных пар*

*Внутреннее усиление*



*Выходной фототок*

*фотоприёмника*

*Формирование выходного сигнала фотоэлектронного преобразователя*

*Выходной электрический сигнал*

iф =n⋅q

<G>

p

p,n

p,n

n,p

n,p

n

Uф

Iф

*Фоновая засветка*

*(помеха)*

*Дробовый шум*

*темнового тока*

*Квантовый шум внутреннего фотоэффекта*

*Избыточный шум внутреннего усиления*

*Тепловой и дробовый шумы усилителя*

*Модуляционный и пороговый шумы преобразователя*

Фаза Саньяка в угловой скорости вращения для

различных значений параметра L R .

*Ω (рад/сек)*

*1*

*10-2*

*10-6*

*10-4*

*10-8*

*1*

*102*

*Δϕс(рад)*

*LR (м2)*

*104*

*10-2*

*103*

*102*

*101*

*100*

*10-4*

*10-6*

*10-8*

Структуры одномодовых световодов с устойчивой поляризацией:

а - волокно с эллиптическим сердечником;

б - волокно с боковым ячеечным распределением показателя преломления;

в - волокно с эллиптической внешней оболочкой;

г - волокно с боковым ячеечным напряжением.

n1

n2

n1

n0

n0

n1

n2

б)

а)

n3

г)

в)

n1

n2

n0

n0

*Возмущение поля в точке Р источником с*

*плотностью тока J в точке Q*

P

n2

r

χ

r/

z

Q

J(r/)

n(x,y)

O

*Сферические полярные координаты точек Р и Q*

x

ϕ = ϕ/ = 0

P(S,θ,ϕ)

S

Q(S/,θ/,ϕ/)

ϕ,ϕ/

S/

θ

θ/

z

y

*Световод со случайными колебаниями радиуса сердцевины*

n1

z

**Jx**

n2

l

O

*Дисперсия изменения гауссова профиля при*

*изменении радиуса сердцевины волокна*

Dξ4

Dξ1

Dξ4

Dξ2

a = 0

r



*Дисперсия изменения гауссова профиля при*

*случайных изгибах оси волокна*

Dξ4

Dξ1

Dξ4

Dξ2

D=f(a,Df)

a = 0

r



*Дисперсия изменения гауссова профиля при*

*эллиптичности волокна*

Dξ1

Dξ4

Dξ2

Dξ4

a = 0

r

D=f(a,Df)



*Дисперсия уширения импульса при*

*изменении радиуса сердцевины волокна*

r

a = 0

Dξ1

Dξ2

Dξ4

Dξ4



*Минимально обнаруживаемая угловая скорость вращения*

*в функции от параметра волоконного контура*

P01

P02

P03

P04

LD,m2



*Схема волоконно-оптического гироскопа*

*с ответвителем типа 3×3.*

7

2

I2

E2

4

5

3

6

I1

Iout

8

E1

L

S

1

1,2-фотодетекторы; 3-источник излучения; 4-направленный

ответвитель 3x3; 5-волоконный контур; 6-дифференциальный усилитель;

7,8 -дополнительные устройства (ФМ, поляризатор)

*Вариант включения отражательного фазового модулятора*

*в схему волоконно-оптического гироскопа.*

7′

1

6

5

3

7

6′

4

5′

3′

2

1,4 -направленные ответвители; 2-волоконный контур; 3,3`-отражательные

фазовые модуляторы; 5,5`-модулирующие отрезки волокна;

6,6`-ячейки Фарадея с углом вращения 45°; 7,7`-зеркала.

*Минимальная конфигурация ВОГ*

*Поляризационное устройство*

*Модулятор*

*Пространствен-ный фильтр*

*М*

*Модулятор*

*Поляризатор*

*П*

*У*

*М*

*М*

*ИИ*

*P2*

*P1*

*Источник*

*Волоконный контур*

*Обобщенная модель погрешностей ВОГ*

*Акустические поля и механические вибрации, ускорения*

ФД

ИИ

*Дробовые шумы*

*Мультипликативные шумы (ЛФД)*

*Тепловые шумы*

*нагрузочного*

*сопротивления*

*Флуктуации интенсивности*

*Флуктуации частоты*

*Обратное рассеяние от луча, бегущего по часовой стрелке (когерентное,*

*некоге­рентное)*

*Изменение характеристик*

*светоделителя*

*(ответвителя)*

*Тепловые градиенты*

*Поляризационная связь*

*Обратное рассеяние от луча, бегущего против часовой стрелки*

*(когерентное, некогерентное)*

*Магнитооптический эффект (Фарадея)*

*Электрооптический эффект (Керра)*

L=A⋅exp(i⋅ϕ)⋅exp(-i⋅ϕ0) S=A⋅exp(i⋅ϕ)⋅exp(i⋅ϕ0)

на фотодетекторах:

E1 = S+exp(i⋅ϕ1⋅L) E2 = L+exp(i⋅ϕ1⋅S)

I1 = |S|2+|L|2+exp(i⋅ϕ1)⋅L⋅S\*+exp(-i⋅ϕ1)⋅S⋅L\*+n1

I2 = |S|2+|L|2+exp(i⋅ϕ1)⋅S⋅L\*+exp(-i⋅ϕ1)⋅L⋅S\*+n2

Iout = 2|A|2⋅sin(ϕ1)⋅sin(2⋅ϕ0)+n1-n2



M1(t) = N’(t)⋅K1⋅N(t) = [detN(t)]⋅K1

detN(t) = n11⋅n22 - n12⋅n21

*Эквивалентная мощность шума фотоприемника*

*в функции от шумового тока для различных*

*значений полосы пропускания системы*



*Термически индуцированная невзаимность фазы Саньяка*

*в функции от ΔТ для различных значений длины контура*



*Разность фаз, обусловленная влиянием магнитного поля*

*в функции от угла поворота плоскости поляризации на*

*данном участке контура при различных значениях*

*напряженности поля*



*Изменение интенсивности суммарного излучения*

*в зависимости от фазы Саньяка, обусловленной вращением*

