

Лекция № 5

Тема 1.1. Свойства 2-х,3-х степенных и лазерных гироскопов. Датчики угловых скоростей

Основы теории лазерных гироскопов

15. Эффект Саньяка
16. Статическая характеристика интерферометра и лазерного датчика угловой скорости
17. Конструкция лазерного датчика угловой скорости
18. Погрешности лазерного датчика угловой скорости и методы их устранения



До недавнего времени в системах навигации в основном применялись механические гироскопы, работающие на основе эффекта удержания оси вращения тела в одном направлении инерциального пространства.

Механические гироскопы - дорогостоящие приборы, поскольку для их корректной работы требуется высокая точность формы тела вращения и минимально-возможное трение подшипников.

В настоящее время, одним из наиболее перспективных классов гироскопов считается класс **оптических гироскопов**.

Основные достоинства таких гироскопов:

- отсутствие подвижных частей;
- простота конструкции;
- короткое время запуска;
- высокая чувствительность;
- высокая линейность характеристик;
- низкая потребляемая мощность;
- высокая надежность.

Принцип действия большинства оптических гироскопов основан на эффекте Саньяка.

15. Эффект Саньяка



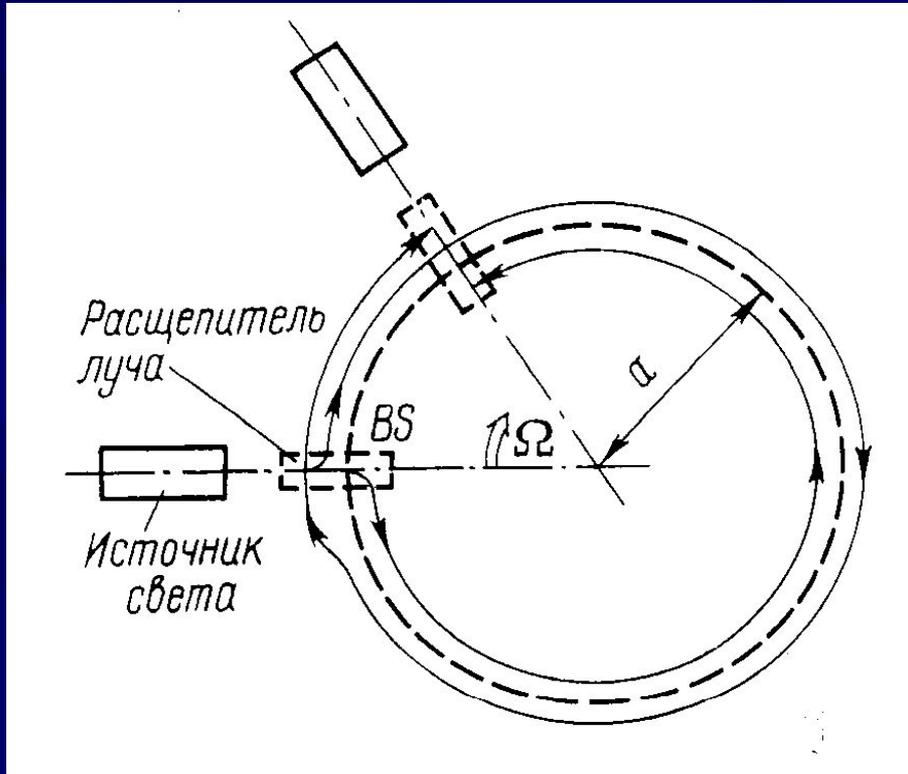
Эффект Саньяка — появление фазового сдвига - смещения интерференционных полос встречных электромагнитных волн во вращающемся кольцевом интерферометре. Это смещение возникает вследствие зависимости времени обхода светом вращающегося контура от скорости вращения и направления обхода.

Эффект проявляется и при кольцевом распространении волн неэлектромагнитной природы.

Эффект был описан Жоржем в 1913 г.

Величина эффекта прямо пропорциональна угловой скорости вращения интерферометра, частоте излучения и площади, охватываемой путём распространения световых волн в интерферометре.

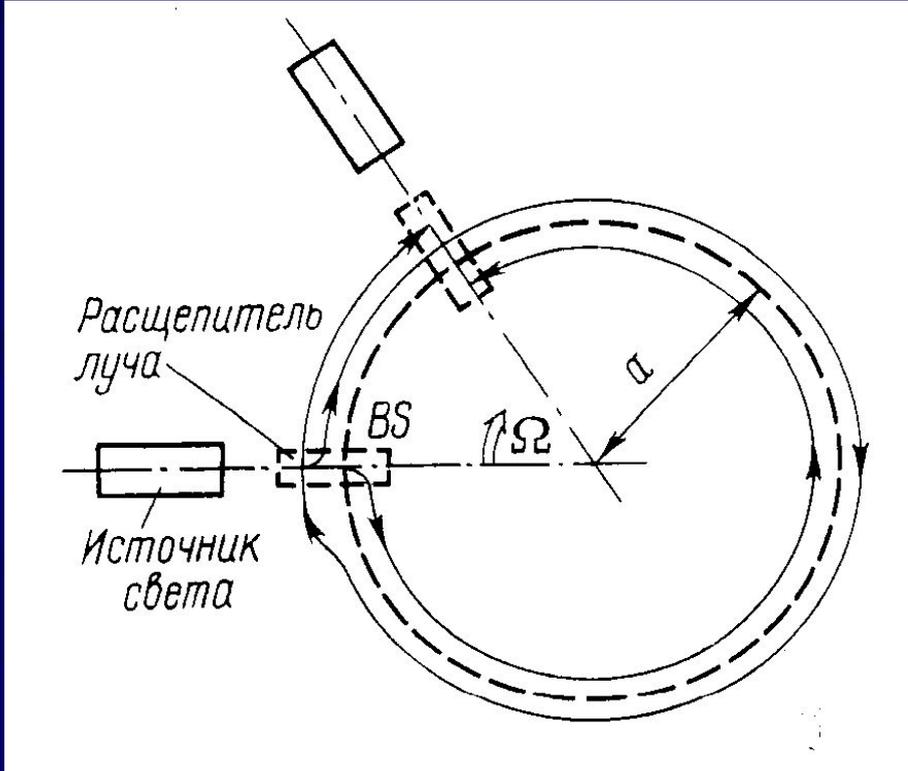
15. Эффект Саньяка



По круговому оптическому пути благодаря расщепителю луча свет распространяется в двух противоположных направлениях. Если при этом система находится в покое относительно инерциального пространства, оба световых луча распространяются встречно по оптическому пути одинаковой длины. Поэтому при сложении лучей в расщепителе по завершении пути нет фазового сдвига.

Однако, когда оптическая система вращается в инерциальном пространстве с угловой скоростью Ω , между световыми волнами возникает разность фаз. Это явление и называется эффектом Саньяка.

15. Эффект Саньяка



При радиусе оптического пути a время достижения расщепителя лучей светом, движущимся по часовой стрелке

$$t_r = (2\pi a + a\Omega t_r) / c,$$

в противоположном направлении

$$t_l = (2\pi a - a\Omega t_l) / c,$$

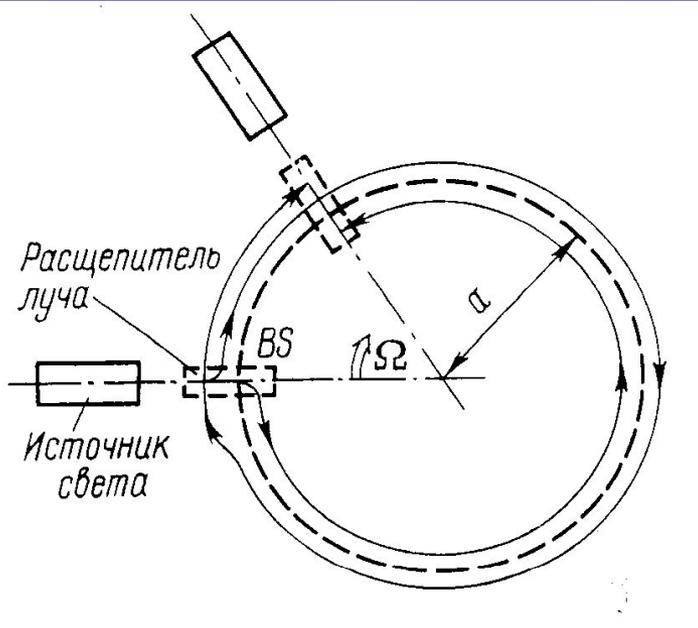
Разность времени распространения двух световых волн с учетом $c \gg a\Omega$

$$\Delta t = t_r - t_l = \frac{4\pi a^2}{c^2} \Omega = \frac{4S}{c^2} \Omega. \quad (1)$$

Это означает, что появляется разность длины оптических путей

$$\Delta L = \frac{4S}{c} \Omega$$

15. Эффект Саньяка



Если относительное запаздывание встречных волн (1) возникающее при вращении, выразить через разность фаз встречных волн, то она составит

$$\Delta\varphi_c = \omega \cdot \Delta\tau = \frac{4 \cdot \omega \cdot S}{c^2} \cdot \Omega = \frac{8 \cdot \pi \cdot \nu \cdot S}{c^2} \cdot \Omega = \frac{8 \cdot \pi \cdot S}{\lambda \cdot c} \cdot \Omega$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu \quad \lambda = c / \nu$$

где ν - частота, λ - длина волны

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

$$\Delta\varphi_c = \frac{4 \cdot \pi \cdot R \cdot L}{\lambda_c} \cdot \Omega = \frac{8 \cdot \pi \cdot N \cdot S_v}{\lambda_c} \cdot \Omega$$

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

16. Конструкция лазерного датчика угловой скорости

Оптическая гироскопия на эффекте Саньяка реализуется в двух вариантах:

- активный вариант — кольцевой лазер, где вращение приводит к появлению разности частот генерации встречных волн;
- пассивный вариант- волоконный кольцевой интерферометр, где вращение приводит к разности фаз встречных волн.

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.

Типы оптических гироскопов

В зависимости от конструкции замкнутого оптического контура различают два типа оптических гироскопов



Кольцевой лазерный гироскоп

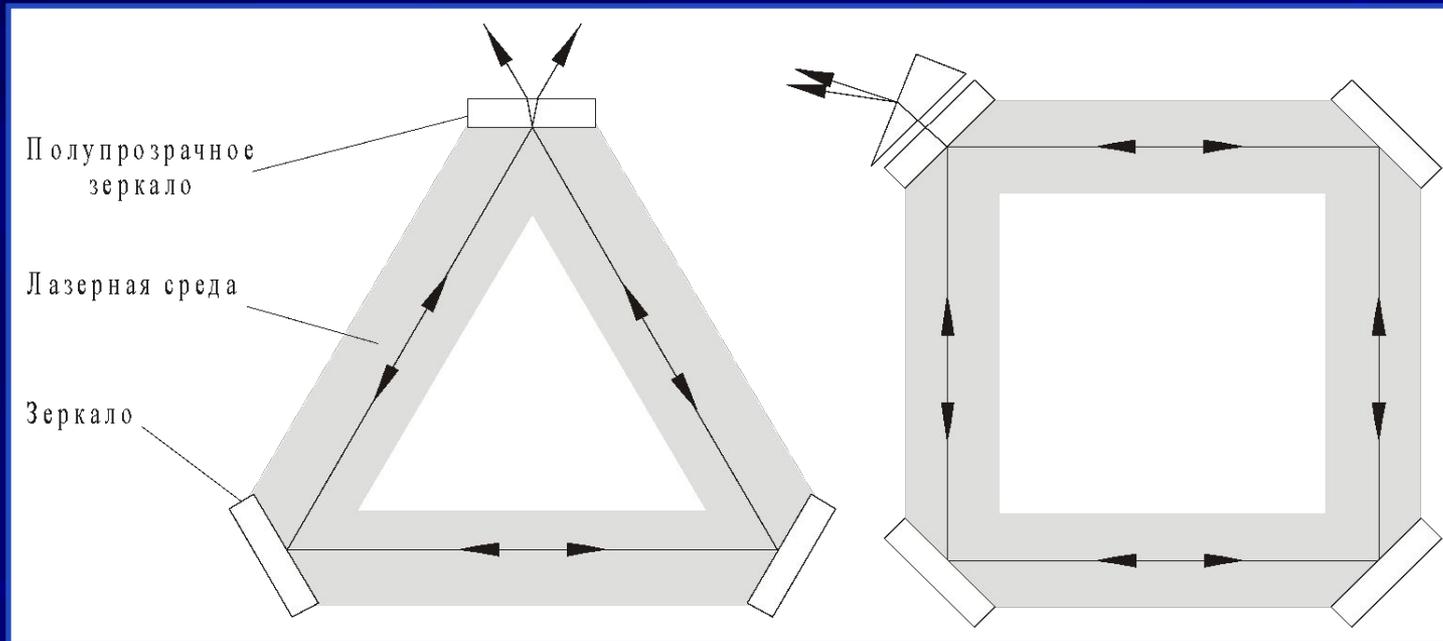


Волоконно-оптический гироскоп



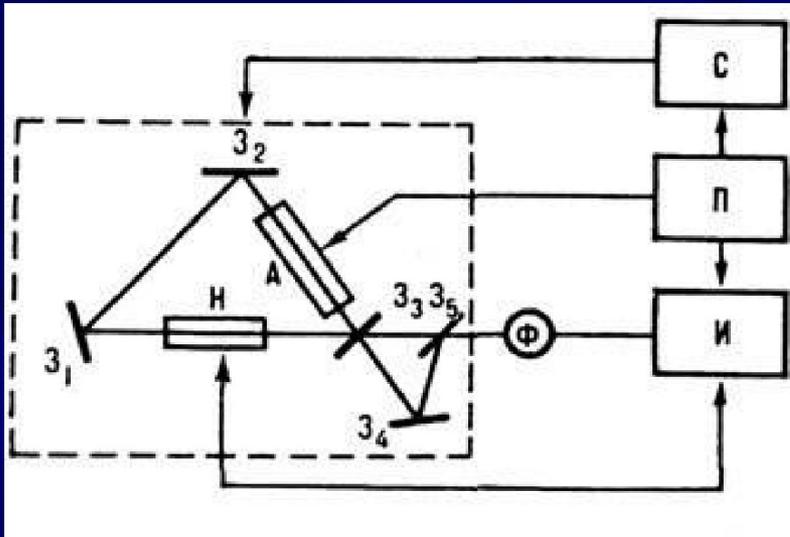
Кольцевые лазерные гироскопы

Кольцевой лазерный гироскоп изготавливается подобно газовому лазеру: в кварцевом блоке путем расплавления создается полость (канал) в форме треугольника и заполняется смесью гелия и неона. В углах полости расположены зеркала, образуется замкнутый оптический контур. Длина волны генерируемого лазером излучения 632,8 нм.



Действие лазерного гироскопа основано на зависимости разности собственных частот кольцевого оптического резонатора для встречных волн от скорости его вращения относительно инерциальной системы отсчёта.

Кольцевые лазерные гироскопы



$Z_1 - Z_3$ – зеркала;

A – активная среда;

Z_4, Z_5 – зеркала смесителя встречных волн
(Z_6 – полупрозрачное зеркало);

H – невзаимный элемент;

Ф – фотодетектор;

П – блок питания;

С – система стабилизации параметров лазера;

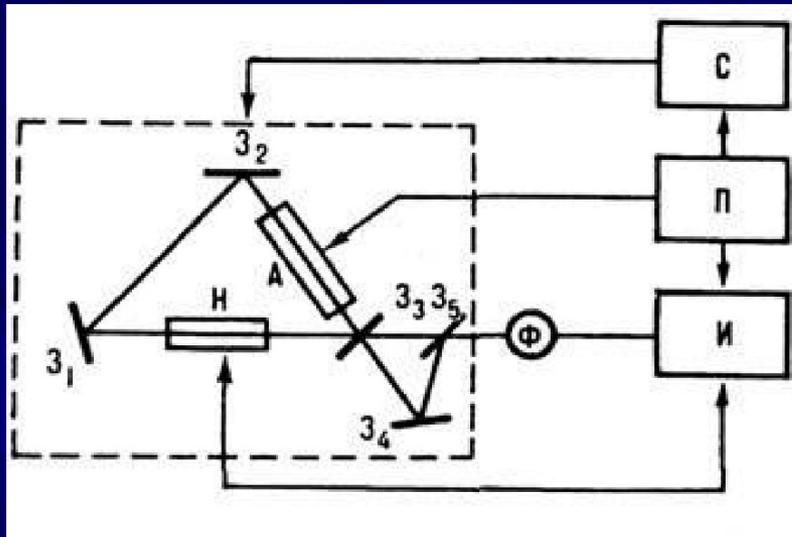
И – система обработки информации.

Резонатор кольцевого лазера состоит из 3 (или 4) отражателей (зеркал или призм), установленных на жестком основании и обеспечивающих замкнутую траекторию (треугольник или прямоугольник) для встречных волн.

Возникновение разности частот встречных волн следует из зависимости времени обхода светом вращающегося контура от скорости вращения и направления обхода.

Разностная частота ($10^{-2} - 10^5$ Гц) выделяется фотодетектором при пространственном совмещении (смещении) небольшой части энергии ($< 0,1\%$) встречных световых волн (10^{14} Гц), выведенной из кольцевого резонатора (Z_1, Z_2, Z_3) через выходное частично прозрачное зеркало Z_3 .

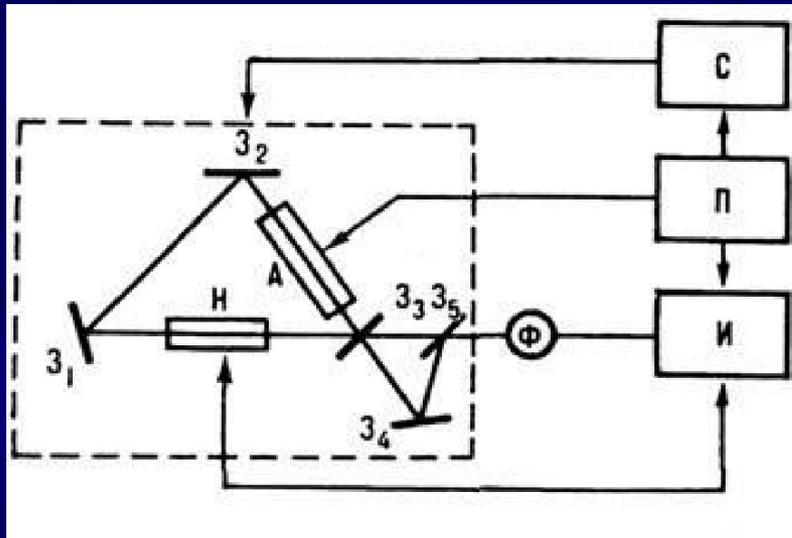
Кольцевые лазерные гироскопы



Смеситель состоит из зеркал 3_4 , 3_5 (3_5 — полупрозрачное) или специальной призмы с углом при вершине 90° . Синусоидальный сигнал на выходе фотодетектора преобразуется в измерительном устройстве в последовательность импульсов, регистрируемых счетчиком. Число импульсов пропорционально углу поворота в плоскости кольцевого лазера

В качестве активной среды в гироскопе обычно используется газовая смесь двух изотопов неона (^{20}Ne , ^{22}Ne) с He, характеризующаяся неоднородно уширенной линией рабочего перехода. Это позволяет устранить конкурентное взаимодействие встречных волн и получить высокую стабильность.

Кольцевые лазерные гироскопы



Особенности съема информации с лазерного гироскопа.

Сигналы с фотодиодов после усиления и преобразования в прямоугольную форму поступают на реверсивный счетчик. На нем сначала происходит подсчет числа импульсов на интервале времени, равном полупериоду частотной подставки, когда резонатор вращается в одну сторону, а затем вычитается число импульсов, поступающих при вращении в противоположном направлении.

За период частотной подставки на выходе счетчика образуется число N , соответствующее углу поворота прибора: ,

$$\varphi = N\varphi_0$$

где φ_0 - минимально измеряемый угол .

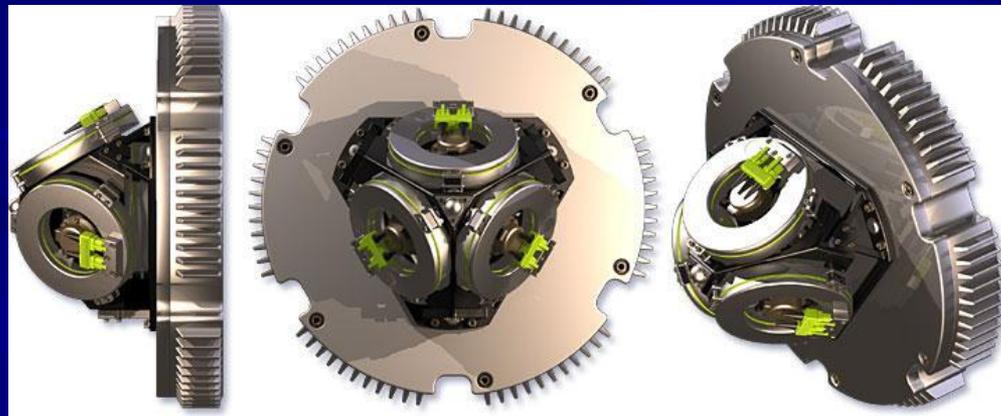
Таким образом, лазерный гироскоп является, по сути, датчиком приращения угла поворота на некотором интервале времени, равном периоду частотной подставки.

Кольцевые лазерные гироскопы

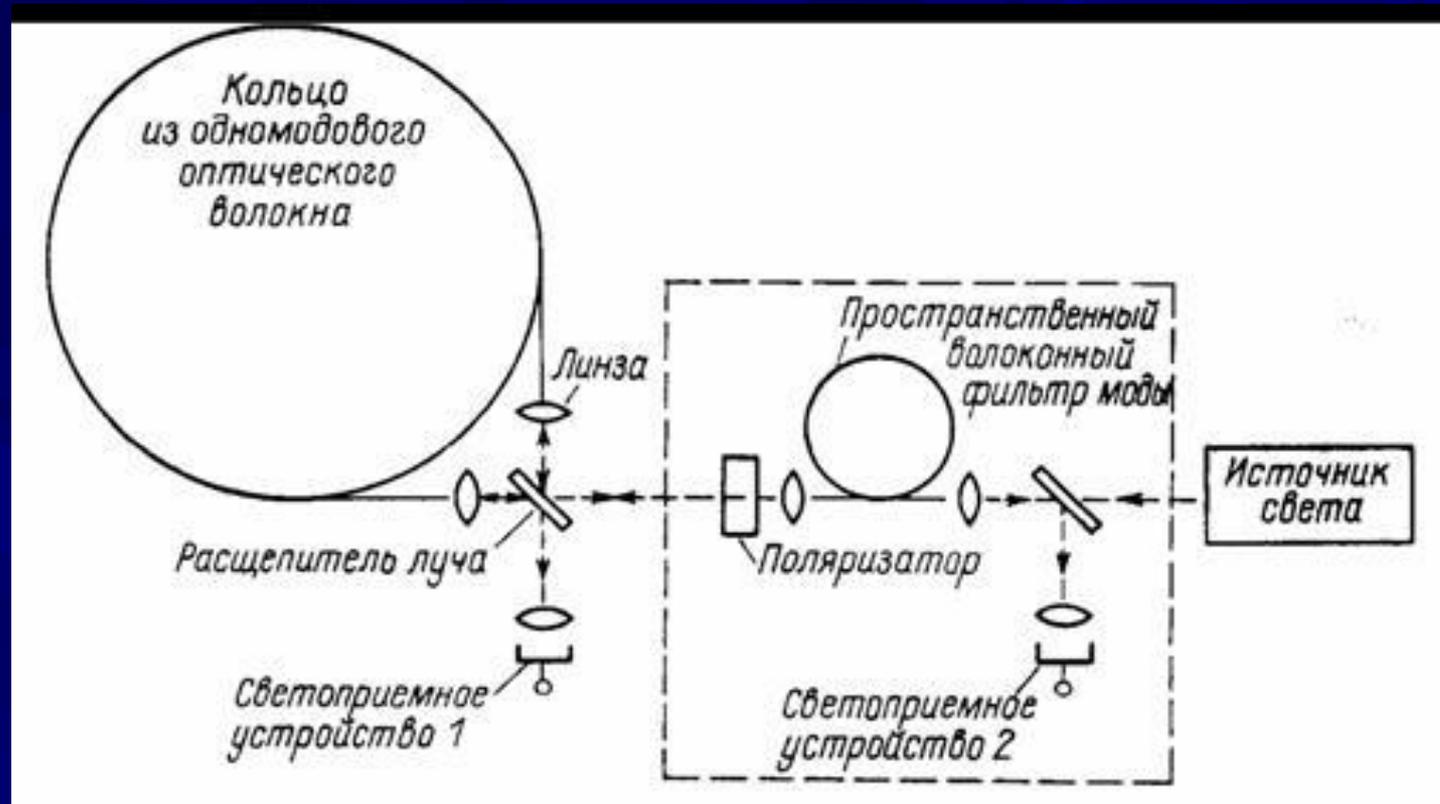


Недостатки КЛГ:

1. Нелинейность выходного сигнала при малой угловой скорости (влияние синхронизма)
2. Дрейф выходного сигнала из-за газовых потоков в лазере.
3. Изменение длины оптического пути под воздействием теплового расширения, давления и механических деформаций.



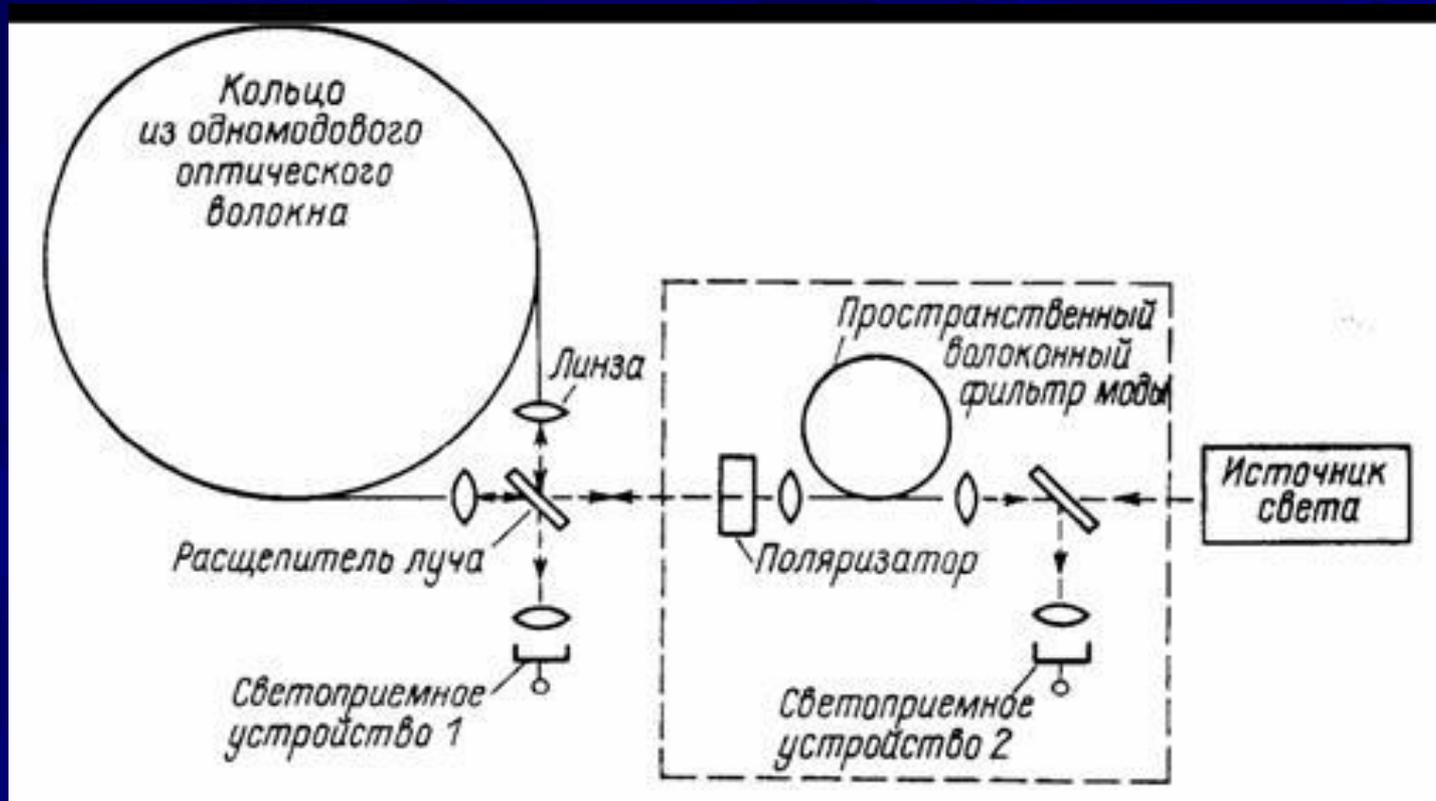
Волоконно-оптический лазерный гироскоп



Это интерферометр Саньяка в котором круговой оптический контур заменен на катушку из длинного одномодового оптического волокна. Часть схемы, обведенная штриховой линией, необходима для повышения стабильности нулевой точки. Разность фаз между двумя световыми волнами, обусловленная эффектом Саньяка, равна

$$\Delta\psi = \frac{4kSN}{c} \Omega = \frac{4\pi L a}{c\lambda} \Omega,$$

Волоконно-оптический лазерный гироскоп



Измеряют с высокой точностью изменения фазы (в инерциальной навигации — порядка 10^{-6} рад), а затем из формулы

$$\Delta\psi = \frac{4kSN}{c} \Omega = \frac{4\pi L a}{c\lambda} \Omega,$$

определять круговую скорость. Все это и составляет принцип работы волоконно-оптического гироскопа.

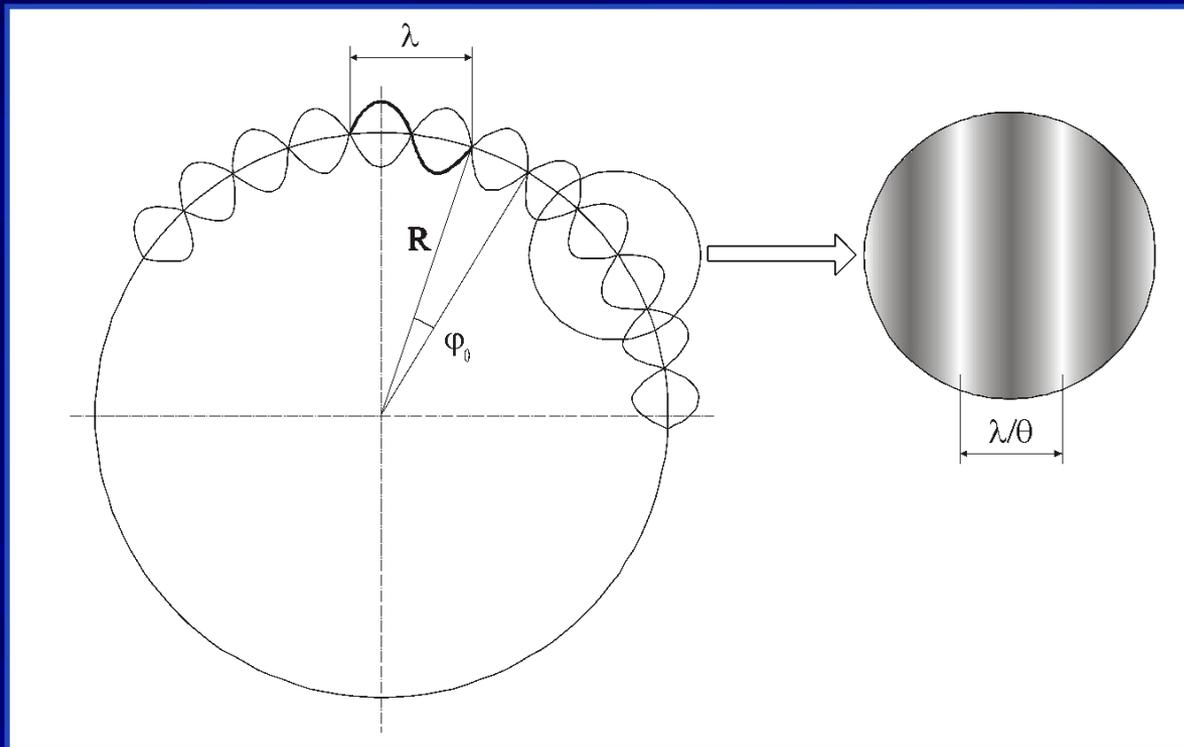
Волоконно-оптический лазерный гироскоп

Главными элементами ВОГ являются излучатель, фотоприемник и многовитковый замкнутый контур из одномодового диэлектрического световода с малым затуханием - так называемый интерферометр Саньяка. Достоинством интерферометра Саньяка является возможность реализовать с его помощью точные интерферометрические измерения фазы оптического излучения.

Два лазерных луча, генерируемые и усиливающиеся в полостях гироскопа, непрерывно циркулируют по резонатору в противоположных направлениях. В лазерном гироскопе создаётся и поддерживается стоячая волна, а её узлы и пучности в идеальном случае связаны с инерциальной системой отсчёта. Таким образом, положение узлов и пучностей не меняется если гироскоп не вращается (в плоскости кольцевого контура) относительно инерциальной системы отсчёта, а при повороте резонатора (корпуса гироскопа) фотоприёмники измеряют угол поворота, считая пробегающие по ним интерференционные полосы

Волоконно-оптический лазерный гироскоп

В кольцевом оптическом резонаторе создаются встречные волны лазерного (когерентного) излучения. В результате их сложения образуется стоячая волна (рис.), которая обладает свойством неподвижности в инерциальном пространстве по отношению к вращательному движению.



Современные ВОГ российского производства



ТИУС-50



ТИУС-20



Основные области применения:





17. Статическая характеристика интерферометра и лазерного датчика угловой скорости

Обычно частота генерации изменяется в зависимости от длины лазерного резонатора. В КЛГ частоты двух генерируемых световых волн, распространяющихся в противоположных направлениях по треугольному оптическому пути, неодинаковы из-за разности оптической длины ΔL . Поэтому можно использовать для измерений частоту биений обеих генерируемых световых волн, а именно

$$\Delta f = \frac{4S}{\lambda L} \Omega.$$

$$\Delta L = \frac{4S}{c} \Omega$$

$$\lambda = c / \nu$$

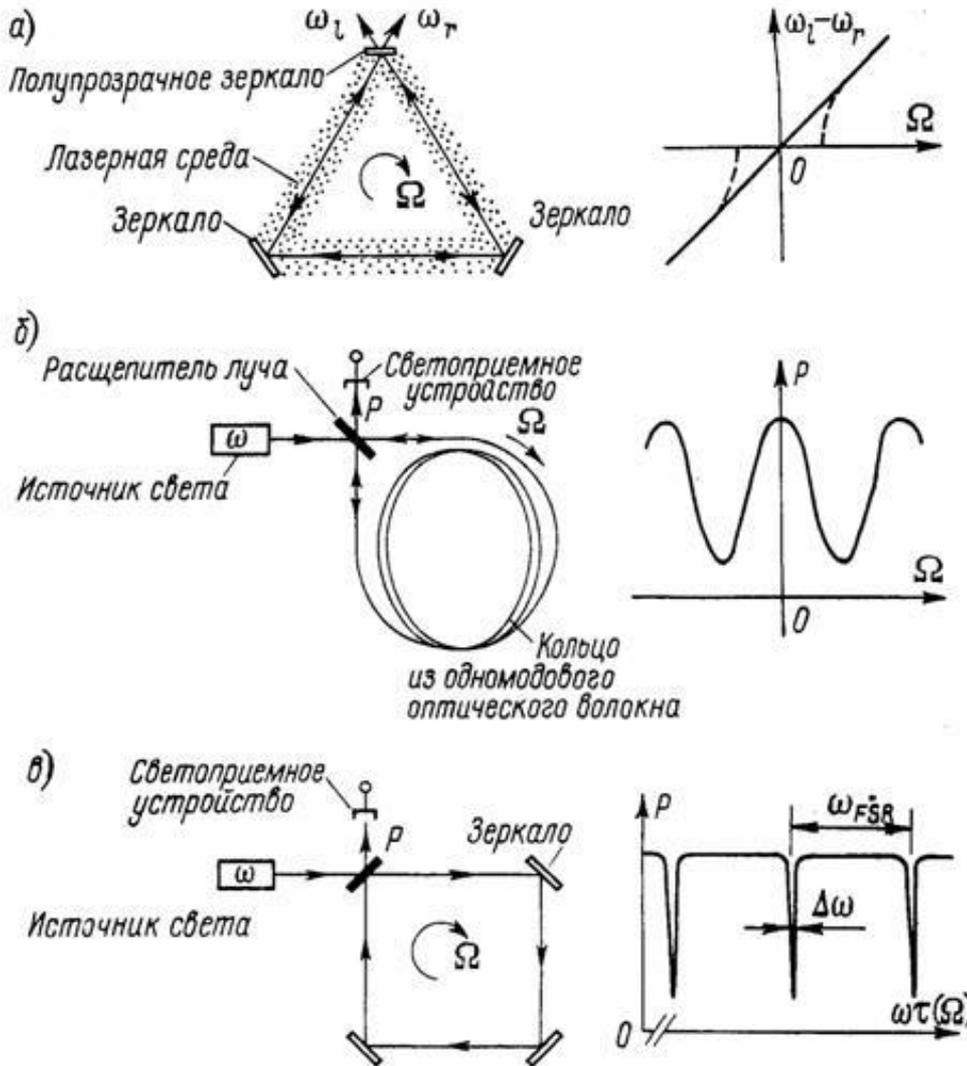
где L — общая длина оптического пути в кольцевом резонаторе;
 λ — длина волны генерации в состоянии покоя.

Измерив Δf , определяют угловую скорость относительно инерциального пространства. Поскольку частота света составляет несколько сотен терагерц, даже ее незначительные изменения позволяет измерить разность частот.

$$\Omega = \frac{\Delta f \lambda L}{4S}$$

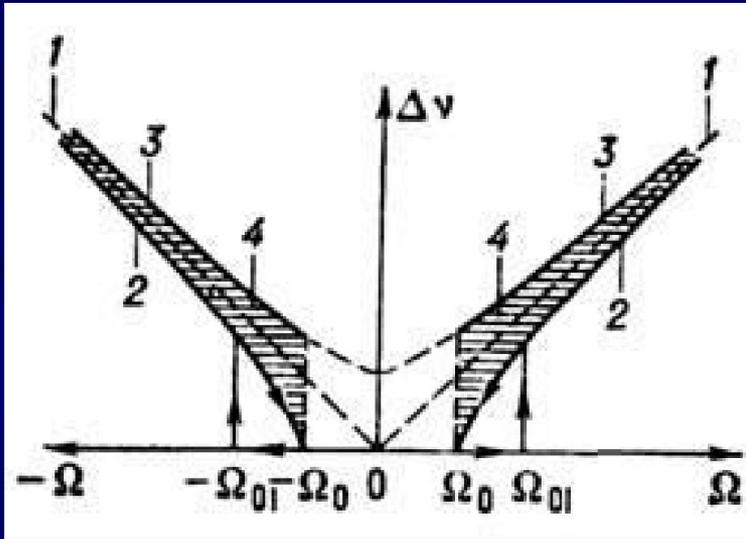
17. Статическая характеристика интерферометра и лазерного датчика угловой скорости 8

Выходная характеристика кольцевого лазерного гироскопа



Так как выходным сигналом служит частота, пропорциональная угловой скорости, то подсчетом выходных волн можно определить приращение угла поворота в цифровой форме, что обеспечивает высокую точность информации, подаваемой в навигационное вычислительное устройство.

17. Статическая характеристика интерферометра и лазерного датчика угловой скорости 7



Частотные характеристики лазерного гироскопа

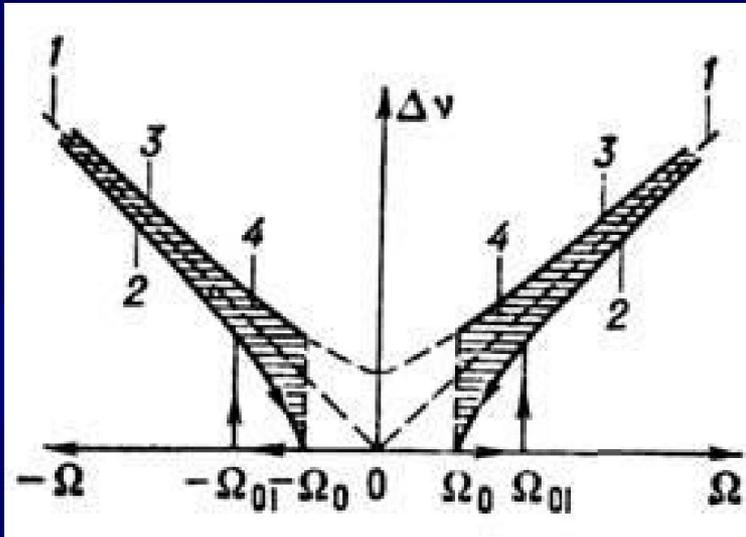
- 1 – идеальная $\Delta \nu = K \Omega \cos \theta$;
- 2, 3 – теоретические;
- 4 – область реальной характеристики.

$$\Delta f = \frac{4S}{\lambda L} \Omega.$$

Выходная характеристика лазерного гироскопа в реальном кольцевом лазере отличается от идеальной из-за влияния нелинейных свойств активной среды и наличия связи встречных волн вследствие обратного рассеяния. В области малых угловых скоростей связь встречных волн приводит к захвату их частот. Поэтому выходная характеристика лазерного гироскопа имеет область нечувствительности к вращению (зону захвата Ω_0 и Ω_{01}). Кроме того, зависимость имеет гистерезисный характер: частоты, соответствующие входу в зону захвата Ω_0 и выходу из нее Ω_{01} , различны. При измерении величины обратного рассеяния R и фазы ϵ рассеянных волн изменяется в пределах

$$\Delta \nu = K (\Omega^2 \mp \Omega_0^2)^{1/2} \quad (|\Omega| \geq \Omega_0),$$

17. Статическая характеристика интерферометра и лазерного датчика угловой скорости 6



$$\Delta \nu = K (\Omega^2 \mp \Omega_0^2)^{1/2} \quad (|\Omega| \geq \Omega_0),$$

Константа гироскопа $K=4S/(\lambda L)$ определяется конструктивными параметрами конкретного типа ЛГ и нелинейностью выходной характеристики.

Чувствительность – минимальный выходной сигнал, соответствующий наименьшему значению измеряемой выходной скорости. Теоретический предел чувствительности ограничен спонтанным излучением активной среды.

Частотные характеристики лазерного гироскопа

- 1 – идеальная $\Delta \nu = K\Omega \cos \vartheta$;
- 2, 3 – теоретические;
- 4 – область реальной характеристики.

18. Погрешности лазерного датчика угловой скорости и методы их устранения

Главными источниками погрешностей для лазерных гироскопов являются:

- дрейф нуля, вызванный изменением температур, магнитными полями и т.д.;
- стабильность коэффициента преобразования сигнала в напряжение;
- компенсируемая стабильность нуля;
- показатель шума на выходе прибора.

Хотя, кольцевой лазерный гироскоп достиг уже стадии практического применения, но, тем не менее, остается ряд нерешенных проблем:

1. Нелинейность выходного сигнала при малой угловой скорости (влияние синхронизма).
2. Дрейф выходного сигнала из-за газовых потоков в лазере.
3. Изменение длины оптического пути под воздействием теплового расширения, давления и механических деформаций.

18. Погрешности лазерного датчика угловой скорости и методы их устранения

Из этих проблем самой важной является первая. При малых угловых скоростях уменьшается разность частот генерируемых световых волн, а это приводит к синхронизму ($\Delta f=0$) и невозможности обнаружения вращения. (Типичный порог обнаружения при этом $10^\circ/\text{ч}$.)

Разрешающая способность обнаружения $0,001^\circ/\text{ч}$ обеспечивается при подавлении явления синхронизма путем приведения всей системы к микроколебаниям (метод Дейза). Но нелинейность при незначительном повороте все же остается, кроме того, это означает, что не используется такое преимущество оптического гироскопа, как его неподвижность.

В ВОГ вышеупомянутое явление не возникает, поскольку это пассивная конструкция, при которой световой источник находится вне чувствительной петли. Основное внимание здесь уделяется оптическому волокну, снижению потерь в нем.

18. Погрешности лазерного датчика угловой скорости и методы их устранения

В настоящее время кольцевые лазерные гироскопы применяются в инерциальной системе отсчета в самолетах «Боинг» 757/767, и в аэробусах А310. В Японии опубликованы сообщения об измерении ими угловой скорости $0,01^\circ/\text{ч}$

Конструктивные отличия КЛГ от ВОГ определяют следующие преимущества последнего:

- 1) в ВОГ отсутствует так называемое явление "захвата", т. е. синхронизация противоположно бегущих типов колебаний вблизи нулевой угловой скорости, что позволяет измерять очень малые значения угловой скорости без необходимости внесения сложных в настройке устройств смещения нулевой точки;
- 2) в ВОГ эффект Саньяка проявляется на несколько порядков сильнее, чем в КЛГ, вследствие большого периметра, достигающего 500... 1500 м, и малых потерь в волокне;
- 3) в КЛГ необходимо контролировать давление газов и утечку в газоразрядной трубке, в то время как ВОГ целиком конструируется в виде твердого тела (в будущем полностью на интегральных оптических схемах);
- 4) ВОГ измеряет мгновенное значение угловой скорости, в то время как КЛГ регистрирует приращение углового положения.

18. Погрешности лазерного датчика угловой скорости и методы их устранения

При кажущейся простоте и высокой чувствительности ВОГ к угловой скорости вращения он в то же время чрезвычайно чувствителен к очень малым внешним и внутренним возмущениям и нестабильностям, что приводит к паразитным дрейфам, т.е. к ухудшению точности прибора.

К этим 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.

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).

18. Погрешности лазерного датчика угловой скорости и методы их устранения

Для увеличения точности волоконно-оптических гироскопов используется ряд методов.

1. Использование источников излучения с широким спектром – полупроводниковых лазеров или суперлюминесцентных диодов уменьшает флуктуации интерференционных полос из-за рэлеевского рассеяния и невзаимные сдвиги фаз за счёт разности интенсивностей встречных волн ;
2. Использование одномодовых световодов ослабляет влияние невзаимных эффектов из-за изменения двойного лучепреломления в волокне при различных внешних воздействиях (механических, тепловых, акустических и пр.)
3. Использование вместо прямого измерения сдвига интерференционной полосы , сильно ограничивающего точность и динамический диапазон, более сложных методов регистрации -фазовую модуляцию, фазовую компенсацию, гетеродинные методы и т. д.

Одномодовое оптическое волокно — **волокно**, основной диаметр сердцевины которого, приблизительно в семь - десять раз больше длины волны, проходящего по нему света.