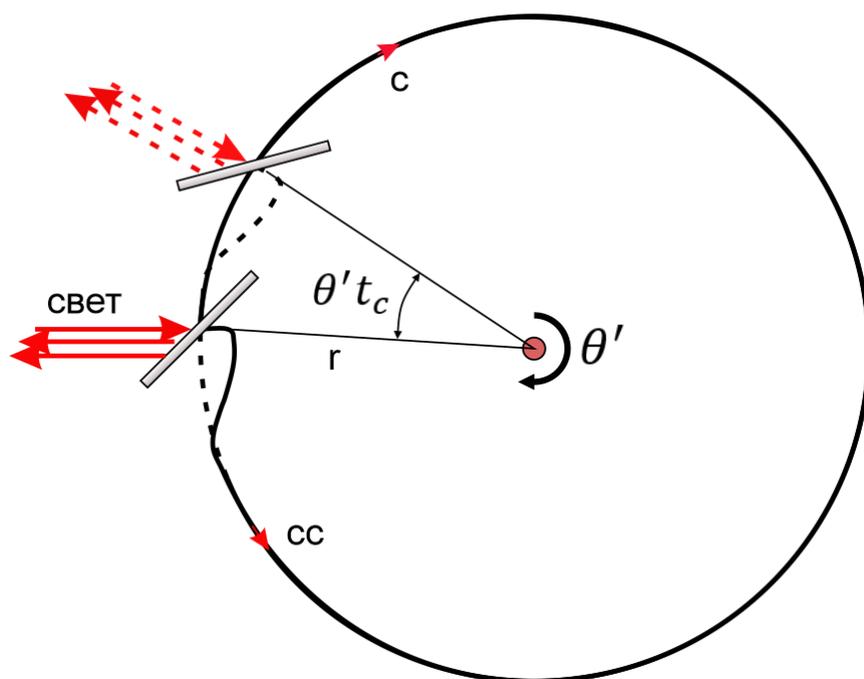


В.Е. Стригалеv, И.К. Мешковский, Я.Д. Моор

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФАЗО-
ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ В
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
СИСТЕМАХ



Санкт-Петербург
2021

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

В.Е. Стригалева, И.К. Мешковский, Я.Д. Моор

**ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФАЗО-
ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ В
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 16.04.01 Техническая физика
в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных
образовательных программ высшего образования магистратуры

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург
2021

Стригалева В.Е., Мешковский И.К., Моор Я.Д., Особенности использования фазо-чувствительных устройств в волоконно-оптических измерительных системах – СПб: Университет ИТМО, 2021. – 41 с.

Рецензент(ы):

Ероньян Михаил Артемьевич, д.т.н., Глав.н.с., АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

В данном учебном пособии продемонстрированы особенности работы волоконно-оптических датчиков фазового типа.

Подробно рассмотрен процесс реализации волоконно-оптических измерителей на основе двухлучевой интерферометрии в “белом свете”, объяснено функциональное назначение волоконно-оптических элементов, необходимых для функционирования измерительной системы.

Значительное внимание уделено физическим принципам работы интерферометрии в “белом свете”, работе отдельных элементов и регистрации интерферометрической информации.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2021

© Стригалева В.Е., Мешковский И.К., Моор Я.Д., 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
РАЗДЕЛ 1. ФАЗО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА	5
1.1 Интерферометр Майкельсона	6
1.2 Влияние спектра источника излучения на видность интерференционной картины	10
1.3 Метод волновых пакетов.....	11
1.4 Метод интерференции в белом свете для юстировки оптических компонентов измерительной схемы	15
1.5 Два режима работы двулучевого интерферометра.....	18
1.6 Интерферометр Саньяка. Волоконно-оптический гироскоп.....	21
1.7 Волоконно-оптический измеритель магнитного поля (электрического тока)	30
1.8 Синхронный усилитель (детектор)	33
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ	36
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	37
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	38

ВВЕДЕНИЕ

Во многих отраслях науки и техники используются волоконно-оптические сенсорные системы, которые обладают рядом преимуществ по сравнению с другими измерительными датчиками, например, надежность, точность, малые весогабаритные параметры, нечувствительность к электромагнитным помехам, работоспособность в условиях агрессивных сред.

Наиболее точными системами измерения являются волоконно-оптические датчики интерферометрического типа, работа которых основана на изменении фазы световой волны, которое приводит к образованию интерференционной картины. В зависимости от поставленной задачи, требуемых параметров, таких как точность, динамический и рабочий температурный диапазоны, необходимо выбирать интерференционную схему используемого датчика и, следовательно, схему модуляции обработки выходного сигнала.

В рамках данного учебного пособия рассмотрены ключевые понятия, понимание которых необходимо при разработке волоконно-оптических интерферометров для высокоточных измерений физических величин, таких как, давление, температура, показатель преломления вещества, напряженности магнитного и электрического полей. Учебное пособие позволяет сформировать у читателя целостную картину об интерферометрах Майкельсона, Маха-Цендера и Саньяка, понять природу такого явления, как интерференция.

Настоящее учебное пособие рекомендовано к использованию в Университете ИТМО по направлению подготовки 16.04.01 Техническая физика для реализации дисциплины «Волоконно-оптические информационно-измерительные системы», входящей в международную образовательную программу магистратуры мегафакультета фотоники. Учебное пособие может быть использовано как в качестве основного материала для проведения лекционных и/или практических занятий, при подготовке к сдаче экзамена, так и для самостоятельной работы студентов.

РАЗДЕЛ 1. ФАЗО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Фазо-чувствительные устройства или оптические фазовые датчики (ФД) являются самыми чувствительными оптическими измерительными системами.

При проектировании ФД возникают два вопроса:

1. Легко ли изменить фазу света?
2. Легко ли зарегистрировать и измерить эти изменения?

На первый вопрос можно ответить, что фазу света изменить достаточно просто.

Например, если поместить руку под лазерным пучком, распространяющимся в воздухе, то воздух нагреется от тепла руки. Нагревание воздуха повысит коэффициент преломления среды и, соответственно, изменится фаза света в лазерном пучке. Конечно, скорость такой модуляции очень низка.

Другой пример: использование более сложного устройства – электрооптического модулятора, принцип действия которого основан на линейном электрооптическом эффекте. Прикладывая напряжение к кристаллу, можно изменить его коэффициент преломления. Причем частота, которая может быть здесь использована для модуляции, может быть очень высокая – десятки ГГц.

Ответить на второй вопрос существенно сложнее.

Любое фоторегистрирующее устройство (фотодиод) всегда усредняет во времени оптический сигнал ввиду очень большой частоты света – порядка 10^{14} - 10^{15} Гц в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Таким образом, фотодиод измеряет интенсивность света, а не его амплитуду. Для того чтобы перевести изменения фазы в изменения интенсивности, необходимо устройство, называемое **интерферометром**. В основе работы интерферометра лежит интерференция (сложение амплитуд) двух или многих волн.

Самый простой вид интерференции – двухлучевая интерференция, в которой участвуют только две световые волны. Если эти две волны являются плоскими монохроматическими волнами с одной частотой, тогда это самый простой случай интерференции.

Более сложная интерференция – многолучевая интерференция. Необходимо создать несколько пучков света, которые совмещаются в пространстве. Несколько лучей можно свести зеркалами. Если взять разные источники света, например, полупроводниковые лазеры, и совместить их, то интерференции не будет, потому что разные источники света, даже если они излучают очень узкий спектр одинаковой частоты, не интерферируют, поскольку их относительные разности фаз все равно случайны. Постоянство разности фаз важно в течение времени усреднения фотоприемника.

В качестве примера двухлучевой интерференции можно привести интерферометр Майкельсона, а в качестве примера многолучевой – интерферометр Фабри-Перо.

1.1 Интерферометр Майкельсона

Интерферометр Майкельсона (ИМ) – это двухлучевой интерферометр, который состоит из одного делителя светового пучка по амплитуде, используемого и для деления, и для объединения пучков. Оптическая схема ИМ показана на рис. 1.

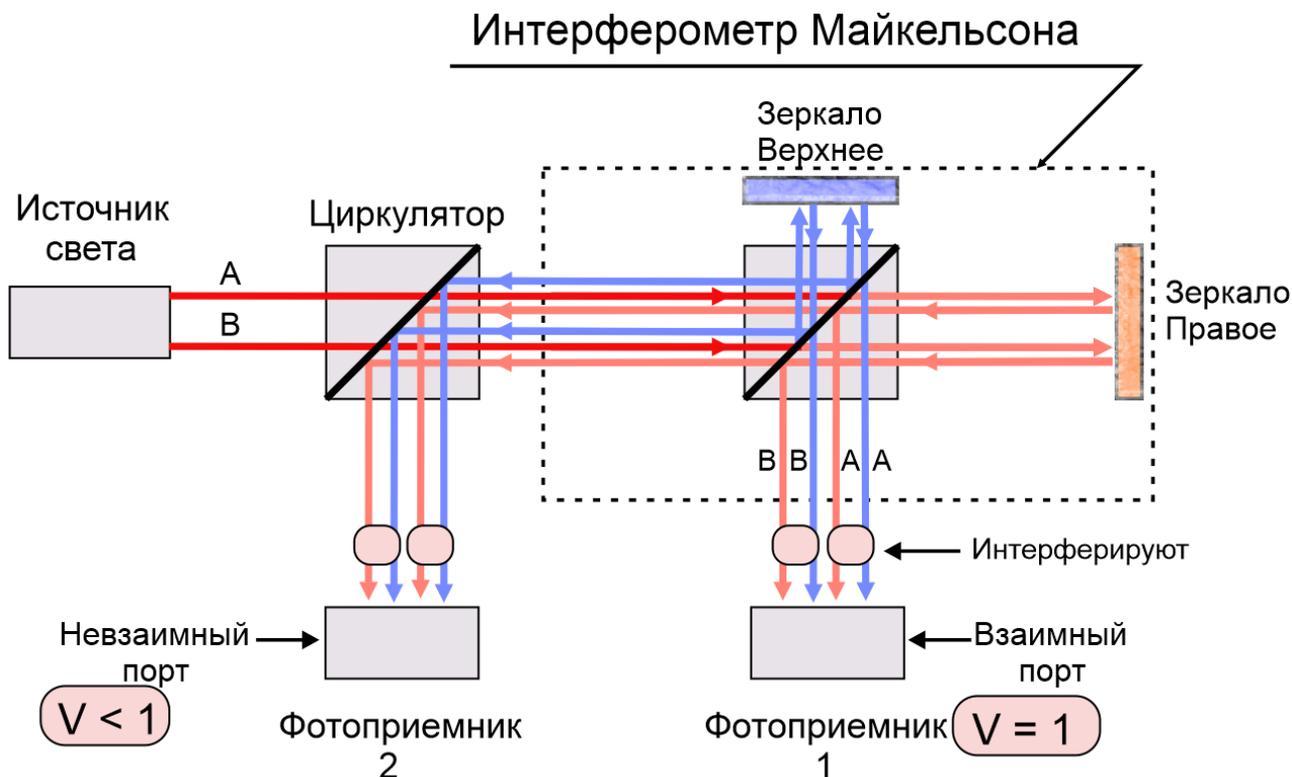


Рис. 1 – Оптическая схема интерферометра Майкельсона

На видность V интерференционной картины (ИК) не влияет пространственная когерентность источника света. Рассмотрев движение световых пучков, из рис.1 следует, что в каждой точке фотоприемника интерферируют лучи, которые образовались из одного луча волнового фронта. Например, луч A , исходящий из источника света, после деления, отражения от зеркал и объединения попадает в одну точку фотоприемника, где и происходит интерференция (лучи AA). На рисунке эти лучи раздвинуты для наглядности. Аналогично интерферируют лучи, полученные из исходного луча B .

Видность ИК можно рассчитать по формуле (1):

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}, \quad (1)$$

где I_{max} , I_{min} – интенсивности в максимуме и минимуме интерференционной картины.

Рассмотрим некоторые неочевидные особенности и свойства интерферометра Майкельсона.

1. Взаимный и невзаимный порты

Интерферометр Майкельсона имеет два выходных порта. На рис. 1 предсталены два фотоприемника (ФП), порты которых нумеруются согласно номеру ФП (один и два). Они принципиально отличаются друг от друга. **Порт 1 является взаимным.** Это означает, что при равенстве длин расстояний до отражающих зеркал L_1 и L_2 и одинаковом коэффициенте отражения данных зеркал разность фаз интерферирующих пучков всегда будет равна нулю. Причем это верно при любом коэффициенте делителя и даже при наличии потерь в делителе.

При одинаковом коэффициенте отражения зеркал амплитуда каждой волны в порту 1 будет пропорциональна выражению

$$r * t, \quad (2)$$

где r – коэффициент отражения делителя, t – коэффициент пропускания.

Тогда амплитуды интерферирующих волн будут равны, и видность ИК будет равняться 1 при выполнении условия (3):

$$(L_1 - L_2) \ll L_{c \text{ ии}}, \quad (3)$$

где L_1 и L_2 – расстояния до зеркал 1 и 2, $L_{c \text{ ии}}$ – длина когерентности источника излучения света.

Порт 2 является невзаимным, поскольку происходит двойное отражение на делителе, амплитуда одной интерферирующей волны пропорциональна выражению $r * r$, а другой пропорциональна $t * t$, что означает двойное прохождение делителя. Поэтому видность ИК будет всегда меньше 1, даже при выполнении условия (1).

Стоит отметить, что на делителе по амплитуде волнового фронта возникает разность фаз между отраженной и прошедшей волной. Оба пучка, выходящие в порту 1, испытывают один и тот же сдвиг фаз. Поэтому при одинаковых расстояниях до зеркал (4) будет наблюдаться максимум интенсивности (конструктивная интерференция):

$$(L_1 - L_2) = 0. \quad (4)$$

На выходе порта 2 ситуация иная. Разность фаз между отраженной и прошедшей волной в интерферирующих пучках удваивается и при делителе без потерь равна

$$\Delta\varphi = 2 * \frac{2\pi}{\lambda} * (L_2 - L_1), \quad (5)$$

где $\Delta\varphi$ – разность фаз между отраженной и прошедшей волнами.

При выполнении условия (5) интерференция будет деструктивной.

2. Разность фаз между отраженной и прошедшей волнами в делителях по амплитуде световой волны

На рис. 2 а показан делитель по амплитуде световой волны с коэффициентом деления по интенсивности 50/50. В этом случае амплитуды полей волн после делителя будут составлять $1/\sqrt{2}$ от амплитуды поля падающей волны.

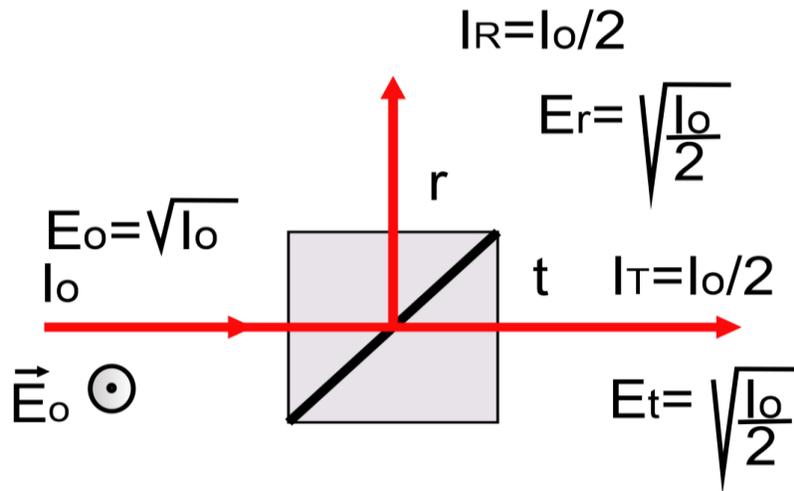


Рис. 2а – Делитель по амплитуде световой волны с коэффициентом деления по интенсивности 50/50, где I_0, I_R, I_T – интенсивности падающей, отраженной и прошедшей волн, а E_0, E_r, E_t – напряженности падающей, отраженной и прошедшей волн

Если предположить, что все три волны находятся в фазе, то при сложении векторов полей отраженной и прошедшей волн мы не получим амплитуду падающей волны (рис. 2 б).

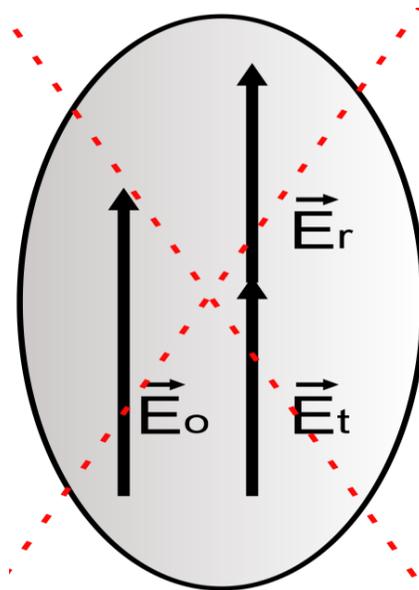


Рис. 2 б – Сложение векторов полей отраженной и прошедшей волн

Наличие разности фаз между падающей, отраженной и прошедшей волнами можно продемонстрировать на так называемой **фазорной плоскости**. На этой плоскости откладываются вектора с длинами пропорциональными амплитудам поля, а углы между векторами соответствуют разности фаз между ними. Не путать с направлением вектора поля! На рис. 2 а и 2 б показан случай p поляризации. Все три вектора поля перпендикулярны плоскости рисунка.

Рассмотрим идеальный делитель без потерь. Фазорная плоскость показана на рис. 3а для идеального случая делителя без потерь. Для выполнения закона сохранения энергии необходим сдвиг фаз $\pi/2$ между отраженной и прошедшей волной.

В этом случае делителя 50/50 при составлении треугольника из трех векторов E_o , E_r и E_t с длинами 1, $1/\sqrt{2}$ и $1/\sqrt{2}$ соответственно в результате получаем прямоугольный треугольник. По теореме Пифагора для прямоугольного треугольника следует

$$E_o^2 = E_r^2 + E_t^2, \quad (6)$$

где E_o , E_r , E_t – напряженности падающей, отраженной и прошедшей волн.

Это соответствует закону сохранения энергии. Поскольку треугольник прямоугольный, угол между прошедшей и отраженной волнами равен $\pi/2$. Легко проверить, что такой же сдвиг фаз будет иметь место и для делителя без потерь с любым коэффициентом деления.

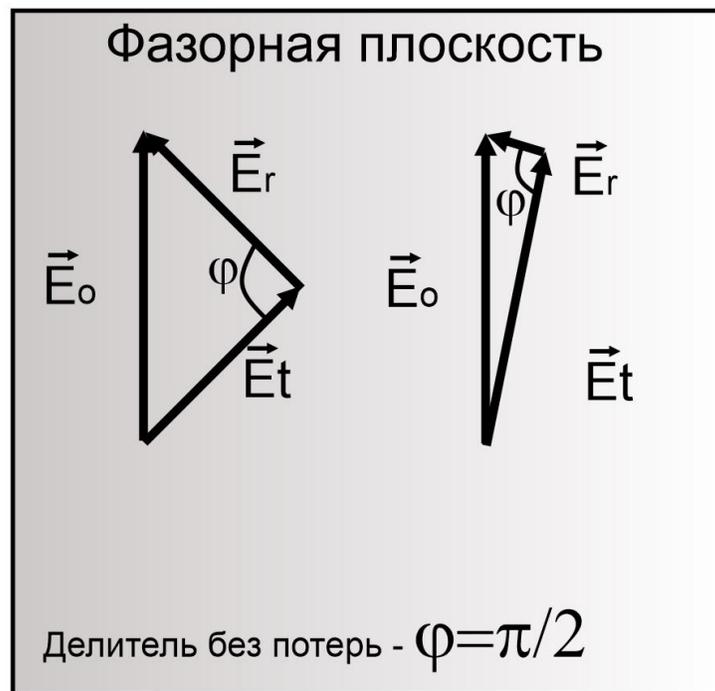


Рис. 3 а – Фазорная плоскость для идеального делителя без потерь

Случай делителя с потерями. На рис. 3 б показан реальный случай делителя с потерями. Здесь угол между векторами отраженной и прошедшей

волнами отличается от $\pi/2$. Это приводит к тому, что на фотоприемнике 2 при выполнении условия (4) интенсивность не будет минимальной.

При изменении температуры коэффициент деления и потери делителя изменяются, что приводит к изменению видности и, что более важно, к изменению разности фаз двух интерферирующих волн. Последнее является ошибкой измерения в интерферометре Майкельсона.

Необходимо подчеркнуть, что **правило сдвига фаз $\pi/2$ между отраженной и прошедшей волной** верно для многих типов делителей по амплитуде. Например, это верно для волоконно-оптического Y-разветвителя, для делителей на дифракционных решетках и т.д.

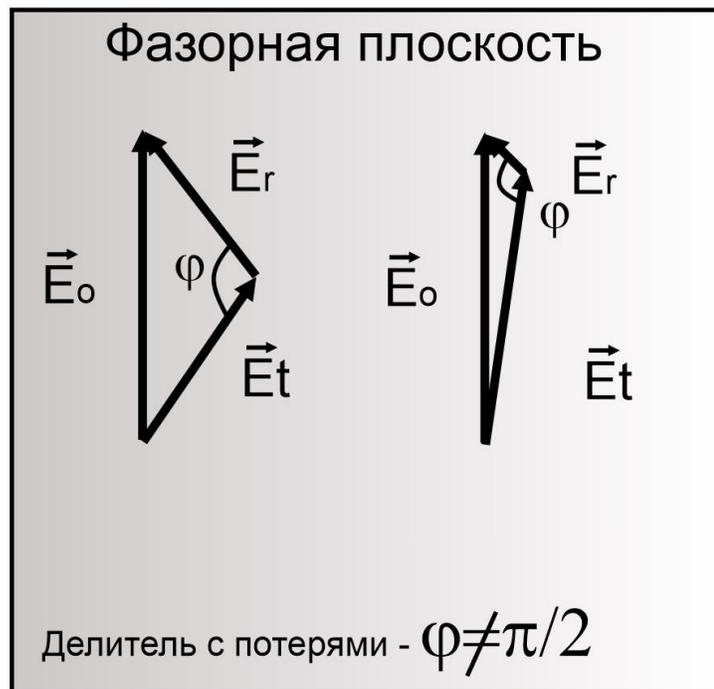


Рис.3 б – Фазорная плоскость для реального делителя с потерями

1.2 Влияние спектра источника излучения на видность интерференционной картины

Зависимость интенсивности интерференционной картины от разности фаз между пучками можно описать формулой (7):

$$I = I_1 + I_2 + \gamma(\Delta L) * 2 * \sqrt{I_1} * \sqrt{I_2} * \cos\left(\frac{2\pi * \Delta L}{\lambda}\right), \quad (7)$$

где $\gamma(\Delta L)$ – временная функция когерентности источника света.

Временная функция определяется спектром источника света. Она может быть получена преобразованием Фурье спектра интенсивности источника. На рис. 4 показан спектр источника света и его функция когерентности. Если

выполняется условие (8), то видность в интерферометре Майкельсона близка к нулю:

$$2 * (L_1 - L_2) > L_{dc} , \quad (8)$$

где L_{dc} – длина декогерентности источника света, спектр которого описывается функцией Гаусса.

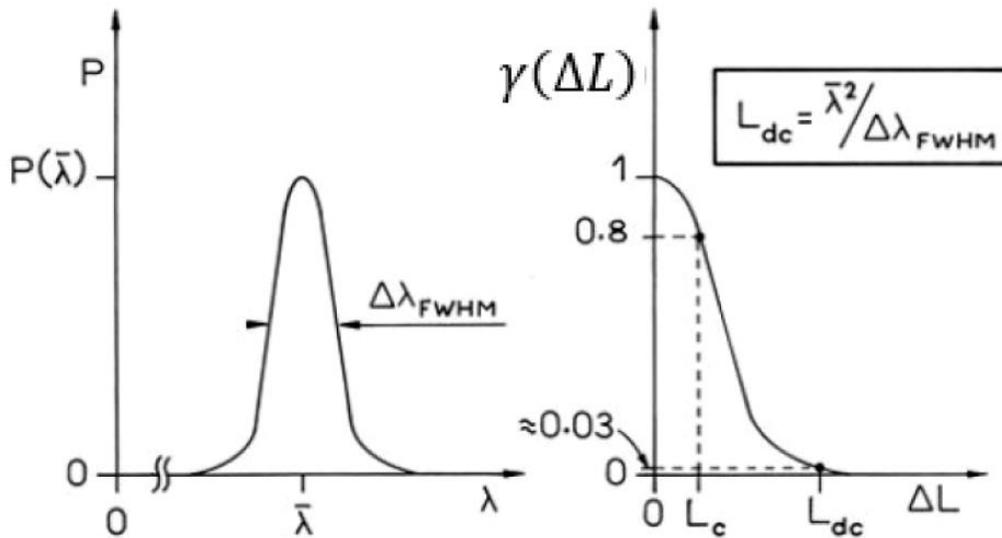


Рис. 4 – Спектр источника света и его функция когерентности, L_c – длина когерентности света, L_{dc} – длина декогерентности света, $\Delta\lambda_{FWHM}$ – ширина спектра на полувысоте

1.3 Метод волновых пакетов

Волновой пакет или цуг волн – это определенная совокупность волн (цугов), имеющая разные частоты и распространяющаяся в одном направлении.

На рис. 5 показан несимметричный интерферометр Маха-Цендера (ИМЦ). На этом рисунке **немодулированное излучение** источника света представлено в виде пространственного (временного) импульса (цуга), пространственная длина которого равна длине декогерентности L_{dc} .

Поскольку ИМЦ в данном случае – несимметричный, то цуги в выходных портах не перекрываются, и видность V равна 0. Интерференции нет. Волны складываются по интенсивности, а не по амплитуде.

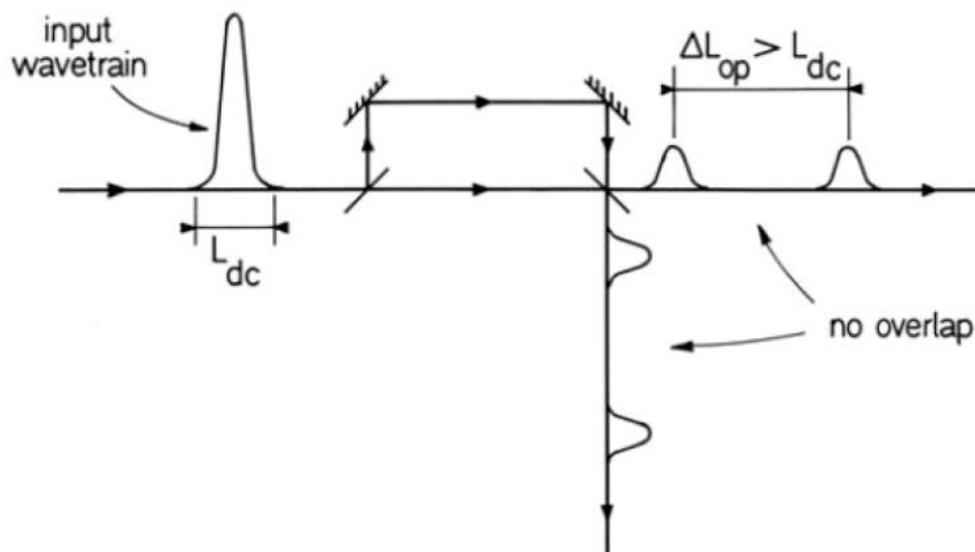


Рис. 5 – Схематическое изображение несимметричный интерферометра Маха-Цендера, где L_{dc} – длина декогерентности света, ΔL_{op} – разность хода

В оптических измерительных системах используются два метода регистрации изменения фазы в световом пучке.

1. Используется когерентный источник с узким спектром. Его длина когерентности L_c должна быть больше разности хода между пучками. Недостатком этого метода является наличие большого количества паразитных интерференционных сигналов, возникающих при отражении света на различных оптических элементах.
2. Используется источник с широким спектром – **интерференция в белом свете**. Паразитные интерференционные сигналы пропадают, но для получения полезной интерференции необходимо компенсировать разность хода в пучках.

На рис. 6 представлен измерительный ИМЦ. Второй ИМЦ, с такой же разностью хода, как и у первого, используется для компенсации разности хода и называется компенсационным. Из рисунка следует, что после прохождения световой волной двух ИМЦ образуется 4 цуга.

Если ИМЦ одинаковы (с одинаковой разностью длин плеч), то два цуга из четырёх будут совпадать во времени и будут интерферировать. Два остальных дают постоянную засветку, что уменьшает видность V (в идеальном случае до 0,5). На рисунке интерферирующие цуги обозначены FS (быстрый-медленный) и SF (медленный-быстрый).

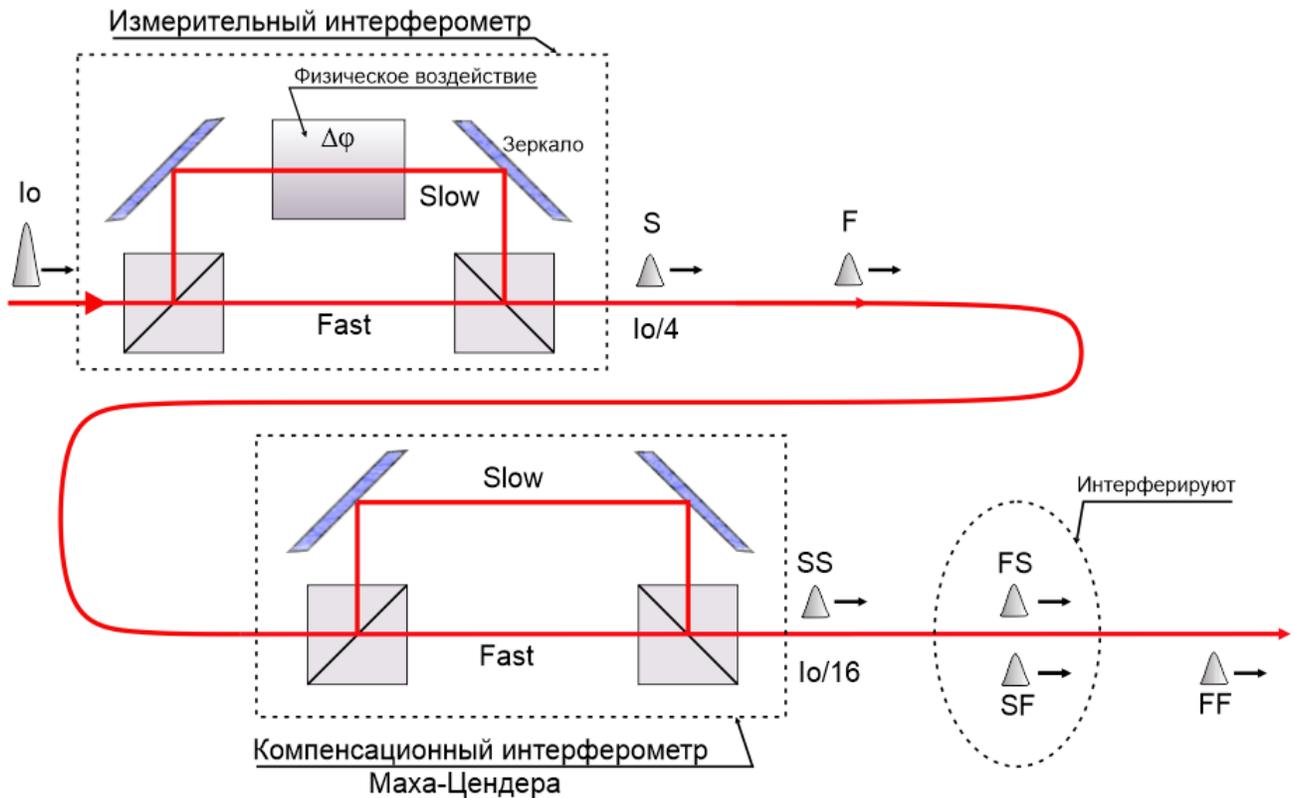


Рис. 6 – Измерительная система для регистрации изменения фазы, состоящая из измерительного и компенсационного интерферометра Маха-Цендера, где I_0 – интенсивность падающей волны, $\Delta\varphi$ – разность фаз между отраженной и прошедшей волнами, S – медленный цуг, F – быстрый цуг

Для измерительной схемы с двумя ИМЦ получаем следующие выражения:

$$I_{max} = \frac{I_0}{16} + 2 * \left(\frac{I_0}{16} + \frac{I_0}{16} \right) + \frac{I_0}{16}, \quad (9.1)$$

$$I_{min} = \frac{I_0}{16} + 2 * \left(\frac{I_0}{16} - \frac{I_0}{16} \right) + \frac{I_0}{16}, \quad (9.2)$$

$$V = \frac{(I_{max} - I_{min})}{(I_{max} + I_{min})}, \quad (9.3)$$

где I_0 – интенсивность падающей волны, I_{max} – максимальная интенсивность, I_{min} – минимальная интенсивность, V – видность.

Видность такой измерительной системы в идеальном случае равняется 0,5.

Аналогичная компенсация может быть выполнена с помощью интерферометра Майкельсона (рис. 7). Видность измерительной системы в идеальном случае также равняется 0,5.

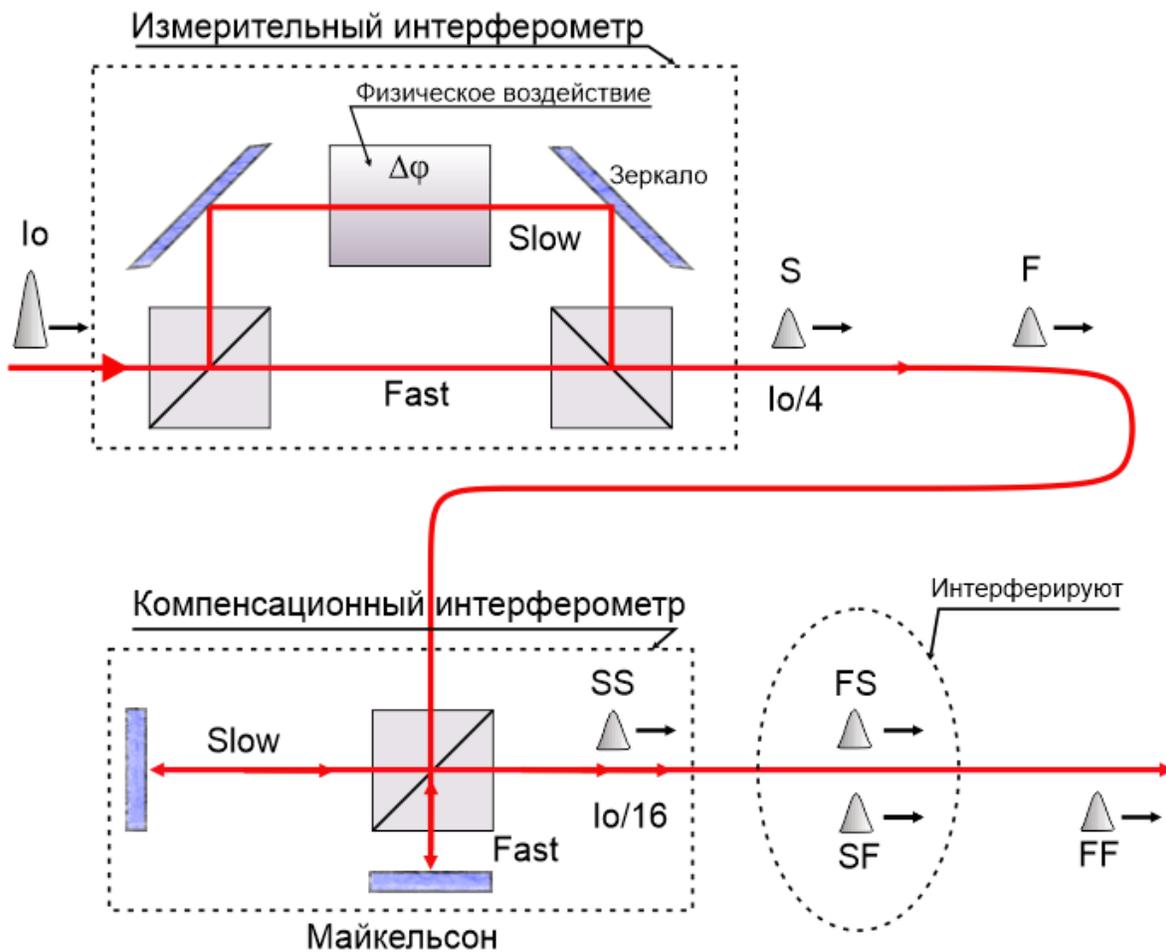


Рис. 7 – Измерительная система для регистрации изменения фазы, состоящая из измерительного интерферометра Маха-Цендера и компенсационного интерферометра Майкельсона, где I_0 – интенсивность падающей волны, $\Delta\phi$ – разность фаз между отраженной и прошедшей волнами, S – медленный цуг, F – быстрый цуг, SS – медленный-медленный цуг, SF – медленный-быстрый цуг, FS – быстрый-медленный цуг, FF – быстрый-быстрый цуг

При использовании оптического волокна для ввода и вывода света из ИМЦ и ИМ необходимо использовать коллиматор и оптическое волокно, которое должно быть одномодовым (Рис. 8).

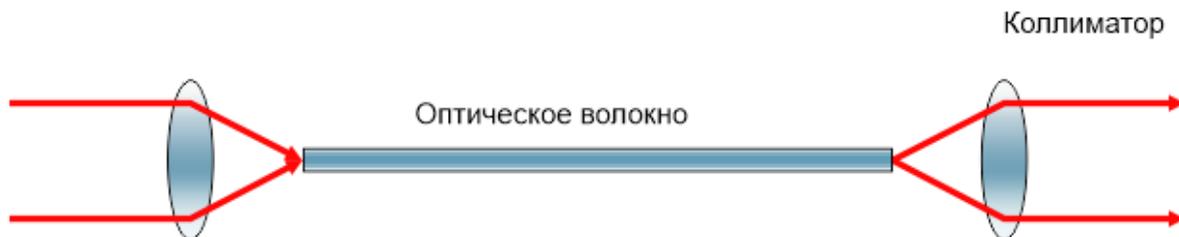


Рис. 8 – Схематическое изображение хода лучей на входе и выходе в оптическое волокно с использованием коллиматора

Пример использования полностью волоконного компенсационного ИМ в гидроакустической измерительной системе показан на рис. 9. Здесь представлены только два датчика на волоконных решетках Брэгга. Каждый датчик регистрирует изменение фазы света, проходящего от первого брэгговского отражателя до второго и обратно, при акустическом воздействии на оптическое волокно, которое находится между отражателями (зеркалами). Длины волокон между отражателями во всех датчиках в данном случае должны быть равны. Тогда можно провести компенсацию для всех датчиков одним ИМ, разность длин волокон которого должна быть равна длине волокна между отражателями.

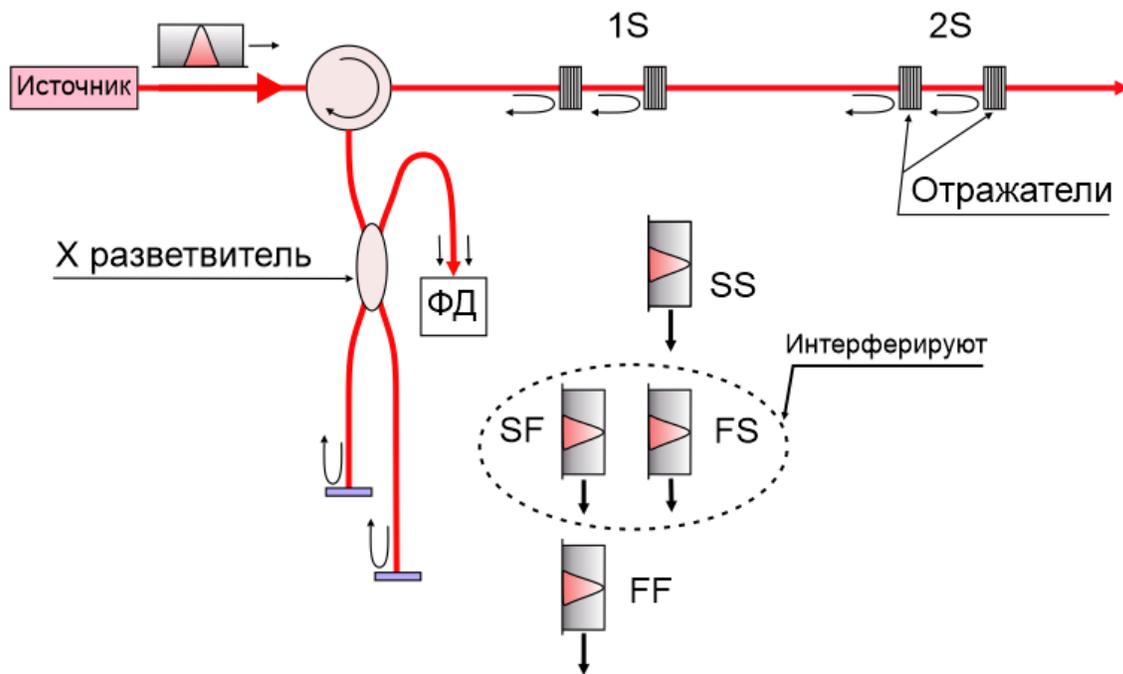


Рис. 9 – Схематическое изображение полностью волоконного компенсационного интерферометра Майкельсона в гидроакустической измерительной системе, где ФД – фотодиод, 1S и 2S – первый и второй брэгговские отражатели, SS – медленный-медленный цуг, SF – медленный-быстрый цуг, FS – быстрый-медленный цуг, FF – быстрый-быстрый цуг

1.4 Метод интерференции в белом свете для юстировки оптических компонентов измерительной схемы

Метод сканирующего компенсационного интерферометра Майкельсона широко используется для поляризационного согласования оптических элементов. Для получения хорошей видности V необходимо не только выровнять разность хода пучков с точностью до длины когерентности L_c , но и обеспечить одинаковое состояние их поляризации.

Известно, что пучки света с ортогональными поляризациями не интерферируют. В объемной оптике обеспечить сохранение поляризации пучка

достаточно просто. Оптическое волокно, к сожалению, не сохраняет состояние поляризации света, это приводит к тому, что состояние поляризации непрерывно изменяется при распространении света в волокне. Причем на эти изменения влияют внешние факторы, такие как температура, давление, механические вибрации и т.д.

Существуют двулучепреломляющие (ДЛП) волокна, в которых выделяют две перпендикулярные друг другу оси поляризации для света. Одна из них называется быстрая, другая медленная. Эффективный коэффициент преломления для света, поляризованного по быстрой оси, меньше, чем аналогичная величина для медленной оси. Однако линейная поляризация будет сохраняться только в том случае, если в волокно ввести свет с линейной поляризацией, которая ориентирована по оси двулучепреломления. Поэтому необходимо с большой точностью сориентировать оси двулучепреломления различных оптических элементов.

Пример согласования двух ДЛП волокон в точке A показан на рис. 10.

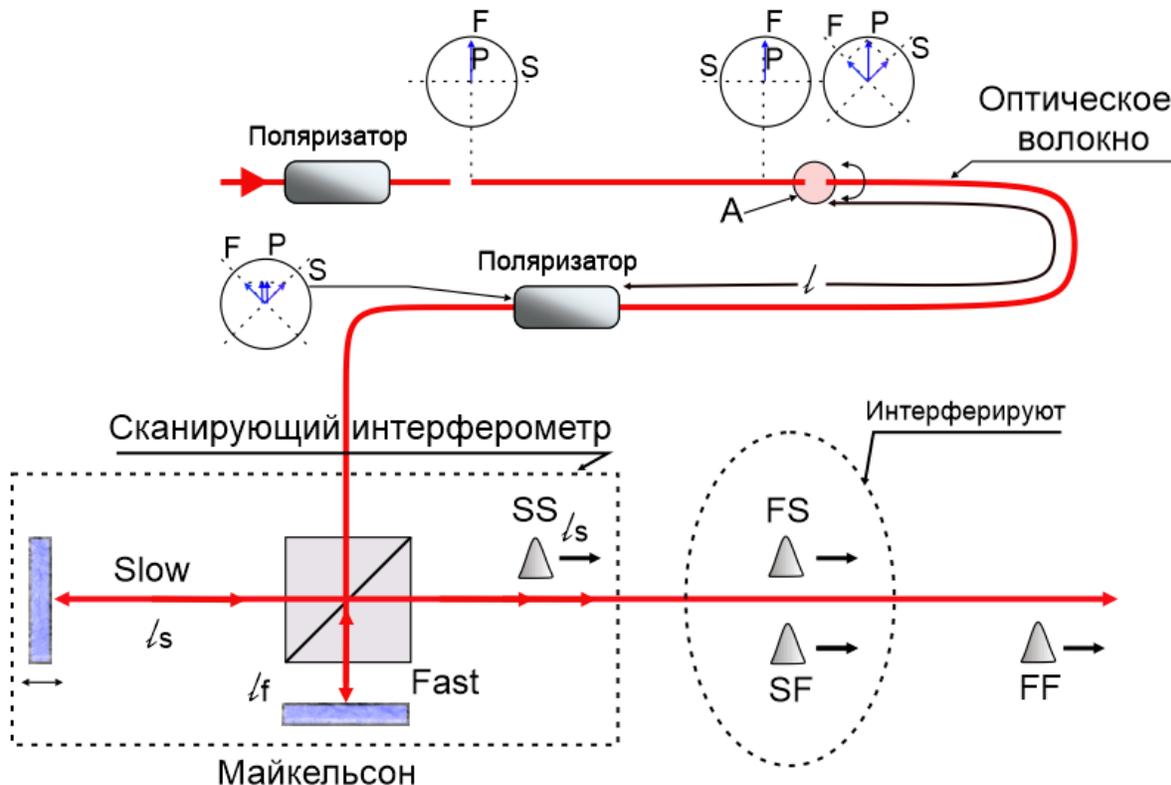


Рис. 10 – Схематическое изображение измерительной схемы с согласованием двух двулучепреломляющих волокон, где P – вектор поляризатора, S – медленная ось волокна, F – быстрая ось волокна, SS – медленный-медленный цуг, SF – медленный-быстрый цуг, FS – быстрый-медленный цуг, FF – быстрый-быстрый цуг, A – точка согласования двух ДЛП волокон, l_s , l_f – расстояние, пройденное медленным и быстрым цугом соответственно, l – длина оптического волокна

Для измерительной системы на рис. 10 можно записать

$$l * (n_s - n_f) = 2 * (l_s - l_f), \quad (10)$$

где l – длина оптического волокна, l_s , l_f – расстояние, пройденное медленным и быстрым цугом соответственно в ИМ, n_s , n_f – показатели преломления для медленного и быстрого цуга соответственно.

Если оси волокон в точке A не согласованы, то в приемном волокне длины l будут распространяться две моды – быстрая и медленная. До поляризатора между ними наберется разность хода $l(n_s - n_f)$.

Если подобрать условие компенсации, перемещая одно из зеркал, то после поляризатора оба цуга будут иметь одинаковую поляризацию и, пройдя сканирующий компенсационный ИМ, будут частично интерферировать. Условие компенсации представлено выражением (10).

После получения сигнала интерференции приступают к согласованию осей. Согласование осей в точке A заключается во вращении одного волокна вокруг своей оси, добиваясь при этом минимальной видности V . Таким способом удается согласовывать оси с точностью лучше, чем 0,1 градус.

С помощью этой схемы (рис. 10) также можно измерить разность показателей преломления $(n_s - n_f)$, зная l и $(l_f - l_s)$.

Зависимость видности интерференции от рассогласования зеркал ИМ показана на рис. 11. При нулевом рассогласовании зеркал ИМ видность достигает единицы, и спад определяется функцией когерентности источника. Два боковых лепестка представляют интерференцию быстрой и медленной мод в волокне длиной l . Желтым цветом показан случай, когда оси волокон согласованы лучше, чем для случая с синим цветом.

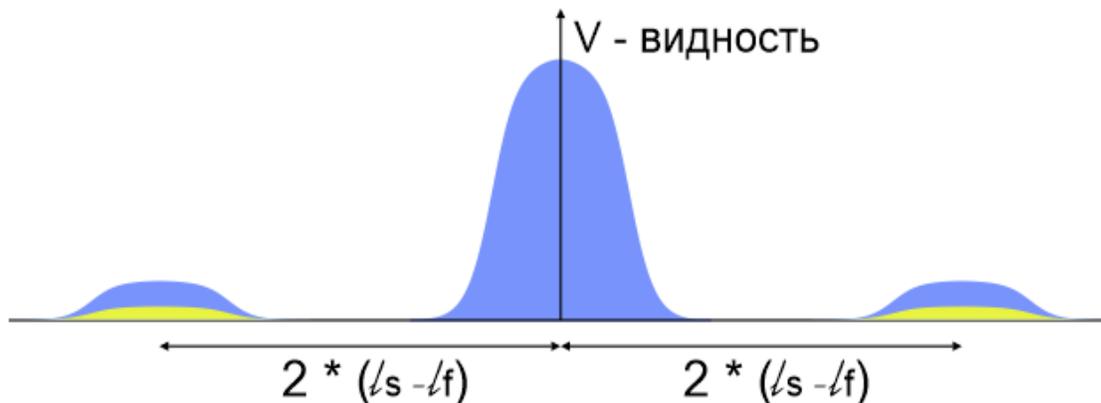


Рис. 11 – Схематическое изображение зависимости видности интерференции от рассогласования зеркал интерферометра Майкельсона

На рис. 12 показана схема согласования осей многофункциональной интегрально оптической схемы (МИОС) с волоконным контуром гироскопа.

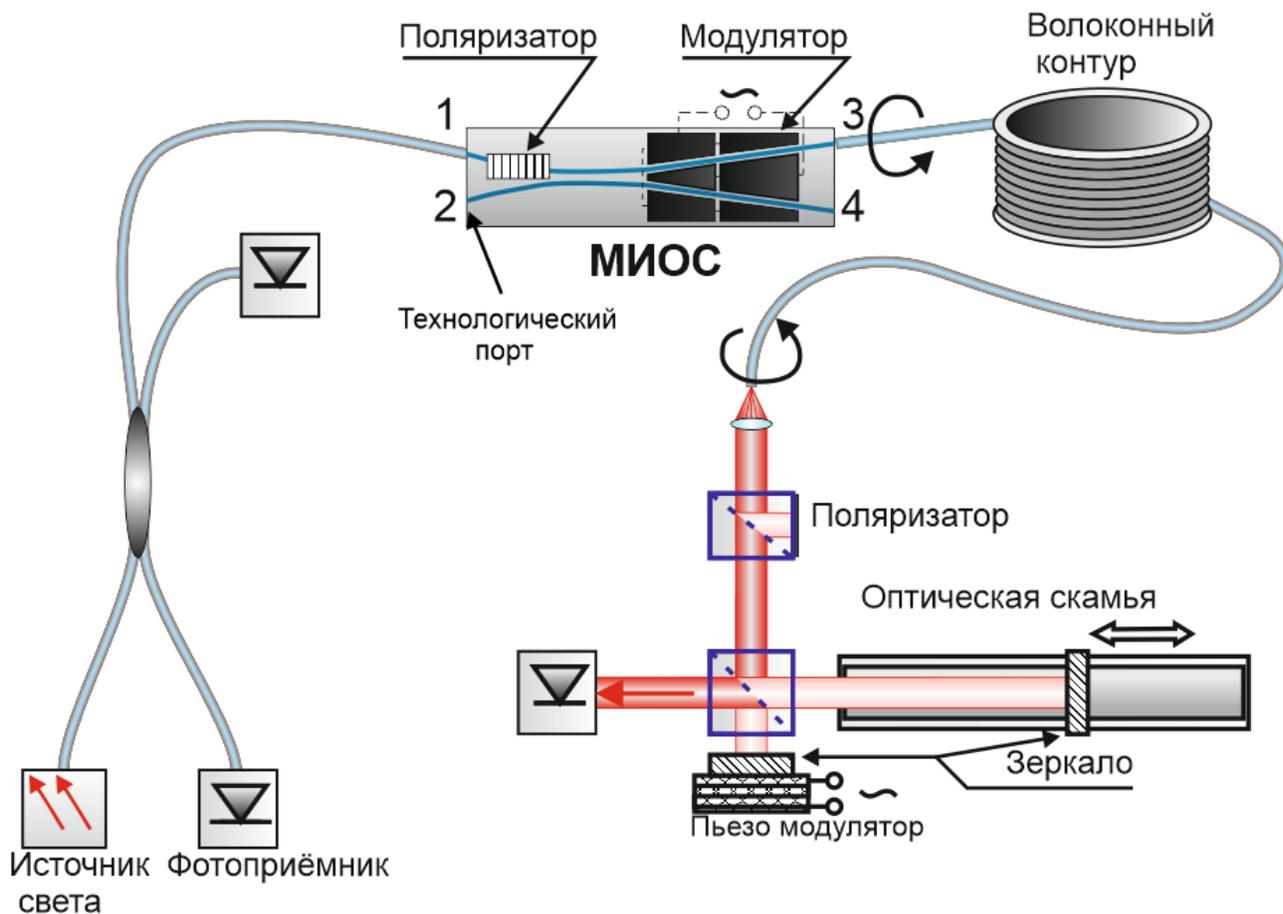


Рис. 12 – Схематическое изображение схемы согласования осей многофункциональной интегрально-оптической схемы (МИОС) с волоконным контуром гироскопа, где 1, 2, 3, 4 – порты X-разветвителя

1.5 Два режима работы двулучевого интерферометра

Рассмотрим работу интерферометра с опорным пучком, фаза которого Φ_2 не меняется во времени. Другой пучок представлен функцией Φ_1 (11):

$$\Phi_1 = \Phi_{1a} * \sin(\Omega_1 t) + \Phi_{10}, \quad (11)$$

где Φ_1 , Φ_2 – фаза первого и второго пучка соответственно, Φ_{1a} – амплитуда переменной составляющей, Φ_{10} – постоянная составляющая, Ω_1 – частота изменения фазы.

Зависимость интенсивности определяется выражениями (12.1, 12.2, 12.3):

$$I = (I_1 + I_2) \cdot [1 + \gamma \cdot \cos(\Phi_{1a} \cdot \sin \Omega_1 t + \Phi_{10} - \Phi_2)] =$$

$$= (I_1 + I_2) \cdot \left\{ \begin{array}{l} 1 + \gamma \cdot \cos(\Phi_{10} - \Phi_2) \cdot \left[J_0(\Phi_{1a}) + 2 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(\Phi_{1a}) \cdot \cos(2k\Omega_1 t) \right] \\ + \gamma \cdot \sin(\Phi_{10} - \Phi_2) \cdot \left[2 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k-1}(\Phi_{1a}) \cdot \sin((2k-1)\Omega_1 t) \right] \end{array} \right\} \approx$$

$$\approx (I_1 + I_2) \cdot [1 + \gamma \cdot \Phi_{1a} \cdot \sin(\Phi_{10} - \Phi_2) \cdot \sin(\Omega_1 t)], \quad (12.1)$$

$$\Phi_{1a} \ll 1, \quad (12.2)$$

$$J_1(\Phi_{1a}) \approx \frac{1}{2} \cdot \Phi_{1a}, \quad (12.3)$$

где I_1, I_2 – интенсивности пучков соответственно, γ – функция когерентности, $J_0(\Phi_{1a}), J_{2k}(\Phi_{1a})$ – коэффициенты гармоник - функции Бесселя.

Здесь представлено разложение по гармоникам частоты Ω_1 . Коэффициенты гармоник являются функциями Бесселя. Из вида зависимости интенсивности можно сделать вывод о двух вариантах измерений.

1. Можно измерять амплитуду колебаний фазы Φ_{1a} . При этом необходимо зафиксировать разницу фаз ($\Phi_{10}-\Phi_2$), т.е. рабочую точку, на величине $\pi/2 + 2\pi m$. При этом $\sin(\Phi_{10}-\Phi_2)$ равен 1, и чувствительность по первой гармонике будет максимальна.
2. Можно зафиксировать амплитуду модулятора Φ_{1a} на уровне 1,8 (при этом $J_1(\Phi_{1a})$ максимальна и равна 0,58). Это позволяет измерять медленные изменения разности фаз ($\Phi_{10}-\Phi_2$).

Первый вариант используется в гидроакустических датчиках, второй вариант – в волоконно-оптическом гироскопе. Продемонстрировать первый вариант с различными рабочими точками можно графически (рис. 14). На этом рисунке показаны одновременно три зависимости:

1. Зависимости интенсивности интерференции от разности фаз.
2. Зависимость изменения фазы частотой f_1 от времени для двух рабочих точек 0 и $\pi/2$.
3. Зависимость интенсивности от времени для двух рабочих точек 0 и $\pi/2$.

Из рис. 14 следует, что при нулевой рабочей точке (13) в сигнале интенсивности от времени отсутствует первая гармоника частоты f_1 :

$$\Phi_{10} - \Phi_2 = 0, \quad (13)$$

при этом присутствует вторая гармоника (14):

$$f_2 = 2 * f_1. \quad (14)$$

При смещении рабочей точки в точку квадратуры (15) амплитуда сигнала первой гармоники максимальна, так **измеряется амплитуда сигнала частоты f_1** .

$$\Phi_{10} - \Phi_2 = \frac{\pi}{2} \quad (15)$$

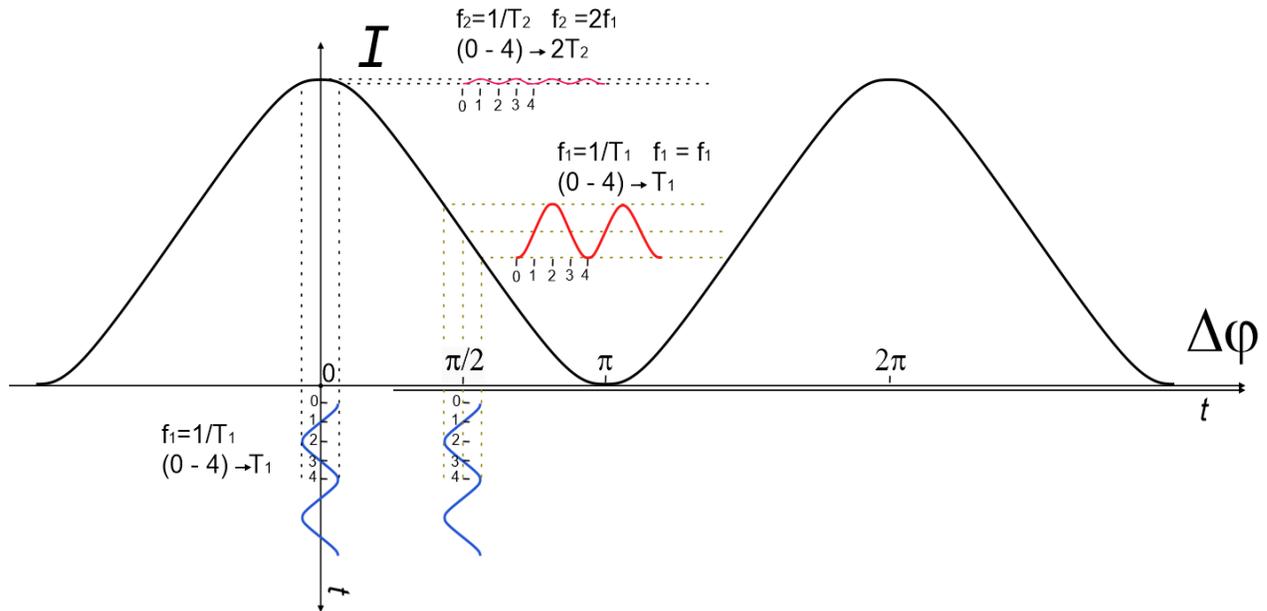


Рис. 14 – График зависимости интенсивности от времени. Первый вариант измерения интенсивности

Во втором варианте можно использовать принудительную модуляцию для смещения рабочей точки в точку квадратуры (рис. 15а, рис. 15б).

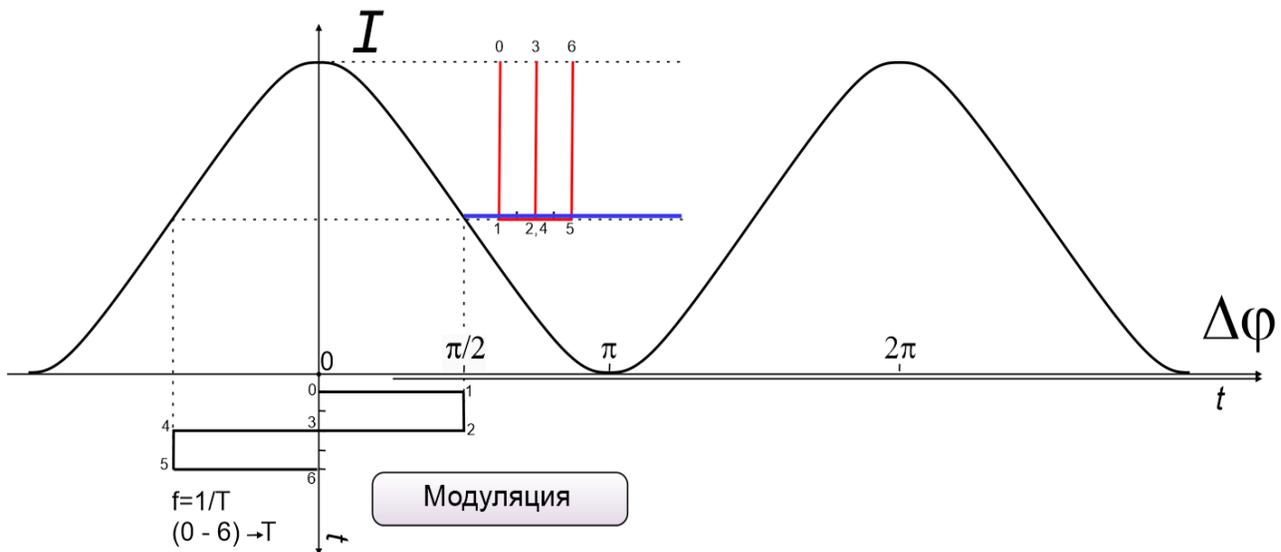


Рис. 15а – График зависимости интенсивности от времени. Второй вариант измерения интенсивности

В случае выражения (13) сигнал первой гармоники частоты модуляции равен нулю, если не принимать во внимание острые “прямые”, показанные красным цветом на рис. 15б, которые легко отфильтровываются.

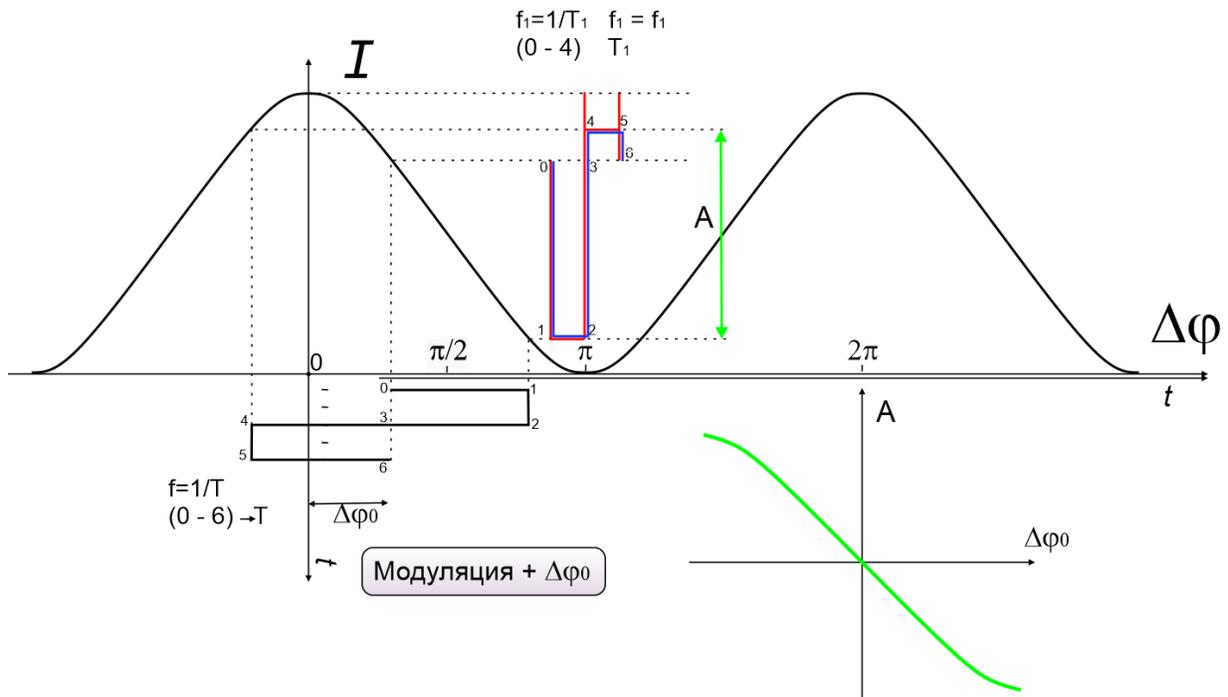


Рис. 15б – График зависимости интенсивности от времени. Второй вариант измерения интенсивности

Таким образом, регистрируя амплитуду первой гармоники частоты модуляции, можно измерять разность фаз.

1.6 Интерферометр Саньяка. Волоконно-оптический гироскоп

Оптическая схема интерферометра Саньяка (ИС) показана на рис. 16.

Здесь в оптическом контуре интерферируют два пучка света, распространяющиеся навстречу друг другу. Один распространяется по часовой стрелке “с”, другой против часовой стрелки “сс”. Необходимо обратить внимание на наличие двух портов на выходе контура – один взаимный, а другой невзаимный. Объяснение этого аналогично рассмотренному для интерферометра Майкельсона в п. 1.1.

Для смещения рабочей точки интерферометра Саньяка в точку квадратуры в волоконный контур устанавливается фазовый модулятор (рис. 17).

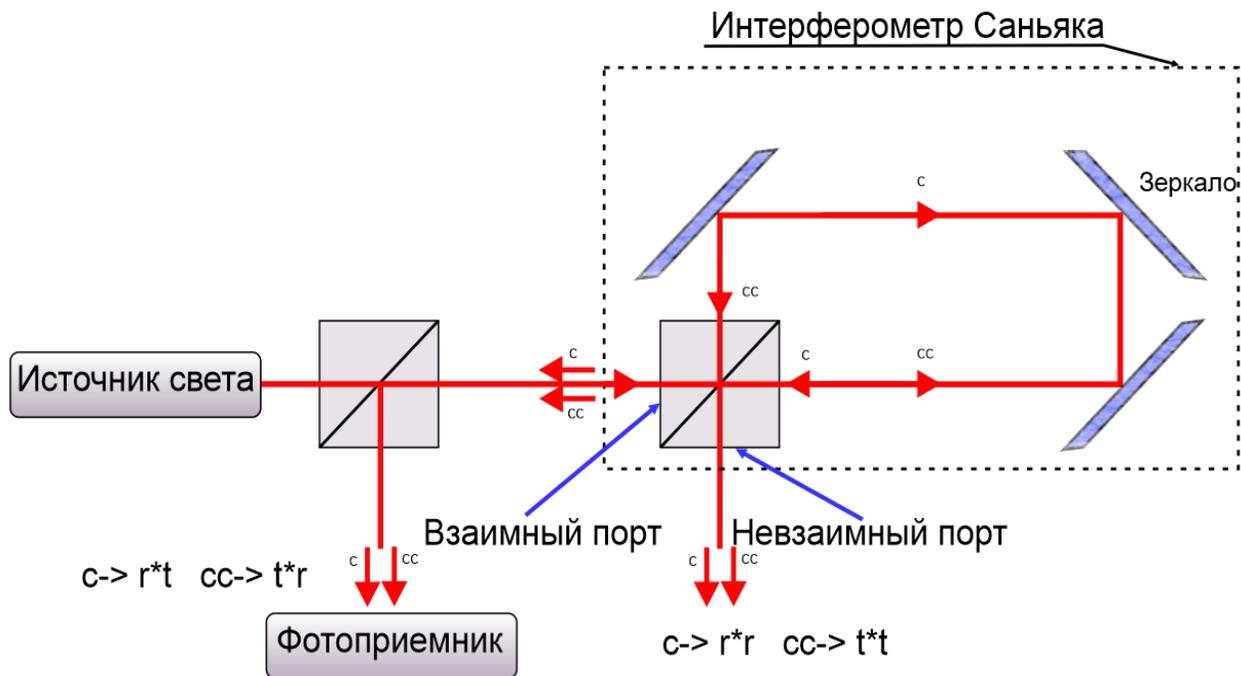


Рис. 16 – Схематическое изображение интерферометра Саньяка

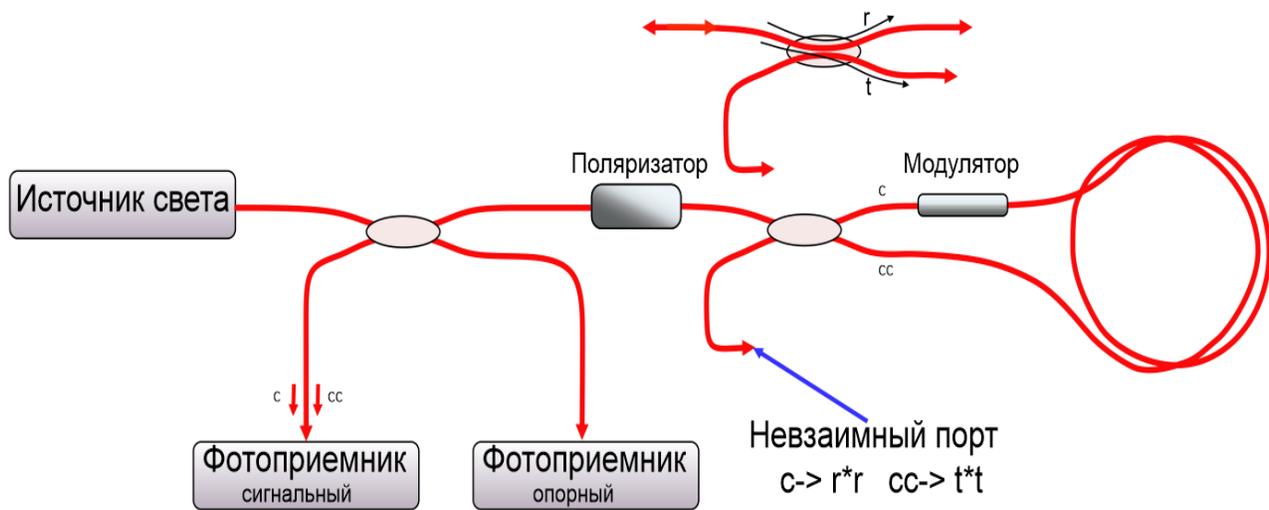


Рис. 17 – Схематическое изображение волоконно-оптического гироскопа с фазовым модулятором

Принцип работы ИС и волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) объясняется на рис. 18 и уравнениями (17.1 – 17.7).

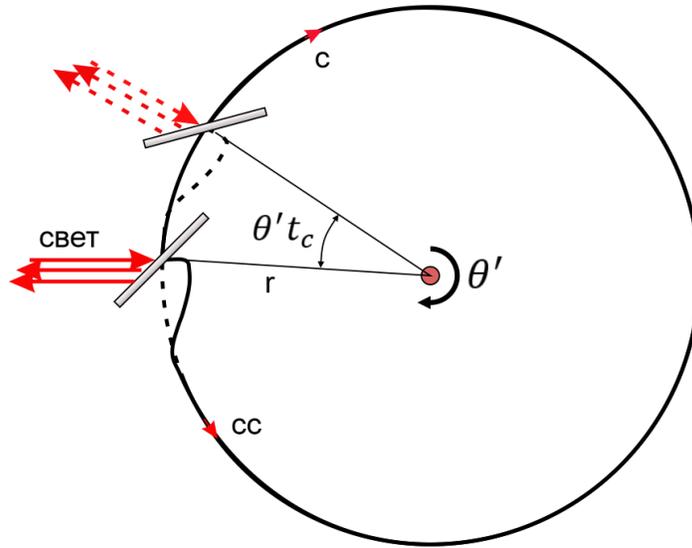


Рис. 18 – Принцип работы интерферометра Саньяка и волоконно-оптического гироскопа, где θ' – угловая скорость вращения

При вращении контура с угловой скоростью θ' волны c и cc проходят разные пути L_c и L_{cc} соответственно, так как от момента входа до момента выхода из контура место выхода успевает переместиться. В итоге возникает разность фаз между встречными волнами $\Delta\Phi_R$, которая пропорциональна угловой скорости вращения, площади контура и обратно пропорциональна длине волны света.

$$L_c = 2\pi r + r\theta' t_c = c \cdot t_c, \quad (17.1)$$

$$L_{cc} = 2\pi r - r\theta' t_{cc} = c \cdot t_{cc}, \quad (17.2)$$

$$t_c = \frac{2\pi r}{(c - r\theta')}, \quad (17.3)$$

$$t_{cc} = \frac{2\pi r}{(c + r\theta')}, \quad (17.4)$$

$$\Delta t = t_c - t_{cc} = \left(\frac{2\pi r}{c^2}\right) \cdot 2r\theta' = \frac{4A \cdot \theta'}{c^2}, \quad (17.5)$$

$$\Delta L = \frac{4A \cdot \theta'}{c}, \quad (17.6)$$

$$\Delta\Phi_R = \omega \cdot \Delta t = \frac{2\pi c}{\lambda} \cdot \frac{4A \cdot \theta'}{c^2} = \frac{8\pi \cdot A \cdot \theta'}{\lambda \cdot c} \quad (17.7)$$

Также необходимо иметь в виду, что в формулу входит скалярное произведение векторов угловой скорости вращения и площади контура (рис. 19, выражение 18).

$$\Delta\Phi_R = \omega \cdot \Delta t = \frac{8\pi \cdot A \cdot \theta'}{\lambda \cdot c} = \frac{8\pi \cdot A \cdot \theta'}{\lambda \cdot c} \cdot \cos(\beta) \quad (18)$$

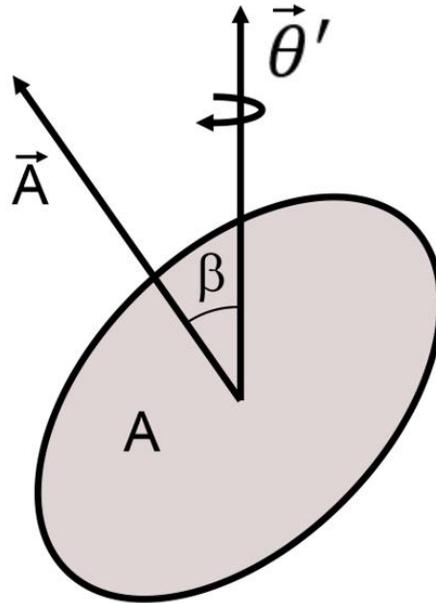


Рис. 19 – Схематическое изображение с использованием угла β

Использование ВОГ позволяет увеличить чувствительность интерферометра Саньяка в N раз (19):

$$\Delta\Phi_R = \frac{8\pi N \cdot A \cdot \theta'}{\lambda \cdot c} = \frac{2\pi L \cdot D \cdot \theta'}{\lambda \cdot c}, \quad (19)$$

где N – число витков волоконного контура, L – длина оптического волокна, D – диаметр намотки катушки оптического волокна.

Угловая скорость, дающая сдвиг фаз π в диапазоне однозначности $(-\pi; +\pi)$, определяется выражением (20):

$$\theta'_{\pi} = \frac{\lambda \cdot c}{2L \cdot D}. \quad (20)$$

Угловая скорость, дающая сдвиг фаз микрорадиан, определяется выражением (21):

$$\theta'_{\mu} = \frac{\theta'_{\pi}}{\pi \cdot 10^6}. \quad (21)$$

Приведем примеры расчетов для двух волоконно-оптических гироскопов.

Пример 1.

Дано: $L=10$ км, $D=30$ см, $N \cdot A=750$ м², $\lambda=1,55$ мкм

Решение:

$$\theta'_{\pi} = 0.0775 \text{ rad/s} = 4.4 \text{ deg/s}$$

$$\theta'_{\mu} = 0.005 \text{ deg/h}$$

Пример 2.

Дано: $L=1$ км, $D=10$ см, $N \cdot A=25$ м², $\lambda =1,55$ мкм

Решение:

$$\theta'_{\pi} = 130 \text{ deg/s}$$

$$\theta'_{\mu} = 0.15 \text{ deg/h}$$

Здесь θ'_{π} дает угловую скорость, при которой достигается сдвиг фаз π , а θ'_{μ} определяет угловую скорость, при которой достигается сдвиг фаз на один микрорадиан, что является вполне измеряемой величиной.

Для получения сдвига в точку квадратуры используется фазовый модулятор. Поскольку две встречные волны проходят в контуре по одному пути, необходимо воспользоваться тем, что скорость распространения свет конечна. Модулятор устанавливают в начале одного плеча волоконного контура. Используют и иной метод: устанавливают по одному модулятору в каждом плече, включая их в противофазе.

Частота работы модулятора должна быть равна (22)

$$f_m = \frac{1}{2\tau}, \quad (22)$$

где τ – время пробега света по контуру.

При этом условии (22) частота модулятора называется собственной частотой волоконного контура.

На рис. 20 а и рис. 20 б представлены два варианта временных диаграмм, на которых показаны сдвиги фаз, вносимые модулятором в каждую волну, и их разность фаз.

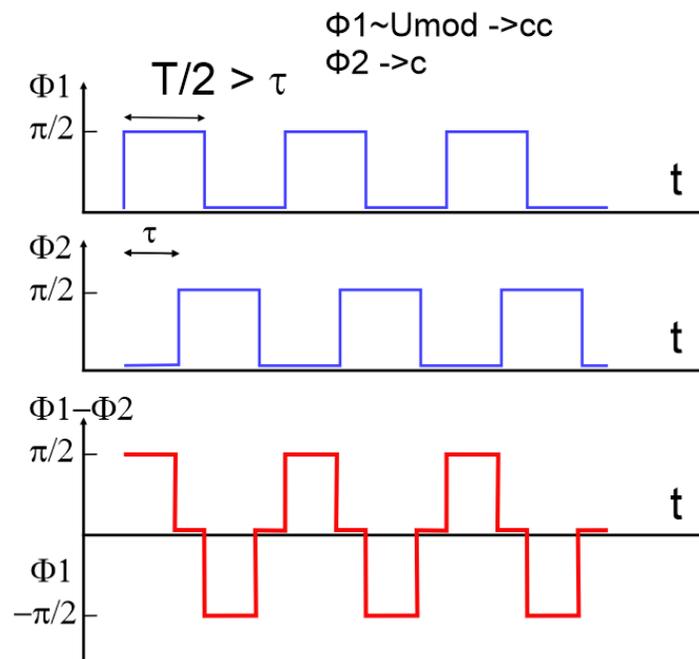


Рис. 20 а – Временная диаграмма. Первый вариант

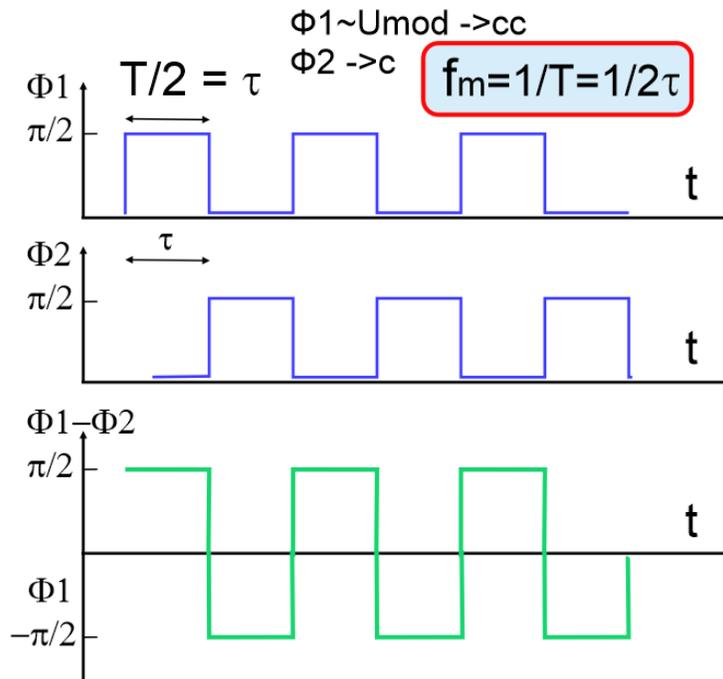


Рис. 20 б – Временная диаграмма. Второй вариант

В первом случае частота модулятора не является собственной, и из-за появления временных интервалов разность фаз равна нулю. Во втором случае частота модулятора является собственной, и в разности фаз таких нулевых интервалов нет.

Зависимость интенсивности интерференции от угловой скорости вращения с использованием модулятора определяется выражением (23):

$$I_i = \left(I_i/2\right) \cdot \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta L \pm \frac{\pi}{2}\right)\right] = \left(I_i/2\right) \cdot \left[1 \mp \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta L\right)\right]. \quad (23)$$

Здесь разность ΔL зависит от угловой скорости вращения (24):

$$\Delta L = \frac{4A \cdot N \cdot \theta'}{c} = \frac{L \cdot D \cdot \theta'}{c}. \quad (24)$$

Синусоидальная зависимость сигнала от угловой скорости вращения позволяет измерять в линейном режиме только малые угловые скорости. Кроме того, периодический характер синуса дает дополнительные проблемы. Для расширения динамического диапазона используется обратная связь, возвращающая интерферометр в квадратурную точку, а полезной информацией становится величина сигнала обратной связи рис. 21.

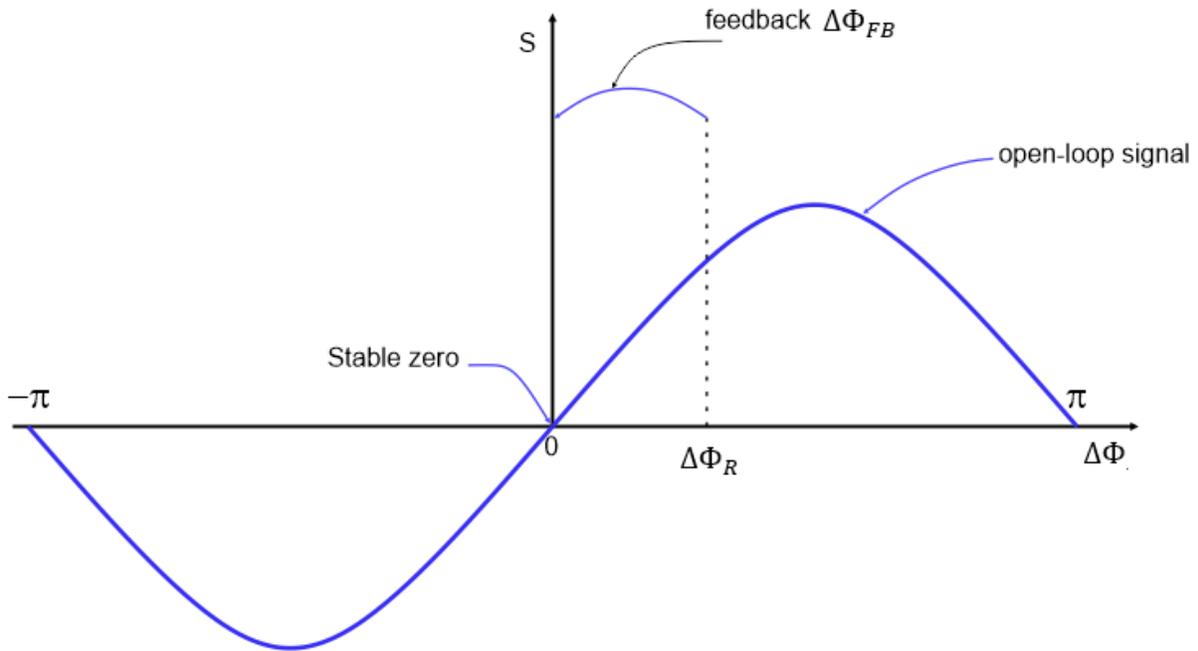


Рис. 21 – Схематическое изображение варианта использования расширения динамического диапазона с помощью обратной связи

Для создания обратной связи используется фазовая пилообразная модуляция рис. 22.

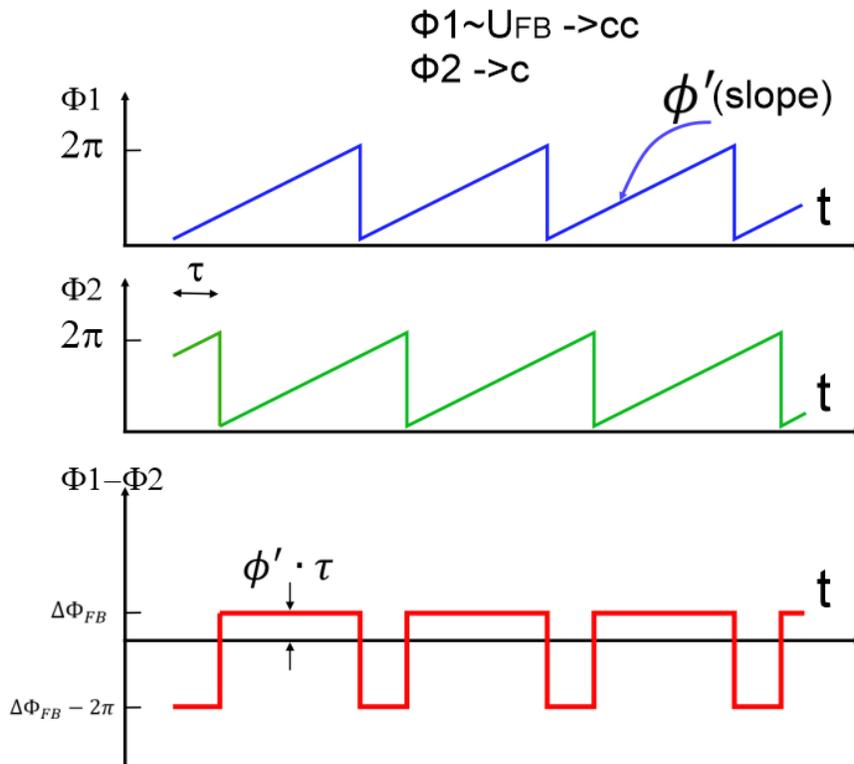


Рис. 22 – Схематическое изображение способа создания обратной связи, используя фазовую пилообразную модуляцию

Проанализировав рис. 22, можно сделать вывод, что амплитуда пилообразного напряжения должна стабилизироваться на уровне 2π . Хотя разность фаз ($\Phi_1 - \Phi_2$) не является постоянной величиной, а максимальные и минимальные значения отличаются на 2π , при этом синус от этих значений будет давать одинаковый результат. Чем больше угловая скорость вращения, тем больше наклон пины и тем больше величина обратной связи.

Необходимо понимать, что пилообразная форма напряжения, показанная на рис. 23, будет иметь место только при постоянной угловой скорости вращения. При изменении скорости вращения форма напряжения будет существенно сложнее.

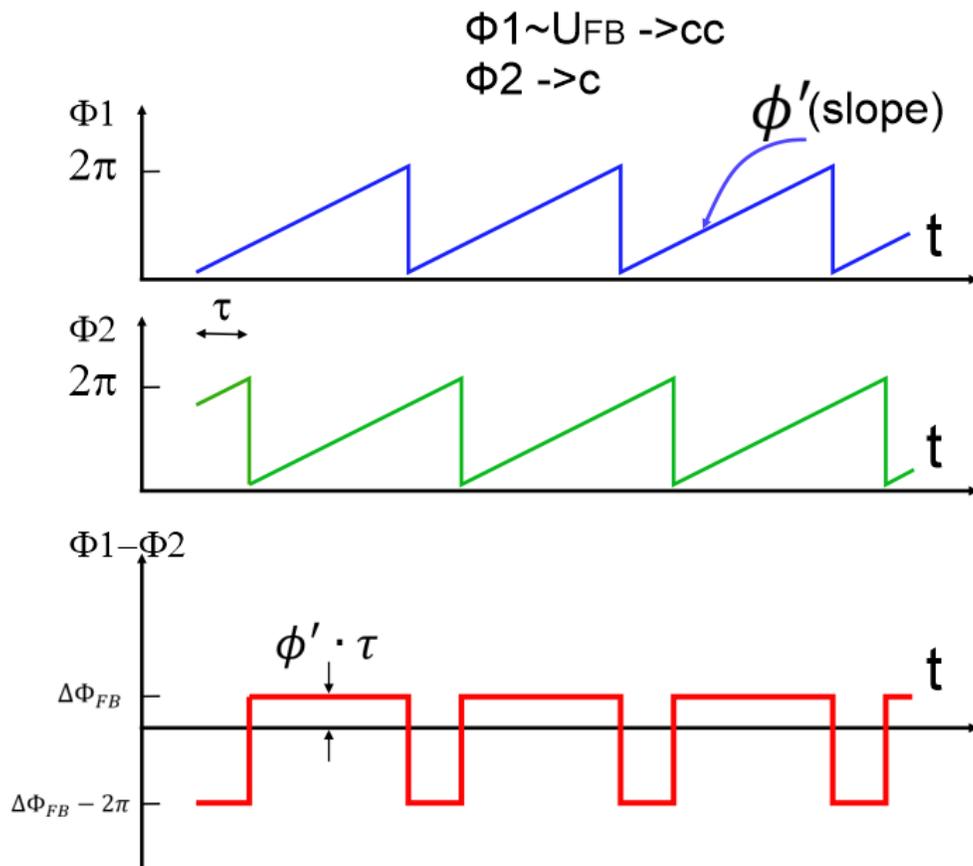


Рис. 23 – Пилообразная форма напряжения

Модулятор пилообразного напряжения должен быть установлен дополнительно к основному модулятору (рис. 24).

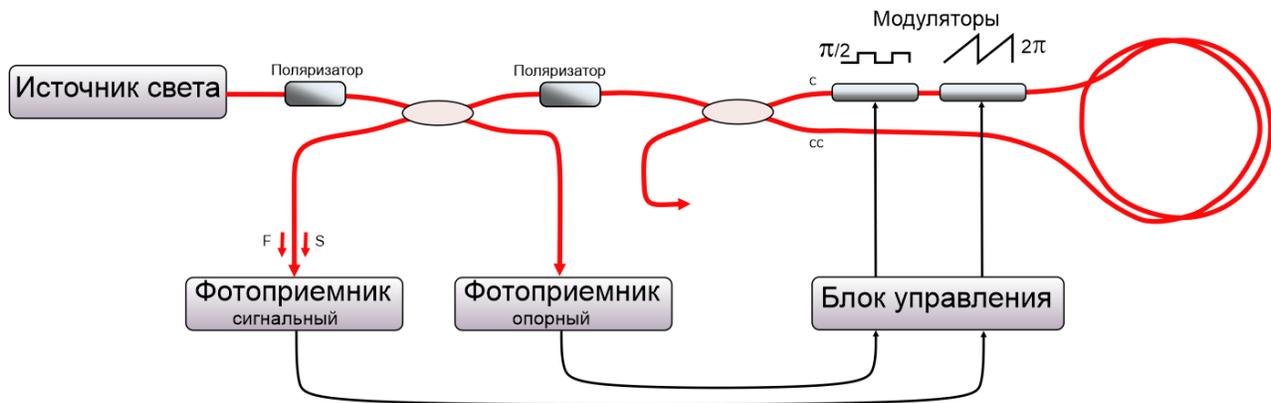


Рис. 24 – Схематическое изображение волоконно-оптической схемы с использованием дополнительного модулятора

Упрощенная схема генератора пилообразного напряжения показана на рис. 25.

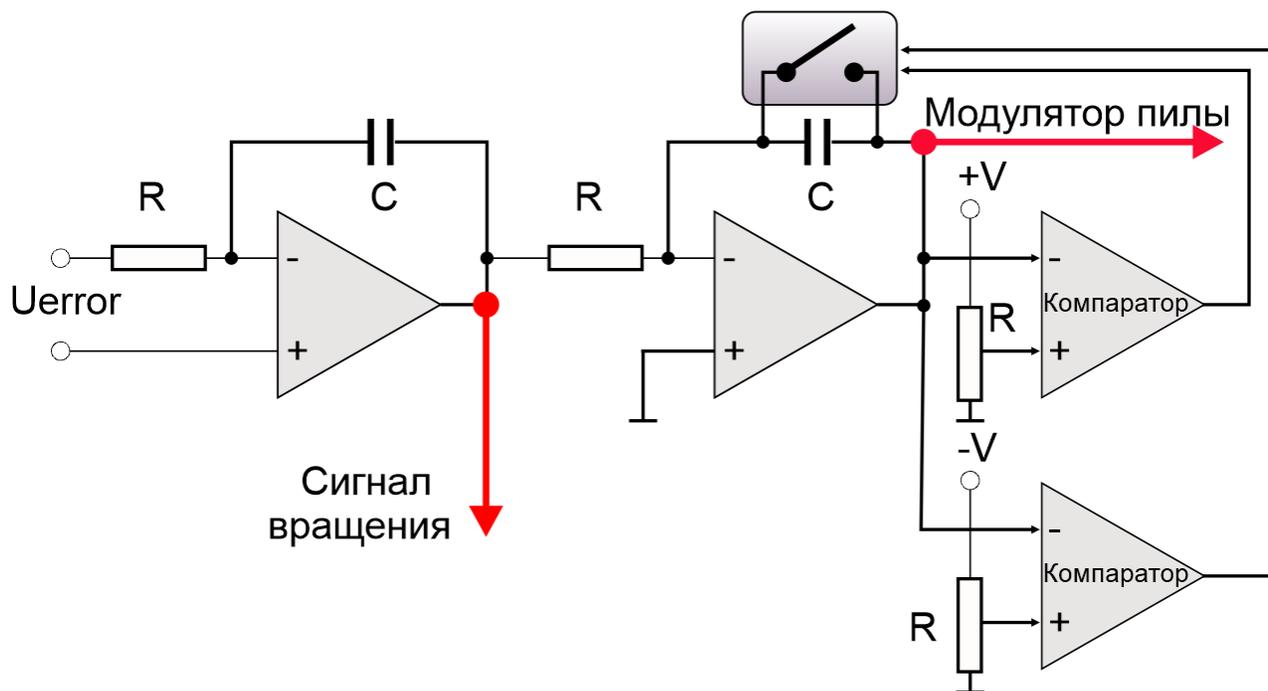


Рис. 25 – Схематическое изображение упрощенной схемы генератора пилообразного напряжения

На вход подается сигнал ошибки, пропорциональный амплитуде первой гармоники основного модулятора. Если этот сигнал не равен нулю, то изменяется сигнал на выходе первого операционного усилителя. Это напряжение определяет скорость заряда конденсатора, который установлен в обратной связи второго усилителя, что и определяет скорость нарастания пилообразного напряжения.

1.7 Волоконно-оптический измеритель магнитного поля (электрического тока)

В данной схеме (рис. 26) регистрируется интерференция между двумя ортогональными поляризациями двулучепреломляющего волокна. Два оптических волокна между точками AB и CD являются двулучепреломляющими. Две ортогональные основные моды этих волноводов линейно поляризованы. **Одна линейно поляризованная мода называется быстрой, так как её эффективный показатель преломления меньше эффективного показателя преломления так называемой медленной моды.** Обе моды возбуждаются в точке A и модулируются по фазе в модуляторе двулучепреломления.

Модулятор имеет такое название, так как он обладает разным коэффициентом модуляции для медленной и быстрой мод. В точке D эти две моды падают на четвертьволновую пластинку, сориентированную таким образом, чтобы на её выходе получить две круговые ортогональные поляризации (у них вектор электрического поля вращается в противоположных направлениях).

Оптическое волокно, установленное между точкой E и зеркалом, обладает циркулярным двулучепреломлением, т.е. его собственные моды являются модами с круговой поляризацией, обладая при этом разными эффективными коэффициентами преломления. Это так называемое SPUN волокно. Под действием магнитного поля, вызванного электрическим током, протекающим по проводнику между ортогональными модами, изменяется разность фаз. Эта разность фаз линейно зависит от приложенного магнитного поля вследствие эффекта Фарадея. Поскольку **эффект Фарадея является невзаимным**, при отражении от зеркала и распространяясь в обратном направлении разность фаз удваивается.

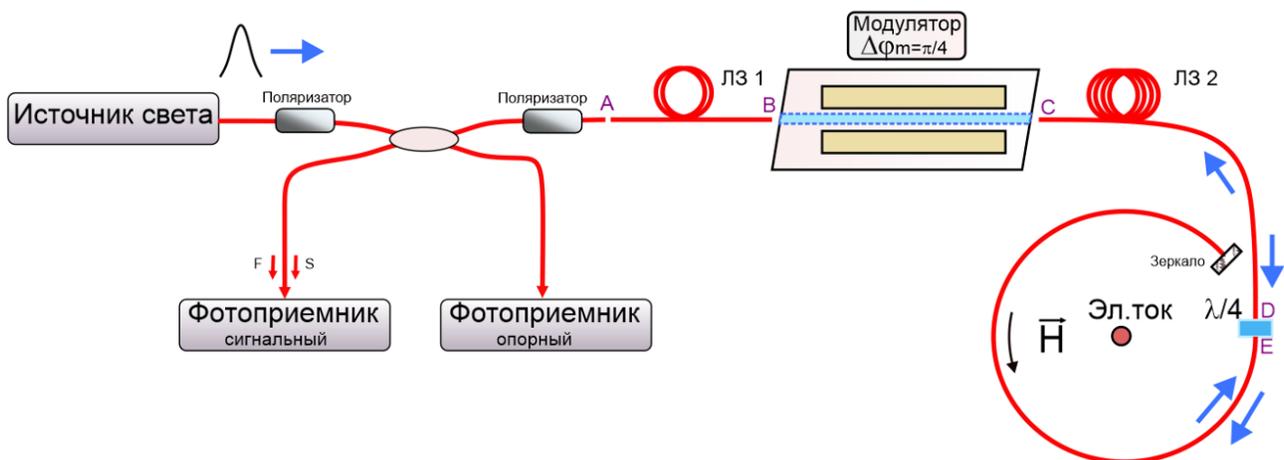


Рис. 26 – Оптическая схема измерителя тока

Подробно преобразование поляризаций и цугов можно увидеть на рис. 27.

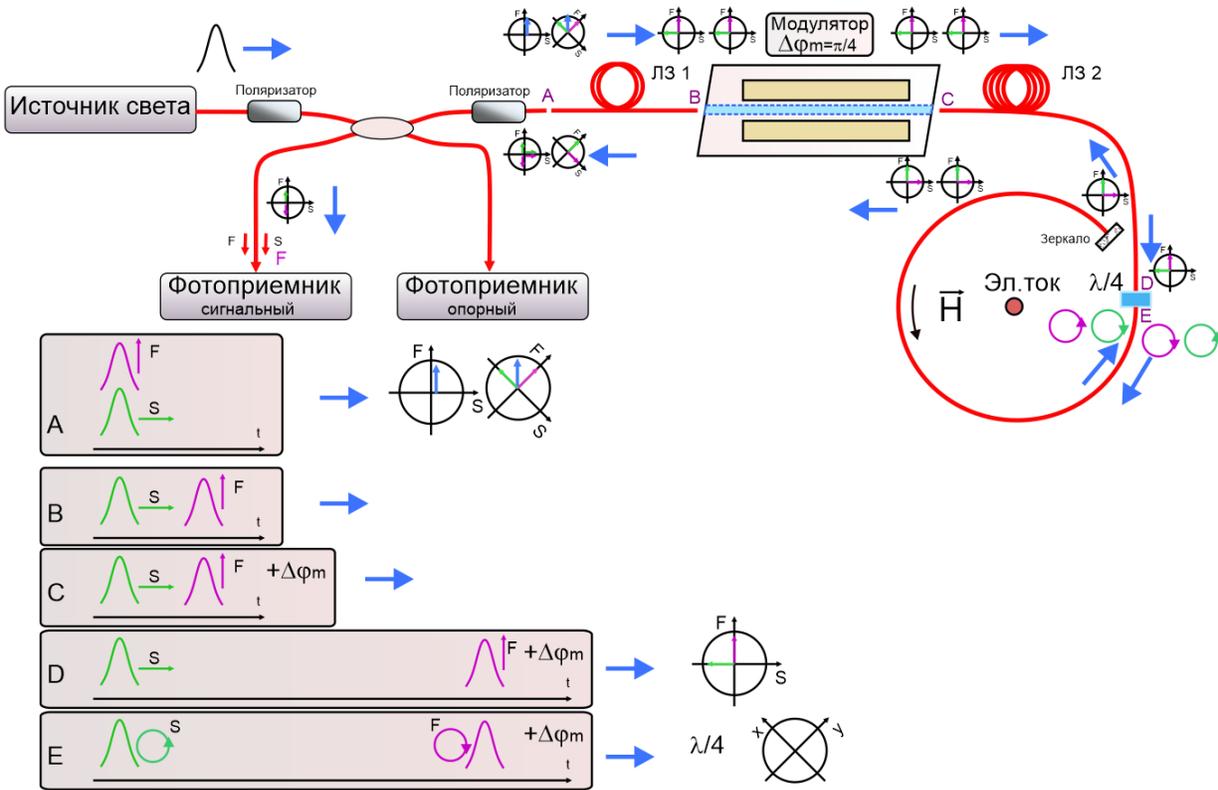


Рис. 27 – Оптическая схема преобразования поляризаций и цугов

В точке *A* линейно-поляризованный свет (синяя стрелка) вводится в оптическое волокно (ОВ) так, чтобы плоскость поляризации составляла угол 45° с поляризационными осями ОВ (зеленая и фиолетовая стрелки).

В этой схеме используется источник света с широким спектром, и его можно представить в виде цуга. В точке *B* цуги с линейными ортогональными поляризациями расходятся и проходят модулятор в своей поляризации, приобретая дополнительный сдвиг фаз между собой $\Delta\varphi_m = \pi/4$ в точке *C*.

Далее в точке *D* цуги дополнительно расходятся. После четвертьволновой пластинки (в точке *E*) каждая линейная поляризация преобразуется в круговую. Распространяясь до зеркала и обратно, они приобретают сдвиг фаз Фарадея $\Delta\varphi_F$, который пропорционален силе электрического тока.

Обратный ход цугов показан на рис. 28.

После четвертьволновой пластинки каждая круговая поляризация преобразуется в линейную со сменой поляризации. Поляризация, которая была быстрой при распространении к зеркалу (вертикальная фиолетовая), обратно распространяется как медленная (горизонтальная фиолетовая). Поэтому в точке *C* два цуга будут сходиться.

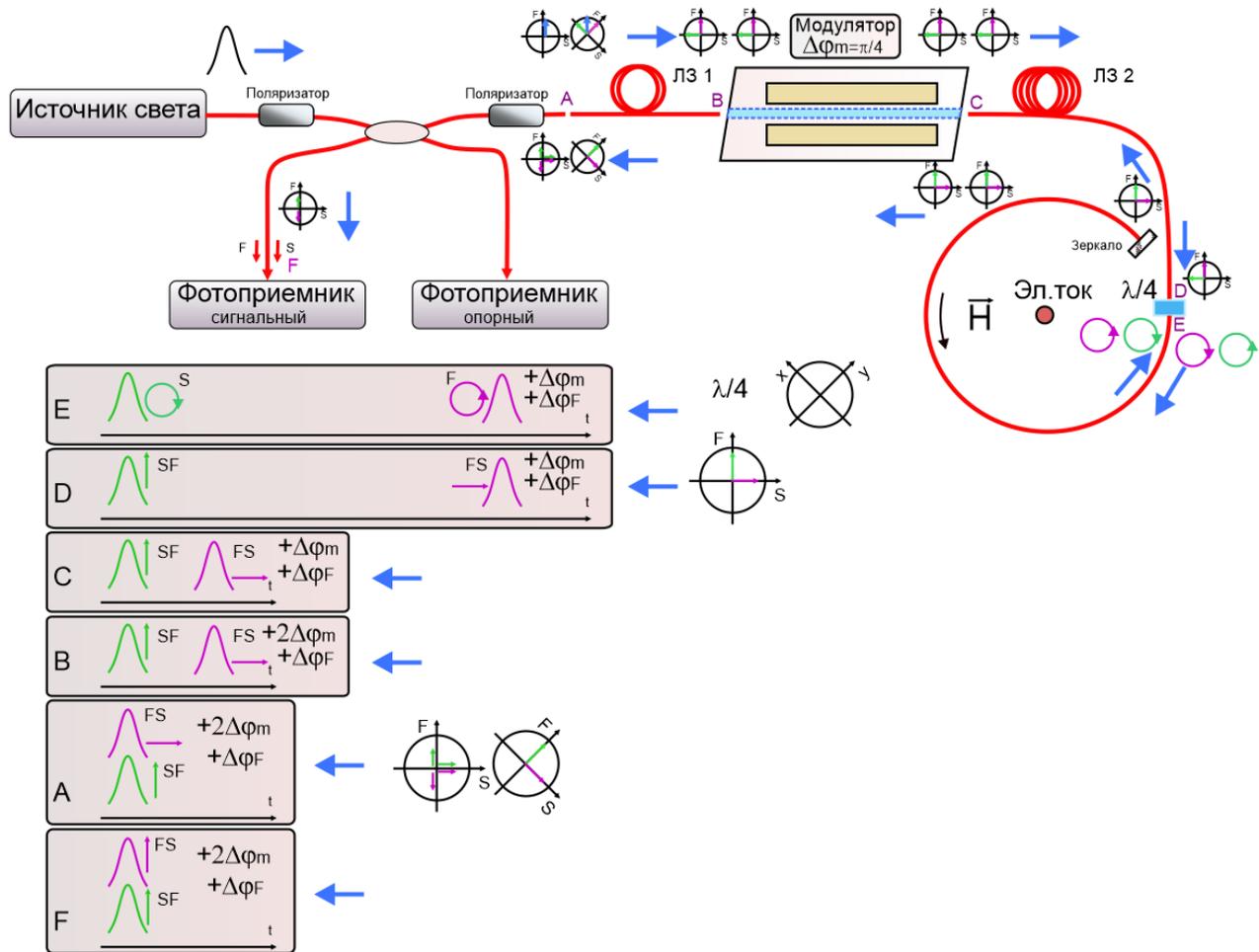


Рис. 28 – Оптическая схема преобразования поляризаций и цугов в обратном направлении

При частоте модулятора, указанной в выражении (25), за время прохода туда и обратно (2τ) полярность модулятора сменится на противоположную, и разность фаз, вносимая модулятором, удвоится и станет равна (26):

$$f_m = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\tau} \quad (25)$$

$$2 * \Delta\varphi_m = \frac{\pi}{2} \quad (26)$$

Это необходимо для сдвига рабочей точки интерферометра в квадратурную точку. Далее в точке *A* происходит дальнейшее схождение цугов, они могли бы интерферировать, если бы не были ортогональны по поляризации.

Пройдя поляризатор и потеряв половину своей мощности, цуги оказываются в одной поляризации и интерферируют. Результат интерференции регистрирует сигнальный фотоприёмник. Короткая линия задержки (ЛЗ1) необходима для разделения ортогональных цугов перед модулятором. Это уменьшает переходные помехи в модуляторе. Длинная линия задержки (ЛЗ2) устанавливается для

увеличения времени прохождения света до зеркала τ , чтобы снизить частотные требования к модулятору и электронике.

1.8 Синхронный усилитель (детектор)

Во многих случаях, когда передатчик и приемник находятся в одном месте, используется синхронное детектирование, позволяющее значительно увеличить отношение сигнала к шуму. Синхронный усилитель (детектор) работает как избирательный фильтр. Упрощенная схема показана на рис. 30.

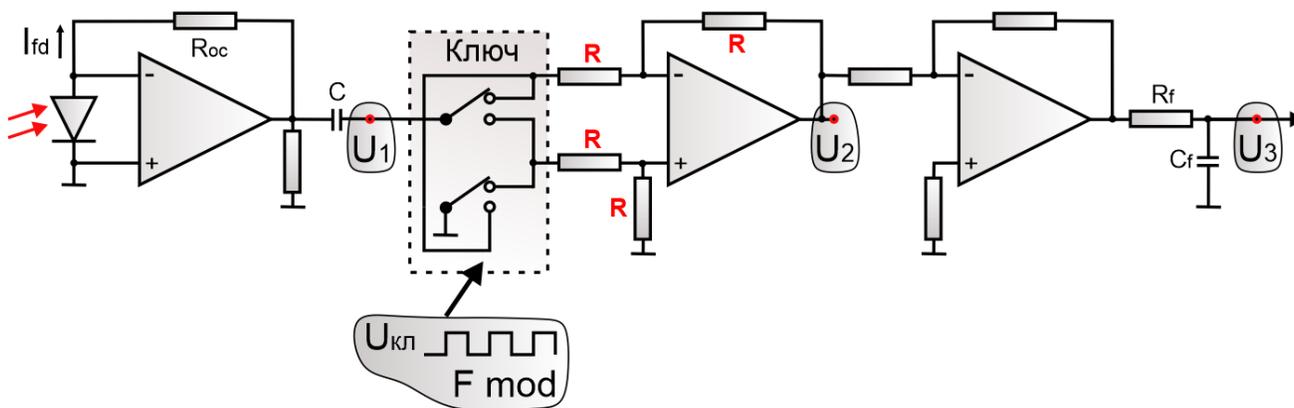


Рис. 29 – Упрощенная схема синхронного усилителя

Первый трансимпедансный усилитель преобразует ток фотодиода в напряжение на его выходе U_1 . Второй трансимпедансный усилитель позволяет переключать его работу с неинвертирующего режима в инвертирующий с помощью электронных ключей на входе. Частота управляющего напряжения F_{mod} равна частоте принимаемого сигнала. На выходе третьего усилителя стоит фильтр нижних частот.

Временные зависимости представлены на рис. 30 для случаев, когда частота сигнала равняется F_{mod} и $2F_{mod}$.

Для частоты сигнала, равной F_{mod} , на выходе U_3 имеется сглаженный сигнал одной полярности, которая зависит от положения фазы F_s относительно напряжения на ключах $U_{кп}$.

Для частоты сигнала, равной $2F_{mod}$, на выходе U_3 результат будет знакопеременным и близок к нулю. Вторая гармоника сигнала фильтруется.

Фильтрация шума частоты F_n показана на рис. 31. Между сигналами с частотами F_n и F_{mod} будут биения с частотой ΔF .

Слева F_n и F_{mod} находятся в фазе, а справа, через полпериода частоты биений, в противофазе. Если постоянная времени фильтра нижних частот достаточно большая, то сигнал на выходе U_3 будет равен нулю. Если же постоянная времени фильтра нижних частот сравнима с периодом частоты биений, то на выходе U_3 будет знакопеременный сигнал, и помеха не фильтруется.

Таким образом, выбирая постоянную времени фильтра нижних частот, можно регулировать полосу фильтрации синхронного детектора. Например, для ВОГ с частотой модуляции 100 кГц можно легко сделать полосу пропускания синхронного детектора 0,1 Гц и менее.

Отношение частоты к полосе пропускания в этом случае будет 10^6 , что не реально осуществить с помощью обычных LC-фильтров.

Кроме того, для синхронного детектирования нет необходимости стабилизировать центральную частоту фильтра с частотой сигнала. Синхронное детектирование широко используется как в фазовых, так и в других типах датчиков.

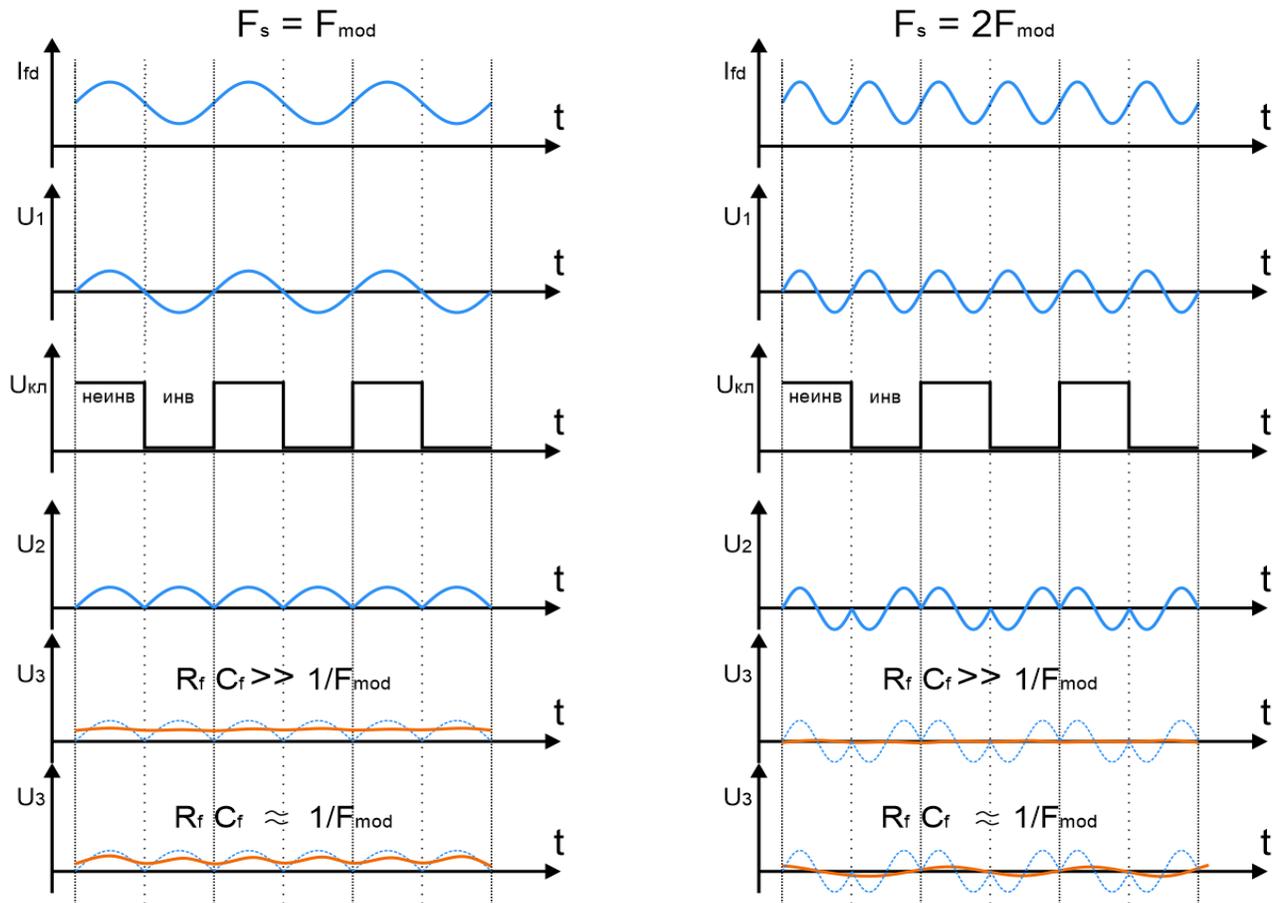


Рис. 30 – Временные зависимости для случаев с различной частотой сигнала

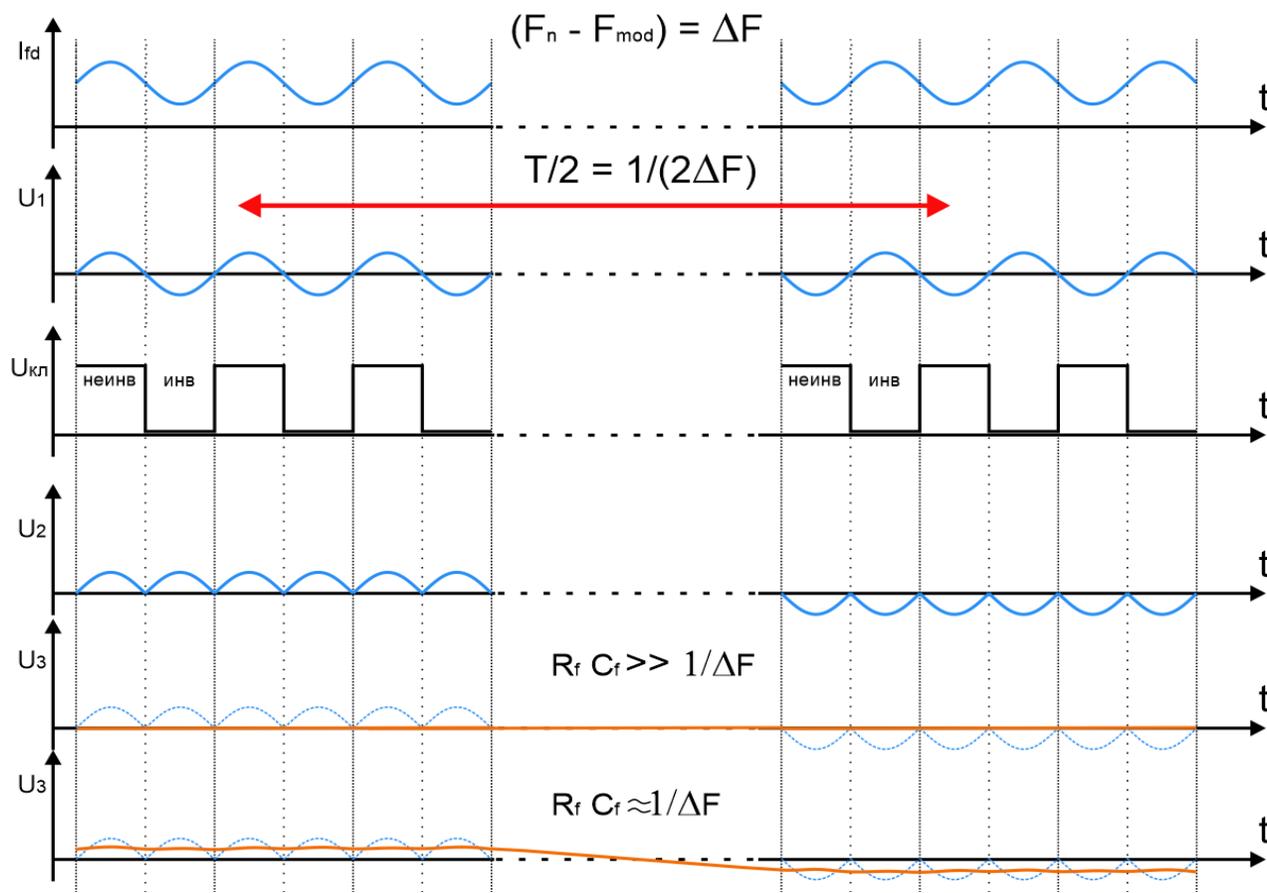


Рис. 31 – Временные зависимости фильтрации шума

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Каким образом можно изменить фазу света? Можно ли это сделать, не имея оптических элементов?
2. Какие устройства необходимо использовать для измерения внесенных изменений в фазу света?
3. Поясните механизм образования интерференционной картины в интерферометре Майкельсона.
4. Поясните, в чем заключается принципиальное отличие взаимного и невзаимного портов.
5. Опишите принцип сложения векторов на фазорной плоскости.
6. В чем заключается главное отличие реального делителя света от идеального с точки зрения точности измерения разности фаз в двухлучевом интерферометре?
7. Поясните процесс влияния спектра источника излучения на видность интерференционной картины.
8. Опишите принцип работы несимметричного интерферометра Маха-Цендера.
9. Какие методы используются в оптических измерительных системах для регистрации изменения фазы в световом пучке?
10. Опишите принцип работы измерительной системы, состоящей из измерительного и компенсационного интерферометров Маха-Цендера.
11. Опишите принцип работы измерительной системы, состоящей из измерительного интерферометра Маха-Цендера и компенсационного интерферометров Майкельсона.
12. Объясните понятие «двулучепреломляющее оптическое волокно».
13. Опишите принцип согласования двух двулучепреломляющих элементов с помощью сканирующего интерферометра.
14. Опишите методику согласования осей многофункциональной интегрально оптической схемы (МИОС) с волоконным контуром гироскопа.
15. Какие существуют режимы использования двулучевого интерферометра?
16. Опишите принцип работы интерферометра Саньяка.
17. Опишите принцип работы волоконно-оптического гироскопа.
18. Опишите принцип работы измерителя тока с описанием схем преобразования поляризаций и цугов в прямом и обратном направлениях.
19. Для чего в интерферометрах с принудительной модуляцией используют линии задержки?
20. Поясните механизм работы синхронного усилителя и его преимущества.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Эрик Удд. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. - Москва: Техносфера, 2008. - 520 с.
- 2) Кириенков А.Ю. Волоконно-оптические интерферометрические методы для построения измерительных систем на основе поверхностно-излучающего лазера: дис. на соискание степени канд. тех. наук: 05.11.01 / Кириенков Александр Юрьевич; [Место защиты: С.-Петерб. нац. исслед. ун-т информац. технологий, механики и оптики]. - Санкт-Петербург, 2017. – 155 с.
- 3) Качура С.М., Постнов В.И. Перспективные оптоволоконные датчики и их применение (обзор) // Труды ВИАМ. - 2019. - №5 (77). - С. 52-61. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-52-61
- 4) Guo H., Xiao G., Mrad N., Yao J. Fiber Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Air Platforms // Sensors. 2011. Vol. 11. P. 3687–3705
- 5) Лиокумович Л.Б. Волоконно-оптические интерферометрические измерения. Ч. 1. Волоконно-оптические интерферометры. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 110 с.
- 6) Islam M.R., Ali M.M., Lai M.-H. et al. Chronology of Fabry-Perot Interferometer Fiber-Optic Sensors and Their Applications: A Review // Sensors. 2014. Vol. 14. P. 7451-7488.
- 7) Lee B.H., Kim Y.H., Park K.S. et al. Interferometric Fiber Optic Sensors // Sensors. 2012. Vol. 12. P. 2467–2486
- 8) Гавричев В.Д., Дмитриев А.Л. Волоконно-оптические датчики магнитного поля // Учебное пособие. – СПб: СПбНИУ ИТМО, 2013. – 83 с.
- 9) Hervé C. Lefèvre. The Fiber-Optic Gyroscope. Second Edition. / Hervé C. Lefèvre. - Boston-London: Artech House, 2014. - 343 P.
- 10) Wagner J.W., Spicer J.B. Theoretical noise-limited sensitivity of classical interferometry // J. Opt. Soc. Am. B. 1987. Vol. 4. P. 1316-1326.
- 11) Kamenev O.T., Kulchin Yu.N., Petrov Yu.S., Khizhnyak R.V. Use of a fiber-optic Mach-Zehnder interferometer for creating a deformometer with extended gage length // Technical Physics Letters. 2014. Vol. 40, N 2. P. 119-122.
- 12) Kamenev O.T., Kulchin Yu.N., Petrov Yu.S., Khizhnyak R.V., Romashko R.V. Fiber-optic seismometer on the basis of Mach-Zehnder interferometer // Sensors and Actuators A. 2016. Vol. 244. P. 133-137.
- 13) Волоконно-оптический гироскоп с подавлением избыточного шума источника излучения / Э.И. Алексеев, Е.Н. Базаров, Ю.А. Баранников, В.П. Гапонцев [и др.] // Письма в ЖТФ. - 1998. - Т.24, № 18. - С. 30-35.
- 14) Бутусов М.М., Галкин С.Л., Орбинский С.П. Волоконная оптика и приборостроение. Л.: Машиностроение, 1987. - 328 с.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВОГ – Волоконно-оптический гироскоп

ДЛП – Двухлучепреломляющий

ИК – Интерференционная картина

ИМ – Интерферометр Майкельсона

ИМЦ – Интерферометр Маха-Цендера

ИС – Интерферометр Саньяка

МИОС – Многофункциональная интегрально-оптической схема

ОВ – Оптическое волокно

ФД – Фазовый датчик

Стригалеv Владимир Евгеньевич
Мешковский Игорь Касьянович
Моор Янина Дмитриевна

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФАЗО- ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ В ВОЛОКОННО- ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Учебное пособие

В авторской редакции
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО
Зав. РИО
Подписано к печати
Заказ №
Тираж
Отпечатано на ризографе

Н. Ф. Гусарова

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А