

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

На правах рукописи



Спиридонов Дмитрий Михайлович

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПОДАВЛЕНИЕ ШУМОВ В
ВЫХОДНОМ СИГНАЛЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

1.3.4 – Радиофизика

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Научный руководитель
д. ф.-м. н., профессор
Вадивасова Татьяна Евгеньевна

Саратов 2026

Содержание

Введение.....	4
1. Глава 1. Источники шума в ВОГ.....	16
1.1 «Минимальная конфигурация» ВКИ. Функциональная схема.....	16
1.2 Интерференционная картина и фазовая модуляция.....	18
1.3 Модель погрешностей выходного сигнала ВОГ.....	21
1.4 Естественные источники шума.....	25
1.5 Аналитическое выражение шумовой составляющей выходного сигнала ВОГ.....	28
1.6 Имитационная модель ВОГ, учитывающая совместное действие источников шума.....	31
1.7 Анализ и оценка достоверности построенных моделей....	35
1.8 Выводы по первой главе.....	46
2. Глава 2. Адаптированный цифровой метод снижения уровня шума выходного сигнала ВОГ за счет подавления шума интенсивности источника оптического излучения.....	48
2.1 Адаптированный метод и функциональная схема ВОГ с системой снижения шума выходного сигнала.....	48
2.2 Обобщенное аналитическое выражение для шумовой составляющей выходного сигнала ВОГ с учетом системы снижения шума.....	62
2.3 Имитационная модель ВОГ, включающая дополнительный измерительный канал и схему снижения шума.....	70
2.4 Лабораторный макет ВОГ с системой снижения шума, оценка экспериментальных результатов шумоподавления, сравнение с модельными прогнозами.....	73

2.5 Выводы по второй главе.....	78
3. Глава 3. Анализ эффективности метода снижения шума при варьировании параметров модели.....	82
3.1 Обобщенное аналитическое выражение для шумовой составляющей выходного сигнала ВОГ с учетом неполного согласования измерительных каналов системы снижения шума.....	83
3.2 Влияние согласования сигналов измерительных каналов во времени на уровень шума выходного сигнала.....	85
3.3 Зависимость уровня шума от соотношения средней мощности сигналов измерительных каналов.....	91
3.4 Влияние полосы пропускания измерительных каналов ВОГ на уровень шума выходного сигнала ВОГ.....	95
3.5 Влияние поляризации оптического сигнала в измерительных каналах ВОГ на уровень шума выходного сигнала ВОГ.....	98
3.6 Выводы по третьей главе.....	101
Заключение	103
Список сокращений и условных обозначений.....	105
Литература.....	107
Приложение.....	127

Введение

Источники внешнего и внутреннего шума присутствуют во всех реальных системах и устройствах и, в принципе, неустранимы (естественные источники шума). Во многих областях техники стоит задача снижения уровня шумов. Особенно актуальна эта задача для развития и усовершенствования измерительной техники [1 - 7]. Практически в любой области измерений значение предельно различимого слабого сигнала определяется шумом - мешающим сигналом, который перекрывает полезный сигнал. Некоторые виды шума имеют принципиально неустранимый характер, и с ними можно бороться только методами усреднения сигнала, то есть сужения полосы пропускания, что не всегда приемлемо, например, при необходимости измерения быстро меняющейся величины. Другие виды шума можно уменьшить специальными схемотехническими или конструкторскими решениями, в основном это относится к шумам сложных электронных устройств, таких как усилители, различные преобразователи и так далее, а также к наведенным внешним шумам (например, помехи на радиочастоте или линиях электропитания).

Как и во всех измерительных приборах, шум оказывает существенное влияние на точность интерферометрических измерительных систем. Интерферометрические системы - это класс измерительных систем и приборов, основанный на явлении интерференции, то есть взаимодействия когерентных волн различной природы. Наибольшее распространение получили интерферометры на электромагнитных волнах оптического диапазона. На рисунке 1 представлена обобщенная схема интерферометра.

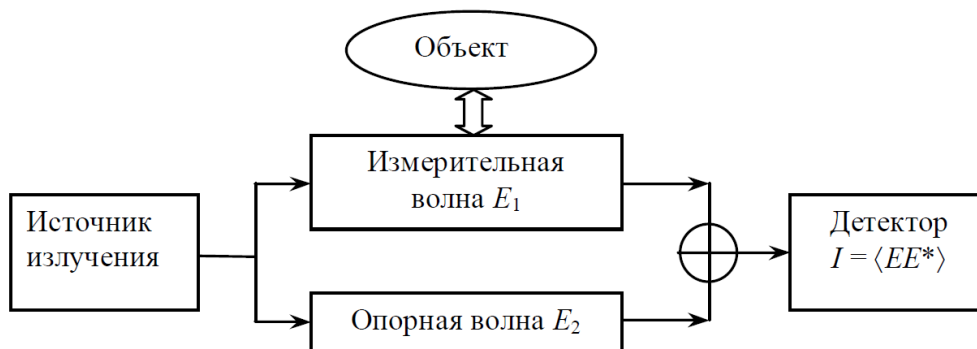


Рисунок 1 - Обобщенная блок-схема интерферометра из работы [8]

При сложении двух когерентных монохроматических оптических колебаний с частотой ν и напряженностью электрического поля $E_1 = a_1 \exp[j(2\pi\nu t + \varphi_1)]$ и $E_2 = a_2 \exp[j(2\pi\nu t + \varphi_2)]$ результирующая интенсивность, наблюдается при квадратичном детектировании суммарного колебания $E = E_1 + E_2$ и усреднении, обусловленном ограниченным быстродействием фотодетектора по сравнению с периодом колебаний $1/\nu$, а именно:

$$I = \langle |E|^2 \rangle = \langle EE^* \rangle = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos \varphi, \quad (1)$$

где $\langle \dots \rangle$ - осреднение по времени, $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi\Delta/\lambda$ – разность фаз, Δ – оптическая разность хода, $\lambda = c/\nu$ – длина волны, c – скорость света в вакууме.

Изменение оптической разности хода, вызванное тем или иным внешним воздействием, определяемым типом интерферометра, приводит к изменению интенсивности I интерференционной картины, фиксируемой детектором.

В основе каждой интерферометрической системы лежит тот или иной тип интерферометра. Кратко рассмотрим основные из них:

1. Интерферометр Саньяка - двухлучевой однопроходный кольцевой интерферометр с общим ходом лучей, лежит в основе волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), - прибора для измерения угловой скорости [9, 10].

2. Интерферометр Майкельсона - двухлучевой двухпроходный интерферометр. Наиболее известными системами с его применением

являются оптический когерентный томограф (ОКТ) [11 - 13] и Фурье-спектрометр [14, 15].

3. Интерферометры Жамена, Рождественского, Маха-Цендера, Релея. Это двухлучевые однопроходные интерферометры, используемые для измерения показателя преломления среды, размещенной в одном из плеч интерферометра [16].

4. Интерферометр Физо - многолучевой двухпроходный интерферометр, лежит в основе приборов для измерения формы оптических деталей [17, 18].

5. Интерферометр Маха-Цендера, выполненный на основе электрооптического фазового модулятора применяется для изготовления элементов цифровой оптической связи - высокочастотных модуляторов интенсивности [19, 20].

Широкое распространение интерферометрических систем в качестве измерительных приборов связано с их высокой чувствительностью, определяемой крутизной передаточной характеристики преобразования измеряемой величины в оптическую разность хода Δ и через нее в разность фаз φ интерферирующих волн. Например, система определения показателя преломления на основе интерферометра Релея позволяет измерить разницу в показателях преломления среды опорного и измерительного лучей на уровне 10^{-8} [15, 21]. Оптические когерентные томографы различают микроструктуры на уровне единиц микрометров [7, 22]. Волоконно-оптические гироскопы обладают пороговой чувствительностью на уровне $0,003...0,005$ °/ч [23, 24]. Для каждого из видов интерферометрических систем существуют свои, ограничивающие их точность факторы, связанные с нестабильностью внешних условий [25 - 28], сложностью юстировки [17], ограничениями человеческого зрения [29], несовершенством технологий изготовления оптических элементов [30, 31], собственными шумами источников и приемников оптического излучения [32, 33].

Современные высокоточные сложные интерферометрические системы, такие как ОКТ и ВОГ, использующие в своих схемах элементы волоконной и интегральной оптики, аналоговые и цифровые электронные схемы и сложные алгоритмы цифровой обработки сигналов в реальном времени, во многом достигли, на сегодняшний день, таких показателей точности, что собственный шум становится одним из факторов, ограничивающих ее дальнейшее увеличение [32, 33]. В данной работе тема моделирования и подавления собственного шума интерферометрической системы рассмотрена на примере волоконно-оптического гироскопа.

Волоконно-оптический гироскоп как первичный преобразователь физической величины - измеритель проекции вектора угловой скорости, долгие годы остается в центре внимания ведущих разработчиков систем инерциальной навигации, ориентации, стабилизации различных подвижных объектов, предназначенных для работы как в различных средах на Земле и в околоземном пространстве, так и в космосе [34 - 58]. ВОГ является уникальным инструментом, объединяющим высокие эксплуатационные характеристики, долговечность и надежность, обусловленные отсутствием движущихся механических частей, с относительно невысокой стоимостью при высокотехнологичном серийном производстве. Отправной точкой в истории ВОГ можно считать дату открытия эффекта Саньяка (1913 год), который и лежит в основе всех современных ВОГ. За последние десятилетия ВОГ перешагнул из разряда датчиков низкой и средней точности в разряд датчиков навигационного класса точности и дальнейшее повышение его точностных характеристик упирается в те или иные ограничения физического характера. В частности, порог чувствительности ВОГ, соответствующий равенству единице отношения сигнал/шум, определяется эффективной площадью волоконного контура с одной стороны и собственными шумами схемы ВОГ с другой стороны. Интуитивное решение – увеличение длины и диаметра волоконного контура, ограничено на практике множеством эффектов, связанных как с неизбежными дефектами

волокна, имеющими накопительный (от длины) эффект, так и с конструктивными ограничениями, в частности это увеличение зависимости сдвига выходного сигнала ВОГ от температурного влияния и других факторов [59 - 62], а также увеличение массы и габаритов. В этой ситуации оптимальным решением является снижение собственных шумов схемы ВОГ, генерируемых отдельными элементами этой схемы и определенным образом взаимодействующих между собой.

Считается, что наибольший вклад в суммарный шум ВОГ вносит шум интенсивности источника оптического излучения, величина которого определяется статистикой излучения [63, 64]. На сегодняшний день известно не меньше трех методов, позволяющих в той или иной степени снижать вклад шума интенсивности источника оптического излучения в выходном сигнале ВОГ [65 - 70]. Все эти методы основаны на выделении шума источника оптического излучения в сигнал отдельного измерительного канала с последующим вычитанием этого сигнала из полезного сигнала. В зависимости от реализации это может осуществляться с помощью:

- быстродействующего контура обратной связи по току накачки источника излучения, модулирующего ток накачки в противофазе к флуктуациям мощности излучения;

- сложения оптических сигналов по интенсивности, при этом из-за задержки распространения света в интерферометре фаза спектральных компонент шума на частоте демодуляции полезного сигнала в основном измерительном и шумовом каналах сдвинута на π , вследствие чего происходит подавление шума на этой частоте;

- вычитания или деления предварительно преобразованных сначала в электрический, а затем в цифровой вид и подвергнутых определенной обработке сигналов основного измерительного и опорного шумового каналов.

Наилучший результат показывает второй метод, количественная оценка коэффициента шумоподавления которого достигает 12 дБ (4 раза),

что объясняется минималистической схемой и отсутствием дополнительных источников шума, вместе с тем этот метод обладает и значительными недостатками, связанными с практической сложностью контроля и согласования в реальном времени интенсивности света в обоих измерительных каналах.

Цель диссертационной работы состоит в разработке имитационной модели волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) (как частного случая интерферометрической измерительной системы), учитывающей собственные источники шума ВОГ и позволяющей проводить моделирование в широком диапазоне собственных параметров системы, отвечающих за уровень шума различных источников, быстродействие контуров обратной связи, согласованность сигналов измерительных каналов при реализации системы шумоподавления.

Задачи работы: Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

1. Классификация источников шума ВОГ и разработка математических моделей шумовой составляющей выходного сигнала ВОГ.
2. Анализ поведения моделей при различных значениях параметров схемы ВОГ и внешних воздействий.
3. Верификация моделей путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными.
4. Анализ известных методов снижения уровня шума в выходном сигнале ВОГ.
5. Разработка и изготовление макета ВОГ с реализацией оптимального метода снижения шума.
6. Анализ достигнутых результатов, сравнение результатов макетирования с результатами моделирования.
7. Анализ эффективности системы снижения шума в условиях неполного согласования сигналов измерительных каналов.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы.

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертации, проводится краткий обзор имеющихся в научной литературе результатов по теме проводимого исследования, определяются цели и задачи исследования, формулируются положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе рассматривается вывод аналитического выражения для определения величины уровня шума выходного сигнала ВОГ. Анализируются оптическая и электрическая обобщенные схемы ВОГ. На основе данного анализа определяются существующие источники собственного шума ВОГ. Определяются математические выражения для каждого такого источника, выводится обобщенное выражение, учитывающее вклад каждого источника в суммарный шум выходного сигнала ВОГ, а также зависимость величины шума от различных параметров схемы. Проведено моделирование в широком диапазоне варьируемых параметров выражения, определен вид зависимости вклада каждого источника в суммарный уровень шума в зависимости от значений параметров, определены оптимальные, с точки зрения минимизации уровня шума, значения параметров схемы. Для подтверждения достоверности полученных результатов разработана модель ВОГ имитационного типа, воспроизводящая работу алгоритма ВОГ с цифровой обработкой и замкнутым контуром обратной связи по измерению угловой скорости. Для подтверждения корректности аналитического выражения и имитационной модели было проведено сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных, полученных при измерении шума выходного сигнала выборки из серийно выпускаемых ВОГ. Расхождение между результатами моделирования и эксперимента составило в среднем 11 %.

Во второй главе рассматривается метод снижения уровня шума выходного сигнала ВОГ, основанный на выделении шума интенсивности

источника оптического излучения в отдельный измерительный канал с последующим оцифровыванием сигналов измерительных каналов и вычитанием шума из полезного сигнала. Приводится функциональная блок-схема ВОГ, в которой реализован данный метод. На основе этой блок-схемы и алгоритма работы ВОГ выводится аналитическое выражение для определения спектральной плотности мощности шума (СПМШ) выходного сигнала ВОГ с шумоподавлением. В описанной в первой главе имитационной модели реализован алгоритм вычитания шума. Также был спроектирован и изготовлен макет ВОГ с системой шумоподавления. Проведено сравнение аналитической и имитационной моделей при изменении значений параметров ВОГ, расхождение в результатах моделирования не превышает 10 %. Проведена верификация моделей путем сравнения результатов моделирования с результатами, полученными экспериментальным путем на макете. Методом вариации Аллана определено, что включение системы шумоподавления приводит к близкому к двукратному снижению шума выходного сигнала. Результаты моделирования и натурального эксперимента отличаются не более чем на 15 %.

В третьей главе проведен анализ модели ВОГ с системой снижения шума, описанной во второй главе, с целью определения оптимальных параметров согласования сигналов измерительных каналов системы снижения шума выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа. Определены четыре условия согласования сигналов, невыполнение которых может привести к снижению эффективности шумоподавления или увеличению уровня шума. Для каждого из рассматриваемых условий определены параметры системы снижения шума и выведены математические зависимости их влияния на уровень шума в выходном сигнале гироскопа, проведено математическое моделирование в широком диапазоне изменения рассматриваемых параметров. Для каждого рассматриваемого параметра получены форма и степень влияния на уровень шума, а также определен оптимальный диапазон значений каждого параметра, в котором наблюдается

минимальное значение шума в выходном сигнале. Получена количественная оценка требований к точности этого согласования по таким параметрам как: временное согласование, согласование по мощности сигнала, по полосе пропускания и по состоянию поляризации оптического излучения.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы. Материал диссертационной работы изложен на 127 страницах, содержит 34 иллюстрации и список цитируемой литературы из 126 наименований.

Научная новизна работы.

1. Впервые создана имитационная модель волоконно-оптического гироскопа с замкнутым контуром компенсирующей обратной связи, учитывающая источники шума источника, приемника и модулятора оптического излучения.

2. Получено обобщенное аналитическое выражение шумовой составляющей выходного сигнала для ВОГ с системой снижения шума источника оптического излучения.

3. Впервые получены и проанализированы частные случаи аналитического выражения спектральной плотности мощности шума ВОГ с системой снижения шума, определяющие зависимость СПМШ от рассогласования сигналов измерительных каналов во времени, по средней мощности, по полосе пропускания и по поляризации оптических сигналов.

4. Выявлен и встроен в математическую модель шум, определяемый схемой формирования сигнала фазовой модуляции.

Достоверность полученных результатов работы подтверждается соответствием результатов, полученных при моделировании и в натуральных экспериментах. Полученные в работе результаты не противоречат данным, полученным другими авторами и представленными в научной литературе.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Имитационная модель волоконно-оптического гироскопа, включающая источники шумов естественного происхождения (флуктуации

мощности источника оптического излучения, дробовой и тепловой шум, шум операционного усилителя) и реализующая алгоритм обработки сигналов основного и опорного измерительных каналов с учетом системы снижения шума выходного сигнала, основанной на вычитании сигнала опорного измерительного канала из сигнала основного измерительного канала, а также расчет параметров выходного сигнала, в ряде случаев, например, при анализе влияния времени рассогласования и полосы пропускания измерительных каналов на шумоподавление, позволяет получить более точные результаты при моделировании шумовой составляющей выходного сигнала ВОГ, по сравнению с приближенным аналитическим выражением, определяющим спектральную плотность мощности шума сигнала ВОГ.

2. Аддитивное введение в модель волоконно-оптического гироскопа с системой снижения шума, основанной на вычитании сигнала опорного измерительного канала из сигнала основного измерительного канала, дополнительного источника белого шума, моделирующего собственный шум схемы формирования сигнала фазовой модуляции, снижает погрешность результатов моделирования при сопоставлении с экспериментальными данными в два раза.

3. Применение в интерферометрической системе, в частности в волоконно-оптическом гироскопе, построенном по схеме минимальной конфигурации волоконно-кольцевого интерферометра Саньяка, системы снижения шума, основанной на вычитании сигнала опорного измерительного канала, из сигнала основного измерительного канала, после применения алгоритма демодуляции к сигналам обоих измерительных каналов, позволяет не только снизить уровень шума выходного сигнала ВОГ, но и на практике реализовать следящую схему коррекции среднеквадратического значения сигнала опорного измерительного канала.

4. Для волоконно-оптического гироскопа, построенного по схеме минимальной конфигурации волоконно-кольцевого интерферометра Саньяка с системой снижения шума, основанной на вычитании сигнала опорного измерительного канала из сигнала основного измерительного канала, справедливо следующее:

– зависимость коэффициента шумоподавления от времени рассогласования сигналов измерительных каналов Δt определяется спектром шума источника излучения на выходе измерительных каналов;

– зависимость коэффициента шумоподавления от величины отклонения среднеквадратических значений сигналов измерительных каналов определяется величиной отклонения средней мощности оптического излучения, падающего на фотоприемники измерительных каналов и разницей коэффициентов усиления сигналов до их вычитания в системе снижения шума.

Практическая значимость: Разработанные и апробированные в ходе выполнения работы математические модели и результаты их анализа позволяют моделировать поведение ВОГ не только в части собственных шумов (аналитическое выражение), но и в части моделирования алгоритмов цифровой обработки сигналов, фазовой модуляции и так далее (имитационная модель). Практическое применение использованного метода снижения собственного шума ВОГ, при оптимальном подборе параметров схемы и учете ряда факторов, позволяет существенно (до 3 раз) понизить порог чувствительности ВОГ при сохранении остальных точностных и эксплуатационных характеристик без существенного усложнения схемотехники. Равное снижение порога чувствительности без уменьшения собственных шумов возможно лишь при двухкратном увеличении длины волоконного контура, что влечет за собой увеличение габаритов и стоимости конечного изделия, усложнение технологии изготовления волоконного контура и неминуемо приводит к увеличению случайных и квазидетерминированных сдвигов выходного сигнала. Функциональные

схемы ВОГ с системой снижения шума и расчеты параметров использованы ООО НПК «ОПТОЛИНК» при разработке прибора с пониженным уровнем шума выходного сигнала (Приложение: Акт внедрения на одном листе).

Апробация работы. Основные результаты научных исследований были представлены на следующих научных семинарах и конференциях:

- Научная школа-конференция «Saratov Fall Meeting 2021» (Саратов, 2021)
- Научная школа-конференция «Saratov Fall Meeting 2022» (Саратов, 2022)
- Научная школа-семинар «Взаимодействие СВЧ, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами 2022» (Саратов, 2022).
- Научная школа-семинар «Взаимодействие СВЧ, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами 2025» (Саратов, 2025).

Личный вклад. Основная часть представленных в настоящей работе результатов была получена лично автором в ходе выполнения исследовательских и поисковых работ, а также при проведении численных и натуральных экспериментов. Экспериментальные исследования проведены с использованием материальной и испытательной базы Саратовского отделения предприятия ООО «НПК Оптилинк».

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 печатных изданиях (3 статьи [71 - 73] в журналах, рекомендованных ВАК, и 4 работы в сборниках тезисов конференций [74 - 77]). Зарегистрирована программа для ЭВМ [78].

Глава 1. Источники шума в ВОГ

1.1 «Минимальная конфигурация» ВКИ. Функциональная схема

Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) - это измерительное устройство, предназначенное для измерения проекции вектора угловой скорости на его измерительную ось, перпендикулярную плоскости чувствительного элемента - волоконного контура. Выходной сигнал гироскопа содержит информацию об измеренной угловой скорости либо об угле поворота, накопленном за период времени между двумя последовательными выборками информации.

В основе функционирования ВОГ лежит эффект Саньяка, заключающийся в том, что разность фазовых набегов двух световых волн $\varphi^+ - \varphi^- = \varphi_c$, распространяющихся по замкнутому контуру в противоположных направлениях, при вращении контура (вместе с источником и приемником оптического излучения) вокруг оси, нормальной к его плоскости, пропорциональна угловой скорости вращения и площади контура, который обходят встречные волны [9, 10]. Обзор корректных и некорректных объяснений эффекта Саньяка приведен в работе [79].

Эволюция развития волоконно-оптической гироскопии привела к тому, что на сегодняшний день существует несколько модификаций конфигураций ВОГ, различающихся как оптической, так и электрической схемами, а также алгоритмами выделения полезного сигнала. Тем не менее, все эти конфигурации ВОГ объединяет общая основа, так называемая «минимальная конфигурация» волоконно-кольцевого интерферометра (ВКИ). Данный термин подразумевает минимальный набор элементов и их определенную взаимосвязь. Их применение позволяет сконструировать ВОГ на эффекте Саньяка. Все модификации «минимальной конфигурации»

предназначены для улучшения тех или иных точностных, схмотехнических, конструктивных и технологических характеристик измерителя.

На рисунке 1.1 представлена функциональная блок-схема ВКИ «минимальной конфигурации» [80].

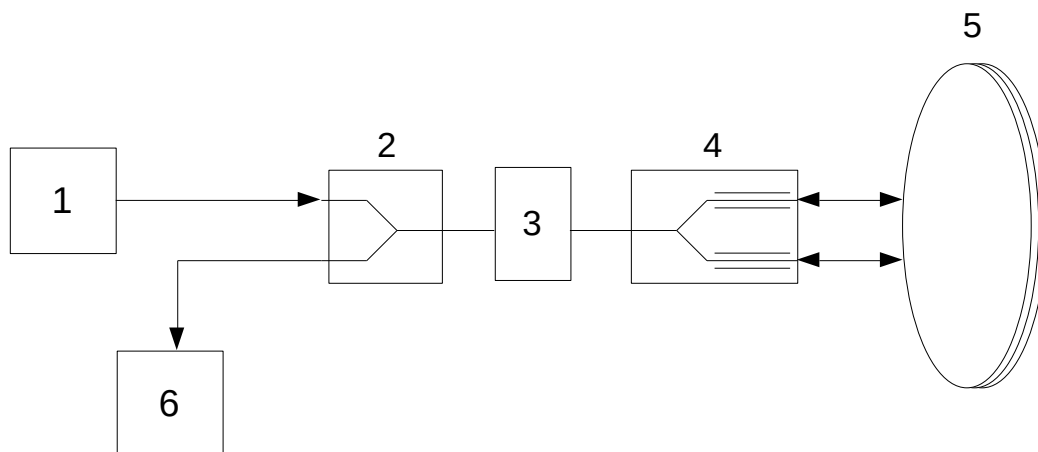


Рисунок 1.1 - Блок-схема ВКИ «минимальной конфигурации»

Она включает в себя источник оптического излучения «1», делитель «2», поляризатор «3», фазовый модулятор «4», объединенный с вторым делителем, волоконный контур «5» и фотоприемник «6», состоящий из фотодиода и преобразователя «ток-напряжение». Оптическое излучение от источника «1» проходит оптический делитель «2», поляризатор «3» и разделяется на два равных по интенсивности луча делителем в составе фазового модулятора «4». Там же, оптическим волнам, распространяющимся в плечах фазового модулятора, задается относительный фазовый сдвиг (более подробно про фазовую модуляцию будет сказано в соответствующем пункте настоящей работы). Далее, две оптические волны распространяются по волоконному контуру (ВК), представляющему собой многовитковую катушку одномодового оптического волокна, сохраняющего состояние поляризации, во встречном направлении. Прошедшее ВК излучение снова попадает в фазовый модулятор «4», проходит его в обратном направлении, интерферирует, проходит поляризатор «3» и через делитель «2» попадает на фотоприемник «6». В простейшем случае фотоприемник состоит из фотодиода и нагрузочного резистора. Оптическое излучение индуцирует в

фотодиоде фототок, пропорциональный мощности оптического излучения, падающего на фоточувствительный элемент. Величина этой мощности является функцией фазы Саньяка, - взаимной разности фаз оптических волн, прошедших ВК во встречном направлении [33]:

$$P = \frac{1}{2} P_0 (1 + \cos \varphi_C) \quad (1.1)$$

где P - мощность оптического излучения, падающего на фотоприемник, Вт; P_0 - выходная мощность источника оптического излучения с учетом потерь в волоконном контуре, Вт; $\varphi_C = \varphi^+ - \varphi^-$ - фаза Саньяка; φ^+ , φ^- - абсолютные значения фаз оптических волн, распространяющихся по ВК, рад.

Нагрузочный резистор является простейшим преобразователем «ток-напряжение». Измеренное на резисторе падение напряжения является мерой фазы Саньяка, которая в свою очередь через оптический коэффициент связана с угловой скоростью ВК:

$$\omega = \frac{\lambda c}{2\pi DL} \varphi_C \quad (1.2)$$

где ω - угловая скорость, рад/с; λ - центральная длина волны оптического излучения, м; c - скорость света в вакууме, м/с; D - средний диаметр многовиткового ВК, м; L - длина волоконного контура, м.

1.2 Интерференционная картина и фазовая модуляция

На рисунке 1.2 изображена передаточная характеристика интерферометра Саньяка, описываемая выражением (1.1). Как видно из графика, зависимость мощности оптического излучения, падающего на фотодиод, от фазы Саньяка (а значит и угловой скорости) имеет ярко выраженный нелинейный характер, при этом она минимальна при малых угловых скоростях и не зависит от знака фазы Саньяка.

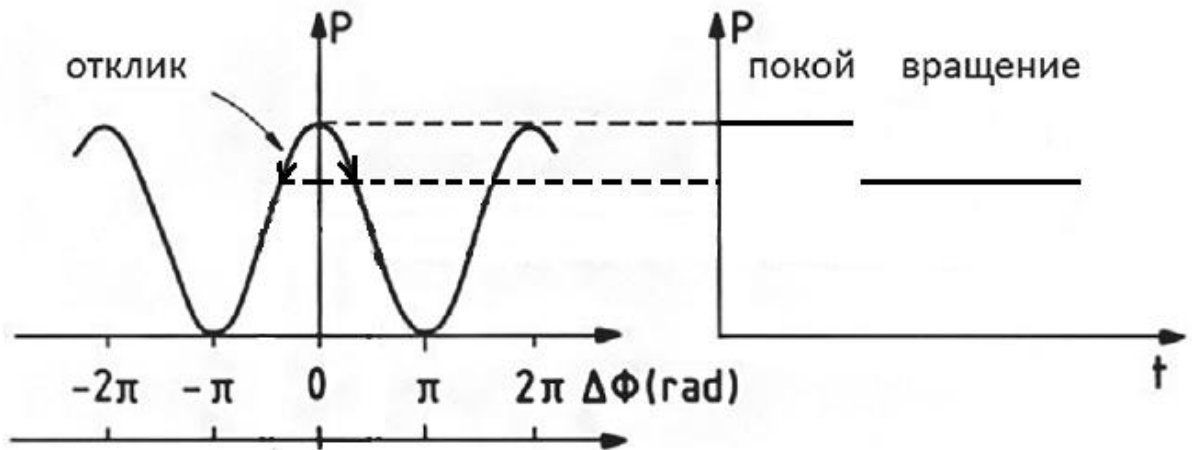


Рисунок 1.2 - Передаточная характеристика интерферометра Саньяка

Для повышения чувствительности, линейзации выходной характеристики и однозначного определения знака измеряемой угловой скорости, в схему ВОГ включают специальное устройство - фазовый модулятор. В простейшем случае он предназначен для формирования вспомогательной фазовой модуляции, смещающей рабочую точку интерферометра на линейный участок передаточной характеристики, как это изображено на рисунке 1.3. Стандартным значением глубины вспомогательной фазовой модуляции считается $\pi/2$. Выражение (1.1) при этом преобразуется следующим образом:

$$P = \frac{1}{2}P_0(1 + \cos(\varphi_C + \varphi_{\text{ВФМ}})) \quad (1.3)$$

где $\varphi_{\text{ВФМ}}$ - глубина вспомогательной фазовой модуляции.

Периодическая фазовая модуляция (период определяется временем обхода оптической волной волоконного контура, то есть длиной ВК) «переключает» рабочую точку между состояниями $-\pi/2$ и $+\pi/2$. Мерой действующей угловой скорости при этом считается разница между значениями мощности оптического излучения, падающего на фотодетектор на двух последовательных полупериодах модуляции [81].

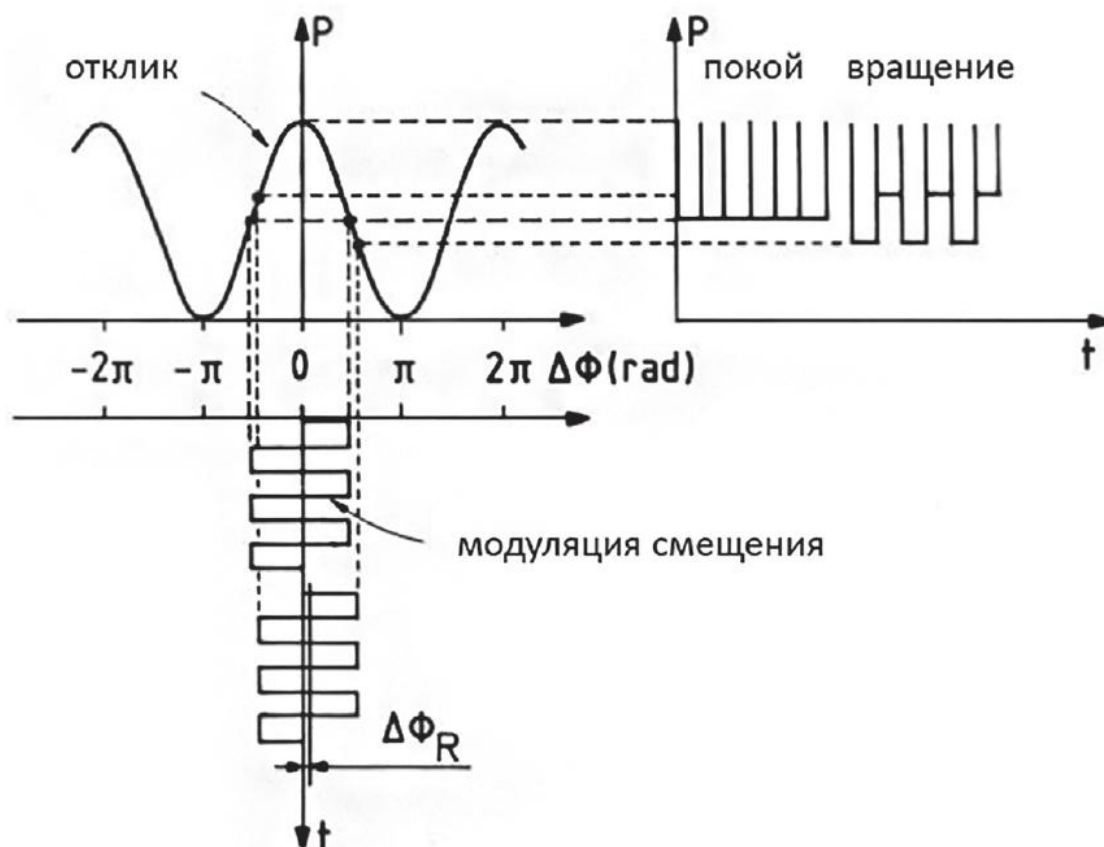


Рисунок 1.3 - Передаточная характеристика интерферометра Саньяка в составе ВОГ с импульсной вспомогательной фазовой модуляцией [81]

В современных ВОГ, для повышения точностных характеристик применяют схему измерения с замкнутым контуром компенсирующей обратной связи по измерению угловой скорости. При таком методе измерения на фазовый модулятор одновременно подаются сигналы двух типов модуляции: вспомогательной, как было описано выше, и компенсирующей, предназначенной для удержания рабочей точки интерферометра в заданном состоянии при отличной от нуля измеряемой угловой скорости. При этом сигнал компенсирующей фазовой модуляции формируется как сумма значений сигнала рассогласования мощности оптического излучения, падающего на фотоприемник на соседних полупериодах вспомогательной фазовой модуляции. Мерой угловой скорости (фазы Саньяка) считается величина сигнала компенсирующей фазовой модуляции. Выражение (1.1) при этом преобразуется в (1.4)

$$P = \frac{1}{2} P_0 (1 + \cos(\varphi_C + \varphi_{\text{ВФМ}} - \varphi_K)) \quad (1.4)$$

где φ_K - компенсирующая фазовая модуляция.

Далее, при выводе выражений для определения уровня шума в выходном сигнале ВОГ под глубиной модуляции φ мы будем понимать (если иное не оговорено дополнительно) весь аргумент функции косинуса в выражении (1.4). При этом, поскольку в схеме с замкнутым контуром обратной связи величина компенсирующей модуляции стремится к величине действующей фазы Саньяка, то φ можно считать приблизительно равным $\varphi_{\text{ВФМ}}$.

1.3 Модель погрешностей выходного сигнала ВОГ

Единицей измерения угловой скорости в международной системе единиц СИ является радиан в секунду [рад/с]. В гироскопии единицей измерения угловой скорости де факто принято считать градус в час [°/ч]. Эти единицы связаны между собой соотношением (1.5)

$$[\text{°/ч}] = \left[\text{рад} \cdot \frac{\pi}{180} / \text{с} \cdot 3600 \right]. \quad (1.5)$$

Далее в работе при проведении численных оценок мы будем использовать единицы измерения [°/ч], принятые в гироскопии и производные от них.

Выходной сигнал ВОГ может быть описан общим выражением (1.6)

$$U(\omega \dots) = K(T \dots) \cdot \omega + U_0(T, \dot{T}, \mathbf{B}, \mathbf{a} \dots) + U_n(P_0, R, \varphi, T, \mathbf{a} \dots), \quad (1.6)$$

где U - выходной сигнал ВОГ, в зависимости от конкретной технической реализации прибора он может быть выражен в аналоговой или цифровой форме; ω - измеряемая угловая скорость; K - масштабный коэффициент (МК); T - температура; U_0 - смещение нулевого сигнала (НС); \dot{T} - скорость изменения температуры; \mathbf{B} - магнитная индукция; \mathbf{a} - виброускорение; U_n -

шумовая составляющая выходного сигнала; P_0 - мощность оптического излучения; R - сопротивление резисторов обратной связи трансимпедансного усилителя фототока [82].

Выходной сигнал ВОГ в первую очередь является функцией угловой скорости ω , но помимо этого также подвержен влиянию внешних воздействующих факторов ($T, \dot{T}, \mathbf{V}, \mathbf{a}$) и параметров собственной схемы и конструкции (P_0, R, φ) ВОГ, приводящих к погрешностям и ошибкам измерения.

Погрешность, обусловленная зависимостью МК от температуры, это мультипликативная, систематическая погрешность, влияние которой может быть учтено или скомпенсировано аппроксимирующей зависимостью вида (1.7) при использовании дополнительного информационного канала, в данном случае температурного:

$$K_{\text{корр}} = K - f(T), \quad (1.7)$$

где $K_{\text{корр}}$ - скорректированное значение МК; $f(T)$ - кусочно-линейная функция аргумента T .

Существует целый ряд факторов, приводящих, в общем случае, к тому, что при отсутствии измеряемой угловой скорости на выходе ВОГ наблюдается не равный нулю сигнал. Смещение нулевого сигнала принято разделять на систематическую и случайную составляющие. К систематической составляющей относятся зависимость НС от температуры и скорости изменения температуры [59 - 61], а также от направления и величины вектора магнитной индукции [83, 84]. Систематическое смещение НС, может быть успешно учтено либо скомпенсировано при наличии дополнительных каналов информации (датчиков температуры и магнитометров в рассматриваемом случае [85]). Влияние виброускорения на выходной сигнал ВОГ носит, с одной стороны, детерминированный характер, так как с помощью достаточно сложного эксперимента можно определить зависимость смещения НС от действия вибрации. С другой стороны, модель формирования вибрационной ошибки ВОГ достаточно сложна, так как

должна учитывать амплитуду, спектральный состав и направление воздействия вибрации на ВОГ, а также конструктивные особенности ВОГ и быстродействие частотозависимого контура компенсирующей обратной связи, формирующие передаточную функцию преобразования виброускорения в угловую скорость [86]. Исходя из сложности решения задачи алгоритмической компенсации и необходимости дополнительного измерительного канала в виде акселерометра, смещение НС, вызываемое вибрацией, принято относить к случайной составляющей. К методам уменьшения этого смещения относятся увеличение быстродействия контура компенсирующей обратной связи и уменьшение коэффициента преобразования виброускорения в фазу Саньяка (в угловую скорость), применение жестких конструкций приборов с частотой резонанса за пределами частот действующих виброускорений [87]. Также к случайной составляющей выходного сигнала ВОГ принято относить низкочастотное смещение нулевого сигнала и шум.

Согласно стандарту [88] принята модель, определяющая структуру случайной составляющей выходного сигнала ВОГ в зависимости от времени осреднения выходного сигнала:

$$\sigma(\tau) = \sqrt{R^2 \frac{\tau^2}{2} + K^2 \frac{\tau}{3} + B^2 \frac{2}{\pi} \ln 2 + N^2 \frac{1}{\tau} + Q^2 \frac{3}{\tau^2}} \quad (1.8)$$

где σ - среднеквадратическое значение (СКЗ) случайной составляющей; τ - время осреднения выходного сигнала (для ВОГ τ , как правило, обратно пропорционально полосе пропускания); R - коэффициент линейного изменения угловой скорости (Rate Ramp); K - коэффициент случайного ухода угловой скорости (Rate Random Walk); B - коэффициент нестабильности нулевого сигнала (Bias Instability); N - коэффициент случайного углового ухода - спектральная плотность мощности шума (Angle Random Walk); Q - коэффициент шума квантования (Quantum Noise), - в скобках указано обозначение согласно стандарту [88]. Коэффициенты R , K , B , N , Q ,

определяют величину случайной составляющей сигнала на каждом участке графика рисунка 1.4.

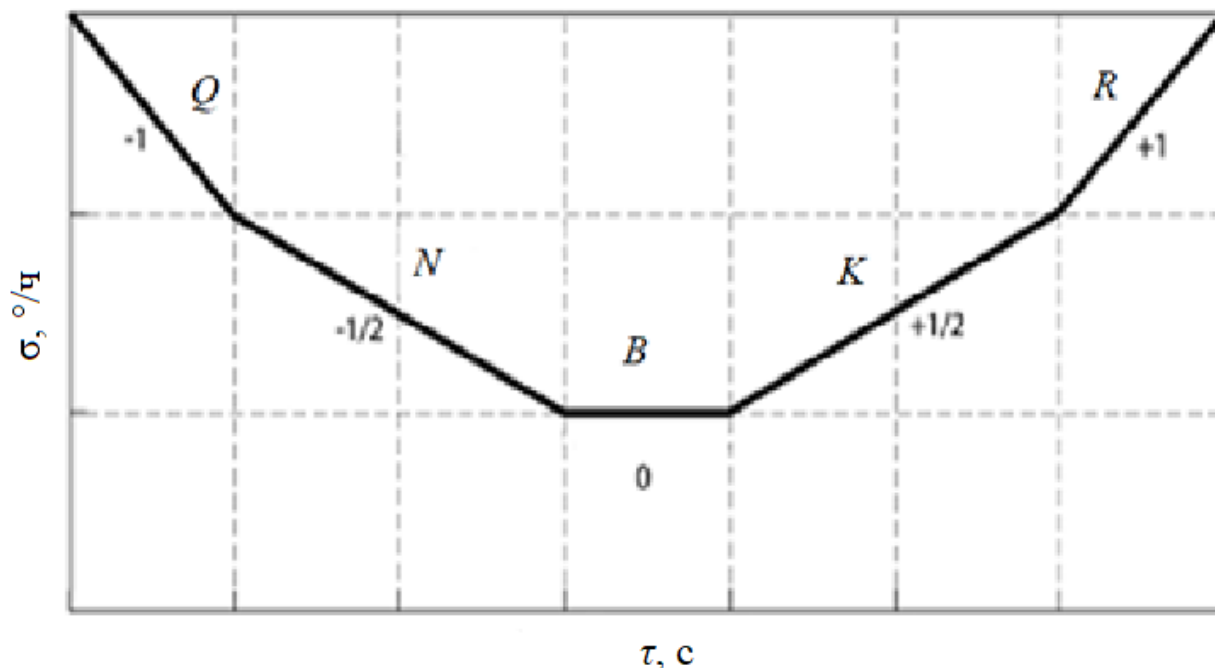


Рисунок 1.4 - Пример графика зависимости СКЗ (в логарифмическом масштабе) случайной составляющей сигнала ВОГ от времени осреднения согласно выражению (1.8)

Как видно из рисунка 1.4, график зависимости СКЗ от времени осреднения имеет пять областей с различным наклоном, каждая из которых соответствует определенному члену выражения (1.8). На практике наиболее часто реализуются участки с наклоном -1, -1/2 и 0 соответствующие шуму квантования (Q), белому шуму (N) и нестабильности смещения НС (B). Участки K и R в контексте данной работы не представляют интереса, поскольку реализуются на временах наблюдения и осреднения порядка десятков часов и вызываются причинами не связанными с рассматриваемыми в данной работе (подробнее с ними можно ознакомиться в работе [89]).

Теоретическое значение величины белого шума в ограниченной полосе частот, в выходном сигнале ВОГ, определяется с помощью специальной математической модели, описанию, анализу и экспериментальной проверке которой посвящен соответствующий пункт настоящей работы.

1.4 Естественные источники шума

Для дальнейшего рассмотрения источников шума в ВОГ нужно сначала определить суть и смысл термина «шум» в контексте данной работы. Под шумом выходного сигнала ВОГ мы будем понимать случайную составляющую выходного сигнала ВОГ, описываемую коэффициентом N в выражении (1.8), источниками которой являются элементы оптической или электрической схемы ВОГ, а численное значение определяется параметрами этих элементов.

Исходя из рассмотренной выше схемы «минимальной конфигурации» ВКИ можно определить принципиально неустранимые естественные источники шума, всегда присутствующие в схеме ВОГ. В тематической литературе [33, 67, 90] в качестве таких источников указывают источник оптического излучения (шум интенсивности или избыточный шум), фотодиод (дробовой шум фототока и дробовой шум темнового тока фотодиода) и преобразователь «ток-напряжение» (тепловой шум).

Дробовой шум.

Применительно к полупроводниковому диоду (каким является, в том числе, и фотодиод), под дробовым шумом подразумевается шум тока, протекающего через p - n переход и связанный со случайным характером перемещения носителей через p - n переход. Среднеквадратическое значение дробового шума в ограниченной полосе частот и в предположении, что время перехода мало и частицы не взаимодействуют, для полупроводникового диода описывается формулой Шоттки (1.9):

$$i_{ш.др} = \sqrt{2eI_d\Delta f}, \quad (1.9)$$

где $i_{ш.др}$ - СКЗ шумового тока, А; e - заряд электрона, Кл; I_d - постоянная составляющая тока, протекающего через диод, А; Δf - полоса частот, в которой оценивается уровень шума (в рассматриваемой системе соответствует полосе пропускания измерительного канала ВОГ), Гц.

Дробовой шум, формирующийся на выводах фотодиода, имеет два источника: дробовой шум фототока и шум темнового тока фотодиода.

Одной из важных характеристик фотодиода является его токовая чувствительность η - коэффициент, связывающий величину мощности оптического излучения, падающего на фотодиод, с величиной выходного тока фотодиода. Подставляя в формулу (1.9) вместо тока I_d , протекающего через диод, произведение чувствительности фотодиода η на среднюю мощность P падающего на него оптического излучения, получим выражение, позволяющее вычислить шум тока фотодиода, вызванный дробовым шумом фототока:

$$i_{ш.фТ} = \sqrt{2e\eta P\Delta f}, \quad (1.10)$$

где $i_{ш.фТ}$ - СКЗ шумового тока фототока, А; η - токовая чувствительность фотодиода, А/Вт.

В отсутствии внешнего облучения через фотодиод протекает паразитный, так называемый темновой ток. Величина темнового тока определяется конструкцией фотодиода и устанавливает порог чувствительности фотодиода. Шум темнового тока фотодиода, определяется аналогично дробовому шуму фототока, только вместо среднего тока через фотодиод в формулу Шоттки подставляется значение темнового тока:

$$i_{ш.фД} = \sqrt{2ei_d\Delta f}, \quad (1.11)$$

где $i_{ш.фД}$ - СКЗ шумового тока темнового тока фотодиода, А; i_d - темновой ток фотодиода, А.

Тепловой шум.

Выходной ток фотодиода, несущий полезный сигнал об угловой скорости, преобразовывается в напряжение простейшим преобразователем ток-напряжение, которым является нагрузочный резистор. Среднеквадратическое значение ЭДС шума, порождаемой таким резистором в ограниченной полосе частот, описывается классической формулой Найквиста:

$$e_{ш.Т} = \sqrt{4kTR\Delta f}, \quad (1.12)$$

где $e_{ш.Т}$ - ЭДС шума, В; k - постоянная Больцмана, Дж/К; T - температура резистора, К; R - сопротивление нагрузочного резистора, Ом.

В современных ВОГ в качестве преобразователя ток-напряжение обычно применяют трансимпедансный усилитель, построенный по схеме на операционном усилителе. Основным источником шума такого усилителя является тепловой шум резисторов обратной связи, также описываемый формулой Найквиста.

Шум интенсивности источника оптического излучения (избыточный шум).

Традиционно, на заре разработки волоконно-оптических гироскопов в качестве источника оптического излучения применялся He-Ne лазер с длиной волны 0,63 мкм [91, 92] (первое окно прозрачности кварцевого оптического волокна). Гелий-неоновый лазер является монохроматическим источником излучения с большой длиной когерентности (порядка 0,2 метра), что послужило причиной возникновения дополнительных, не связанных с сигналом вращения, фазовых набегов, за счет интерференции отраженного от внутренних неоднородностей волокна оптического излучения [93 - 96]. Данные эффекты приводили к значительным погрешностям при определении угловой скорости. Данное ограничение удалось преодолеть с появлением относительно широкополосных суперлюминисцентных источников оптического излучения. В настоящее время практически во всех серийно выпускаемых или вновь разрабатываемых ВОГах в качестве источника оптического излучения применяются суперлюминисцентные диоды (СЛД) или суперлюминисцентные волоконные источники оптического излучения, построенные на основе оптического волокна, легированного ионами эрбия (ЭСВИОИ). Их объединяет относительно широкий спектр излучения (10...20 нм у ЭСВИОИ [97], 35...65 нм у СЛД [97 - 99]), длина когерентности при этом составляет порядка 10...100 мкм, центральная длина волны - 1550 нм (третье окно прозрачности кварцевого оптического волокна).

Данный вид источников характеризуются высоким уровнем, так называемого избыточного собственного шума интенсивности излучения. Данный вид шума можно представить как результат биений между различными спектральными компонентами внутри линии излучения [100]. СКЗ шумовой мощности оптического излучения в ограниченной полосе частот описывается эмпирической формулой (1.13)

$$P_{\text{ш.слд}} = \sqrt{\frac{\Delta f}{K_f \Delta \nu}} P, \quad (1.13)$$

где K_f - коэффициент, зависящий от формы спектра излучения (описан в работе [67]), $\Delta \nu$ - полоса частот, в которой осуществляется излучение, Гц; P - среднее значение мощности оптического излучения, Вт.

В зависимости от конкретных оптической и электрической схем, к рассмотренным выше источникам шумов могут добавиться дополнительные источники, например усилитель сигнала фазовой модуляции, который будет рассмотрен во второй главе, тепловые флуктуации показателя преломления, которые могут приводить к дополнительной шумовой модуляции фототока на выходе ВКИ [101], цифровой шум квантования аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразователей и другие [102].

1.5 Аналитическое выражение шумовой составляющей выходного сигнала ВОГ

Каждый из рассмотренных выше источников шума независим от других, из чего можно сделать вывод о статистической независимости шумов, порождаемых ими. Также известно [103, 104], что данные виды шумов обладают равномерным спектром в широком диапазоне частот, значительно превосходящем полосу пропускания схемы ВОГ, что позволяет нам при дальнейшем рассмотрении считать их «белым шумом».

Выражения (1.10) - (1.13) по отдельности описывают уровни среднеквадратических значений шумовых составляющих электрического сигнала на выходе фотоприемника. Для построения полноценной математической модели, учитывающей все шумовые составляющие и выражающей шум в единицах угловой скорости, сделаем два последовательных преобразования.

В результате интерференции встречных оптических волн после обхода волоконного контура, мощность оптического излучения, падающего на фотоприемник, является функцией их разности фаз, и в ВОГ с замкнутым контуром обратной связи по измерению угловой скорости описывается выражением (1.4). Перепишем выражение (1.4), обозначив разность фазы Саньяка и компенсирующей фазовой модуляции как фазу ошибки φ_0 :

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} P_0 (1 + \cos(\varphi_0 + \varphi_{\text{ВФМ}})) = \\ &= \frac{1}{2} P_0 (1 + \cos \varphi_0 \cos \varphi_{\text{ВФМ}} - \sin \varphi_0 \sin \varphi_{\text{ВФМ}}), \end{aligned} \quad (1.14)$$

где $\varphi_0 = \varphi_{\text{С}} - \varphi_{\text{К}}$ - фаза ошибки компенсации.

Считая малой величину φ_0 , и принимая $\cos \varphi_0 = 1$, $\sin \varphi_0 = \varphi_0$, получим:

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} P_0 (1 + \cos \varphi_{\text{ВФМ}} - \varphi_0 \sin \varphi_{\text{ВФМ}}) = \\ &= \frac{1}{2} P_0 + \frac{1}{2} P_0 \cos \varphi_{\text{ВФМ}} - \frac{1}{2} P_0 \varphi_0 \sin \varphi_{\text{ВФМ}}. \end{aligned} \quad (1.15)$$

Производная выражения (1.15) по φ_0 определяет зависимость приращения мощности оптического излучения, от приращения фазы ошибки:

$$\frac{dP}{d\varphi_0} = -\frac{1}{2} P_0 \sin \varphi_{\text{ВФМ}}. \quad (1.16)$$

Переписав выражение (1.16) относительно приращения фазы ошибки получим следующее выражение:

$$d\varphi_0 = \frac{dP}{-\frac{1}{2}P_0 \sin \varphi_{\text{ВФМ}}}. \quad (1.17)$$

Подставляя в (1.17) вместо dP выражения (1.10) - (1.13), определяющие СКЗ шума отдельных источников, выразив их в единицах мощности оптического излучения и опуская знак «-» в знаменателе выражения (1.17) получим соответствующие СКЗ шума в единицах фазы:

$$\varphi_{\text{ш.ФТ}} = \frac{\sqrt{2e \cdot \eta \cdot \frac{1}{2}P_0 \cdot (1 + \cos \varphi) \cdot \Delta f}}{\eta \cdot \frac{1}{2}P_0 \cdot \sin \varphi}, \quad (1.18)$$

$$\varphi_{\text{ш.ФД}} = \frac{\sqrt{2e \cdot i_d \cdot \Delta f}}{\eta \cdot \frac{1}{2}P_0 \cdot \sin \varphi}, \quad (1.19)$$

$$\varphi_{\text{ш.Т}} = \frac{\sqrt{\frac{8k \cdot T \cdot \Delta f}{R}}}{\eta \cdot \frac{1}{2}P_0 \cdot \sin \varphi}, \quad (1.20)$$

$$\varphi_{\text{ш.СЛД}} = \sqrt{\frac{\lambda^2 \cdot \Delta f}{K_f \cdot c \cdot \Delta \lambda}} \cdot \frac{\eta \cdot \frac{1}{2}P_0 \cdot (1 + \cos \varphi)}{\eta \cdot \frac{1}{2}P_0 \cdot \sin \varphi}, \quad (1.21)$$

где $\varphi_{\text{ш}}$ - выраженное в единицах фазы значение СКЗ шума в ограниченной полосе частот для каждого источника шума; $\Delta \lambda$ - ширина спектра оптического излучения, м.

В выражении (1.20) было учтено, что в симметричной схеме трансимпедансного усилителя применяется два одинаковых резистора сопротивлением R , генерирующих равный по величине, но статистически независимый белый шум. В выражении (1.21) было сделано преобразование от частотного представления спектра оптического излучения к представлению в единицах длины волны λ , более распространенному в оптической физике.

Разность фаз между встречными оптическими волнами в интерферометре Саньяка связана с угловой скоростью через масштабный коэффициент (1.2), зависящий от физических параметров интерферометра.

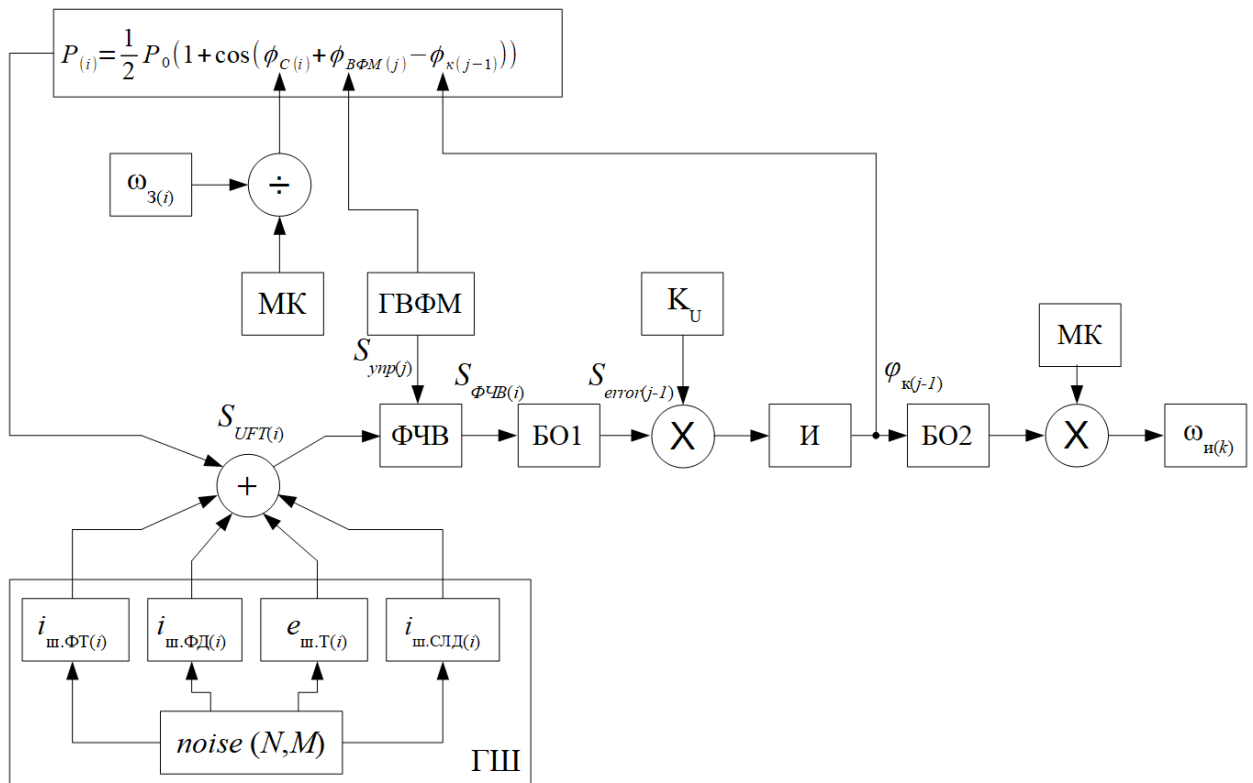
Поскольку в рассматриваемой системе источники шума независимы и не связаны между собой, то можно считать, что генерируемые ими шумы статистически независимы и при определении суммарной величины шума можно воспользоваться правилом сложения дисперсий случайных величин. Подставив в (1.2) вместо « φ_c » корень из суммы квадратов выражений для независимых источников шума и поделив правую часть выражения на полосу частот, определяемую полосой пропускания измерительного канала ВОГ « $\sqrt{\Delta f}$ », получили аналитическое выражение для вычисления спектральной плотности мощности шума в выходном сигнале ВОГ:

$$\delta\omega_{ш.} = \frac{\sqrt{2}\lambda c}{2\pi DL} \sqrt{\frac{\eta \frac{1}{2} P_0 (1 + \cos \varphi) + e i_d + \frac{4kT}{R} + \frac{\lambda^2 \eta^2 \frac{1}{4} P_0^2 (1 + \cos \varphi)^2}{2K_f c \Delta \lambda}}{\eta \frac{1}{2} P_0 \sin \varphi}}, \quad (1.22)$$

где $\delta\omega_{ш.}$ - спектральная плотность мощности шума (СПМШ) выходного сигнала ВОГ, то есть флуктуации угловой скорости, (рад/с)/ $\sqrt{\text{Гц}}$.

1.6 Имитационная модель ВОГ, учитывающая совместное действие источников шума

Для верификации аналитического выражения (1.22) в широком диапазоне изменения параметров, входящих в это выражение, на основе выражений (1.10) - (1.13) и алгоритма работы ВОГ с вспомогательной фазовой модуляцией и замкнутым контуром обратной связи [81, 88, 105], была разработана имитационная, компьютерная модель ВОГ в программной среде «Octave», позволяющая воспроизвести реализацию процесса во времени [78]. На рисунке 1.5 представлена функциональная блок-схема имитационной модели.



«+» - блок суммирования, «÷» - блок деления, МК - масштабный коэффициент Саньяка, ГВФМ - генератор вспомогательной фазовой модуляции, ФЧВ - фазочувствительный выпрямитель, ГШ - генератор шума, БО1,2 - блоки осреднения, K_U - коэффициент усиления контура компенсирующей обратной связи, «×» - блок умножения, И - интегратор.

Рисунок 1.5 - Блок-схема имитационной модели ВОГ

Детерминированная ($P_{(i)}$) и случайные ($i_{ш.ФТ(i)}$ - шум фототока, $i_{ш.ФД(i)}$ - шум темнового тока, $e_{ш.Т(i)}$ - ЭДС теплового шума, $i_{ш.СЛД(i)}$ - шум источника оптического излучения) составляющие моделируемого сигнала, поступающие на фотоприемник, а также формируемые фотоприемником и усилителем фототока, описываются выражениями (1.23) - (1.27) на каждой итерации i главного цикла модели:

$$P_{(i)} = \frac{1}{2} P_0 (1 + \cos(\phi_{c(i)} + \phi_{ВФМ(j)} - \phi_{к(j-1)})), \quad (1.23)$$

где $P_{(i)}$ - мощность оптического излучения, падающего на фотодетектор на итерации i ; i - номер итерации главного цикла, $i = 1 \dots N$, N - количество итераций главного цикла модели; $\phi_{c(i)} = \omega_{3(i)}(f(i)) / \frac{\lambda c}{2\pi DL}$ - разница фаз

встречных оптических волн в интерферометре Саньяка, вызванная заданной угловой скоростью, рад, ω_3 - заданное значение угловой скорости - входная информация модели, угловая скорость может изменяться, подчиняясь некоторому закону $f(i)$ или быть постоянной, $\frac{\lambda c}{2\pi DL}$ - величина, обратная оптическому коэффициенту эффекта Саньяка; $\varphi_{\text{ВФМ}}$ - разница фаз встречных оптических волн в интерферометре Саньяка, вызванная вспомогательной фазовой модуляцией, рад; j - номер полупериода вспомогательной фазовой модуляции в пределах периода осреднения выходного сигнала; $\varphi_{\text{к}}$ - разница фаз встречных оптических волн в интерферометре Саньяка, вызванная компенсирующей фазовой модуляцией, рад.

$$i_{\text{ш.ФТ}(i)} = \sqrt{eP_{(i)}\eta f_{\text{ADC}} \text{noise}(i, 1)}, \quad (1.24)$$

$$i_{\text{ш.ФД}(i)} = \sqrt{e i_d f_{\text{ADC}} \text{noise}(i, 2)}, \quad (1.25)$$

$$e_{\text{ш.Т}(i)} = \sqrt{4kTR f_{\text{ADC}} \text{noise}(i, 3)}, \quad (1.26)$$

$$i_{\text{ш.СЛД}(i)} = \sqrt{\frac{\lambda^2 f_{\text{ADC}}}{2K_f c \Delta \lambda}} P_0 \eta \frac{1}{2} (1 + \cos \varphi_{\text{ВФМ}}) \text{noise}(i, 4), \quad (1.27)$$

где η - чувствительность фотодиода, А/Вт; f_{ADC} - частота преобразования аналого-цифрового преобразователя; $\text{noise}(N, M)$ - массив, где $M = 4$ - число независимых каналов шума. Каждый канал шума моделируется с помощью независимого генератора случайных некоррелированных чисел с гауссовым распределением, единичной дисперсией и нулевым средним значением.

Сигнал на входе фазочувствительного выпрямителя (ФЧВ) моделируется выражением:

$$S_{\text{УФТ}(i)} = (P_{(i)}\eta + i_{\text{ш.ФТ}(i)} + i_{\text{ш.ФД}(i)} + i_{\text{ш.СЛД}(i)})2R + e_{\text{ш.Т}(i)}.$$

Генератор вспомогательной фазовой модуляции (ГВФМ) выполняет две функции:

- моделирует сигнал вспомогательной фазовой модуляции, принимающий два возможных состояния:

$$\varphi_{\text{ВФМ}(j)} = \begin{cases} \varphi_{\text{ВФМ}}, & j = 2m, \quad \text{где } m \in \mathbb{Z} \\ -\varphi_{\text{ВФМ}}, & j = 2m + 1, \quad \text{где } m \in \mathbb{Z} \end{cases}$$

где $j = \left\lfloor \frac{i \cdot 2f_{\text{ВФМ}}}{f_{\text{ADC}}} \right\rfloor$, $j = 0 \dots 2f_{\text{ВФМ}}T$, $f_{\text{ВФМ}}$ - частота вспомогательной фазовой модуляции T - период осреднения выходного сигнала; $\varphi_{\text{ВФМ}}$ - глубина вспомогательной фазовой модуляции;

- моделирует управляющий сигнал для фазочувствительного выпрямителя:

$$S_{\text{упр}(j)} = \begin{cases} 1, & j = 2m, \quad \text{где } m \in \mathbb{Z} \\ -1, & j = 2m + 1, \quad \text{где } m \in \mathbb{Z} \end{cases}$$

Сигнал на выходе ФЧВ:

$$S_{\text{ФЧВ}(i)} = S_{\text{УФТ}(i)} S_{\text{упр}(j)}$$

Блок осреднения БО1 моделирует формирование сигнала ошибки, то есть сигнала рассогласования на двух соседних интервалах j :

$$S_{\text{error}(j-1)} = \frac{\sum_{i=jM}^{(j+2)M} (S_{\text{ФЧВ}(i)})}{2M},$$

где $M = \frac{f_{\text{ADC}}}{2f_{\text{ВФМ}}}$.

Сигнал рассогласования $S_{\text{error}(j-1)}$ усиливается и интегрируется в интеграторе ошибки (И). Сигнал выхода интегратора ошибки:

$$\varphi_{\text{к}(j-1)} = \varphi_{\text{к}(j-2)} + S_{\text{error}(j-1)} K_U,$$

где K_U - коэффициент усиления ошибки, В/рад.

Этот сигнал является одновременно компенсирующим сигналом для контура обратной связи и мерой угловой скорости. В контуре обратной связи реализована задержка на один полупериод j , всегда присутствующая в физических ВОГ. Блок осреднения БО2 суммирует и усредняет накопленные на интервале k значения компенсирующей фазы $\varphi_{\text{к}(j)}$. С учетом оптического коэффициента эффекта Саньяка вычисленное значение измеряемой угловой скорости на k -ом отсчете составляет:

$$\omega_{\text{и}(k)} = \frac{\sum_j (\varphi_{\text{к}(j)})}{2f_{\text{ВФМ}}T} \frac{\lambda c}{2\pi DL'}$$

где $k = 1 \dots K$, $k = 2f_{\text{ВФМ}}T$, $K = \frac{N}{f_{\text{ADC}}T}$.

После окончания последней итерации i для накопленного массива значений $\omega_{и(k)}$ вычисляются среднее значение, СКО и СПМШ:

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{\sum_k (\omega_{и(k)})}{K},$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^K (\omega_{и(k)} - \omega_{\text{ср}})^2},$$

$$\delta\omega_{\text{СПМШ}} = \frac{\sigma}{\sqrt{\Delta f}}$$

где $\Delta f = \frac{1}{2T}$.

1.7 Анализ и оценка достоверности построенных моделей

1.7.1 Методика оценки шумовой составляющей выходного сигнала ВОГ

Общепризнанными и широко используемыми на практике являются два метода определения величины случайной составляющей выходного сигнала ВОГ.

Стандартным способом принято считать среднеквадратическое отклонение (СКО) измеренной реализации выходного сигнала, равное квадратному корню из выборочной дисперсии:

$$\sigma(\tau) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\omega_i(\tau) - \omega_{\text{ср}})^2}, \quad (1.28)$$

где n - количество выборок, $\omega_i(\tau)$ - значение i -ой выборки, τ - период измерения (или осреднения) выборки выходного сигнала, $\omega_{\text{ср}}$ - выборочное среднее.

Спектральная плотность мощности шума при таком подходе определяется как корень из дисперсии сигнала в ограниченной полосе частот, определяемой частотой дискретизации сигнала, деленной на эту полосу:

$$\delta\omega_{\text{СПМШ}} = \frac{\sigma(\tau)}{\sqrt{\Delta f_d}} [(\text{°}/\text{ч})/\sqrt{\Gamma\text{ц}}], \quad (1.29)$$

где $\Delta f_d = \frac{1}{2\tau}$ - ширина полосы пропускания измеренного сигнала.

В работах по гироскопии также можно часто встретить такое выражение для определения коэффициента шума:

$$K_{\text{Ш}} = \sigma(\tau) \cdot \sqrt{\frac{2\tau}{3600}} [^\circ/\sqrt{\text{ч}}]. \quad (1.30)$$

При этом, при оценке величины нестабильности смещения нулевого сигнала время τ выбирается в диапазоне $\sim 100 \dots 300$ секунд. При оценке шума τ выбирается в диапазоне $\sim 0,1 \dots 10$ секунд.

Данный метод прост в реализации, но не отражает в полной мере реальную картину распределения значений случайной составляющей сигнала согласно модели (1.8), являясь, по сути, точечной оценкой. Кроме того, наличие линейного тренда (вызванного, например, зависимостью выходного сигнала от температуры) в оцениваемой реализации сигнала, приведет к некорректной оценке параметров случайной составляющей сигнала.

Для полноценной и корректной оценки структуры случайной составляющей выходного сигнала и определения ее компонент в последнее время (в России с начала XXI века) применяют метод вариации Аллана, также известный как среднеквадратическое относительное двухвыборочное отклонение (СКДО) [106]:

$$\sigma_A(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{\omega}_{i+1}(\tau) - \bar{\omega}_i(\tau))^2}. \quad (1.31)$$

где $\bar{\omega}$ - осредненное на периоде времени τ значение выходного сигнала.

Как видно из выражения (1.27), основное отличие СКДО от СКО заключается в том, что вычисляется квадрат отклонения среднего,

посчитанного по двум соседним выборкам, а не каждой выборки от среднего значения всех выборок. Это приводит к нечувствительности данного метода к наличию в оцениваемой реализации сигнала линейного тренда или влияния низкочастотных случайных составляющих на оценку шума.

Вариация Аллана вычисляется для каждого времени осреднения τ в диапазоне от $\tau = t$, где t - период измерения одной выборки сигнала до $\tau = T/2$, где T – длительность записи реализации сигнала. По результатам вычисления строится график зависимости $\sigma_A(\tau)$. Пример графика вариации Аллана, вычисленный для реализации выходного сигнала ВОГ ОИУС1000 производства ООО НПК «Оптолинк» представлен на рисунке 1.6.

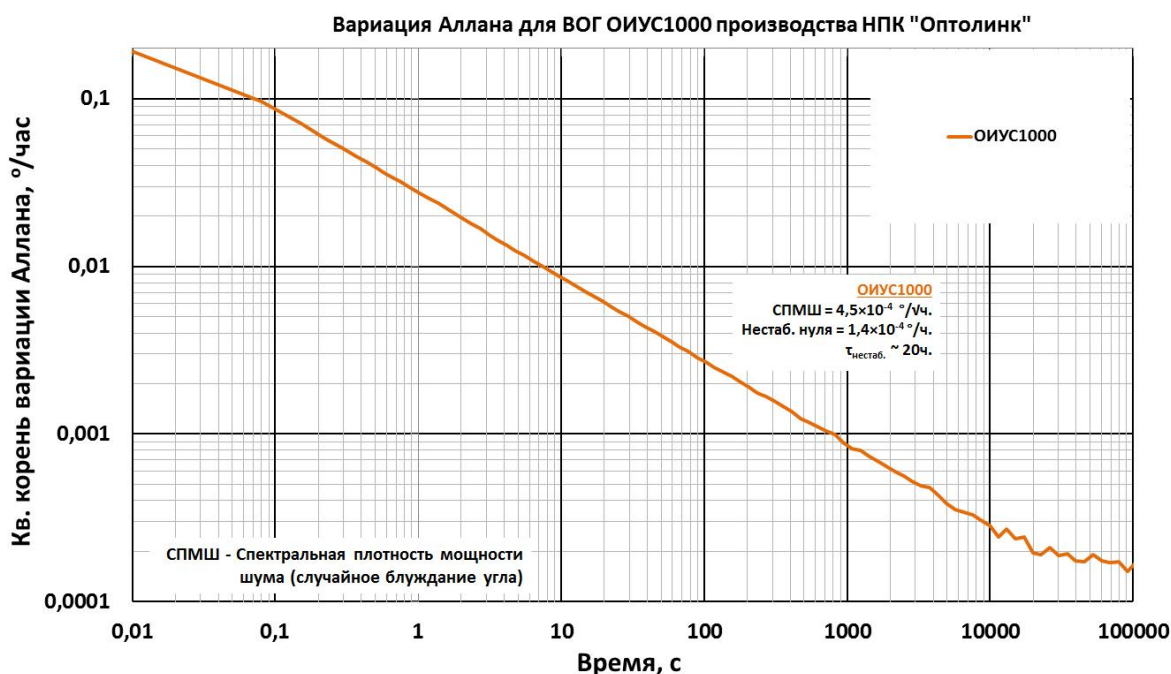


Рисунок 1.6 - Общий вид графика вариации Аллана для ВОГ [107]

Коэффициенты N и B выражения (1.8) определяются из графика вариации Аллана следующим образом:

- Коэффициент N определяется по уровню $\sigma_A(\tau)$ в точке пересечения прямой линии, являющейся продолжением участка графика с наклоном $-1/2$ дБ на декаду, с вертикальной линией, проведенной через точку $\tau = 3600$ секунд (1 час) по оси времени и имеет размерность $[^\circ/\sqrt{\text{ч}}]$;

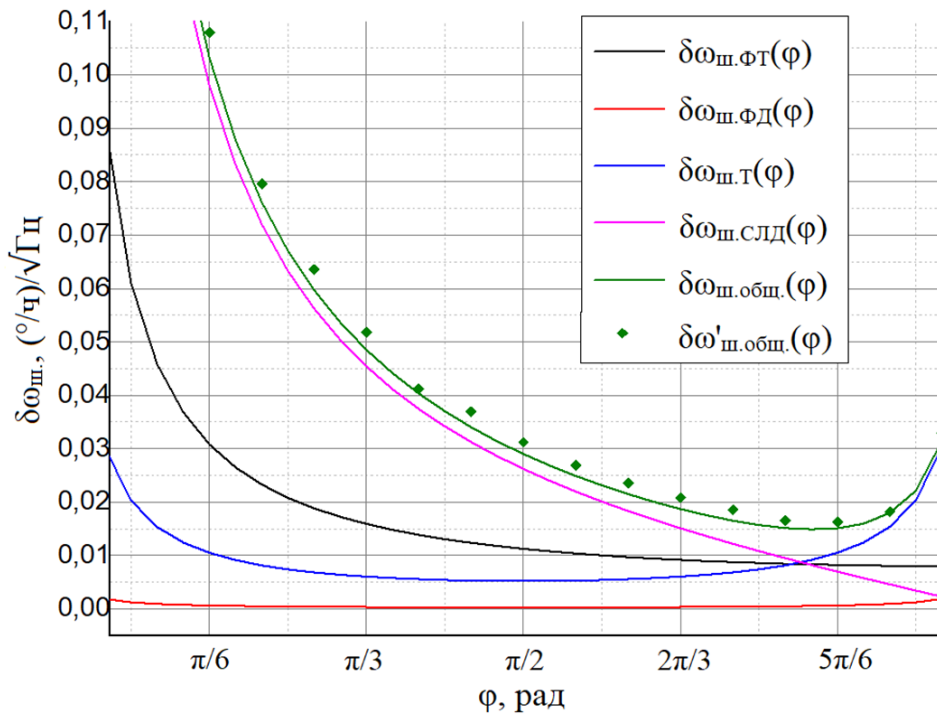
- Коэффициент B , характеризующий низкочастотную нестабильность сигнала, определяется как значение $\sigma_A(\tau)$ на горизонтальном участке графика, деленное на $\sqrt{\frac{2}{\pi} \ln 2} \approx 0,66$.

Далее в работе мы будем использовать оба метода в зависимости от обстоятельств: для точечной оценки спектральной плотности мощности шума при сравнении результатов аналитического, имитационного моделирования и натурального эксперимента будем использовать выражение (1.29), при необходимости идентифицировать структуру случайной составляющей выходного сигнала при сравнении ВОГ с системой снижения шума и без снижения шума будем использовать метод вариации Аллана (1.31).

1.7.2 Оптимальные значения параметров ВОГ (минимизация шума)

Для выявления источника шума, вносящего наибольший вклад в результирующий уровень шума, а также для определения значений параметров, приводящих к минимизации уровня шума, было проведено моделирование шумовой составляющей выходного сигнала ВОГ в широком диапазоне параметров. Рассмотрим, как меняется уровень шума выходного сигнала ВОГ в зависимости от значений глубины вспомогательной фазовой модуляции (ВФМ), мощности оптического излучения и сопротивления резисторов обратной связи трансимпедансного усилителя. На приведенных ниже рисунках сплошными линиями изображены графики зависимостей отдельных составляющих и полного уровня шума выходного сигнала ВОГ, описываемые выражением (1.22), точками обозначены значения, соответствующие результатам моделирования шума выходного сигнала ВОГ имитационной моделью.

На рисунке 1.7 представлены графики зависимости шума выходного сигнала ВОГ от величины вспомогательной фазовой модуляции $\phi_{ВФМ}$.



$$R = 20 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

$$\eta = 0,93 \text{ А/Вт}$$

$$P_0 = 50 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}$$

$$I_d = 20 \cdot 10^{-9} \text{ А}$$

$$D = 0,15 \text{ м}$$

$$L = 1070 \text{ м}$$

$$T = 293 \text{ К}$$

$$\lambda = 1556 \cdot 10^{-9} \text{ м}$$

$$\Delta\lambda = 35 \cdot 10^{-9} \text{ м}$$

$$K_f = 3,125$$

Рисунок 1.7 - Зависимость уровня шума от разности фаз. Справа приведены значения параметров выражения (1.22) и имитационной модели при расчете

Как видно из графика полного шума ($\delta\omega_{ш.общ.}(\varphi)$) минимальный уровень шума при заданных значениях параметров наблюдается при $\varphi_{ВФМ} \approx 5\pi/6$. Современные ВОГ, построенные по схеме с вспомогательной фазовой модуляцией и замкнутым контуром компенсирующей обратной связи, как правило, имеют глубину ВФМ равную $\pi/2$, что обосновано выбором рабочей точки на линейном участке передаточной функции (как мы видели в п.1.3) и одинаковой чувствительностью ВОГ к действующей угловой скорости и угловому ускорению независимо от их знака, что имеет особое значение для ВОГ с большой полосой пропускания или вибростойких ВОГ [108]. Для ВОГ предназначенных для работы в условиях медленного изменения действующей угловой скорости (и других внешних факторов, которые могут приводить к модуляции фазы Саньяка) увеличение глубины ВФМ может привести к уменьшению уровня шума в выходном сигнале без влияния на другие точностные параметры.

На рисунке 1.8 приведены графики зависимостей каждой составляющей и полного уровня шума выходного сигнала ВОГ от мощности

оптического излучения на фотоприемнике P_0 . Как видно из графика зависимости полного шума ($\delta\omega_{ш.общ}(P_0)$), увеличение мощности оптического излучения приводит к значительному снижению шума выходного сигнала ВОГ. В тоже время, видно, что дальнейшее снижение шума ограничено присутствием в выходном сигнале избыточного шума источника оптического излучения (график $\delta\omega_{ш.слд}(P_0)$), уровень которого независит от мощности P_0 .

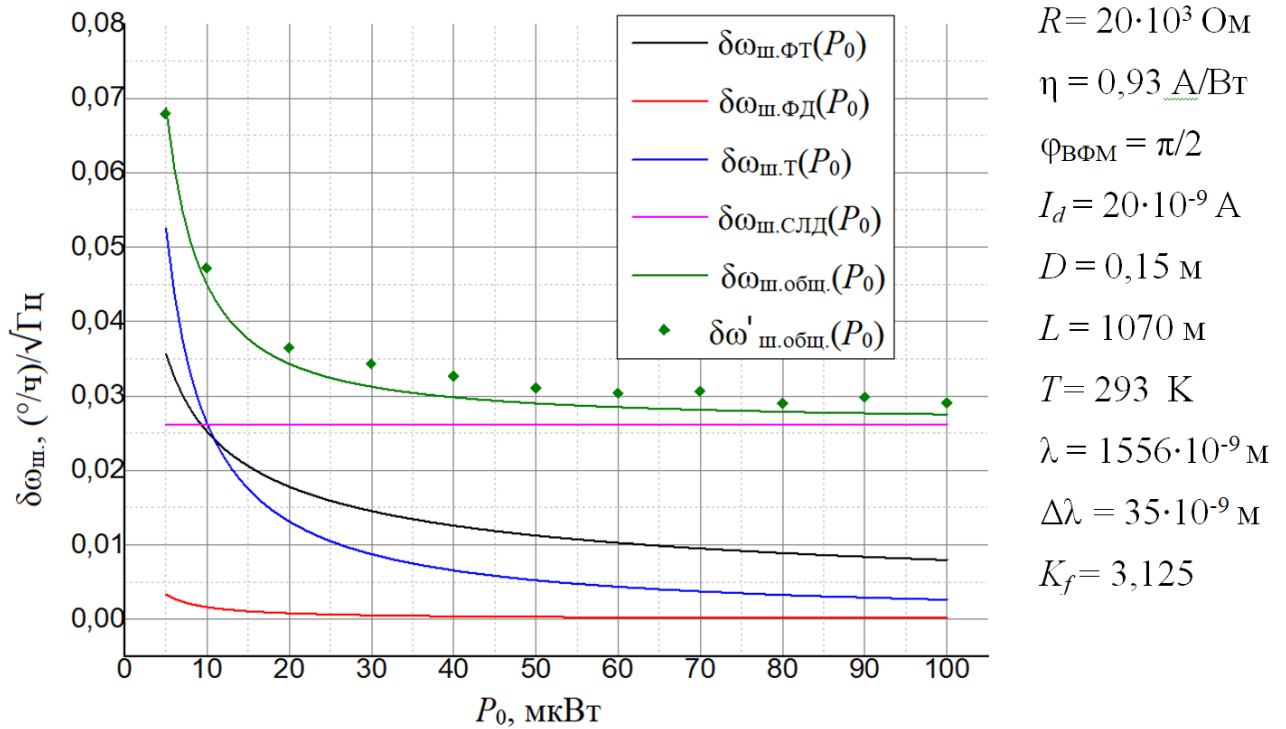


Рисунок 1.8 - Зависимость уровня шума от мощности оптического излучения. Справа приведены значения параметров выражения (1.22) и имитационной модели при расчете

Зависимость шума выходного сигнала ВОГ от сопротивления резисторов усилителя фототока представлена на рисунке 1.9. Поскольку вклад теплового шума резисторов (график $\delta\omega_{ш.Г}(R)$) в полный шум невелик, то начиная от значения сопротивления резисторов, равного 5 кОм, увеличение сопротивления резисторов не приводит к существенному влиянию на шум выходного сигнала.

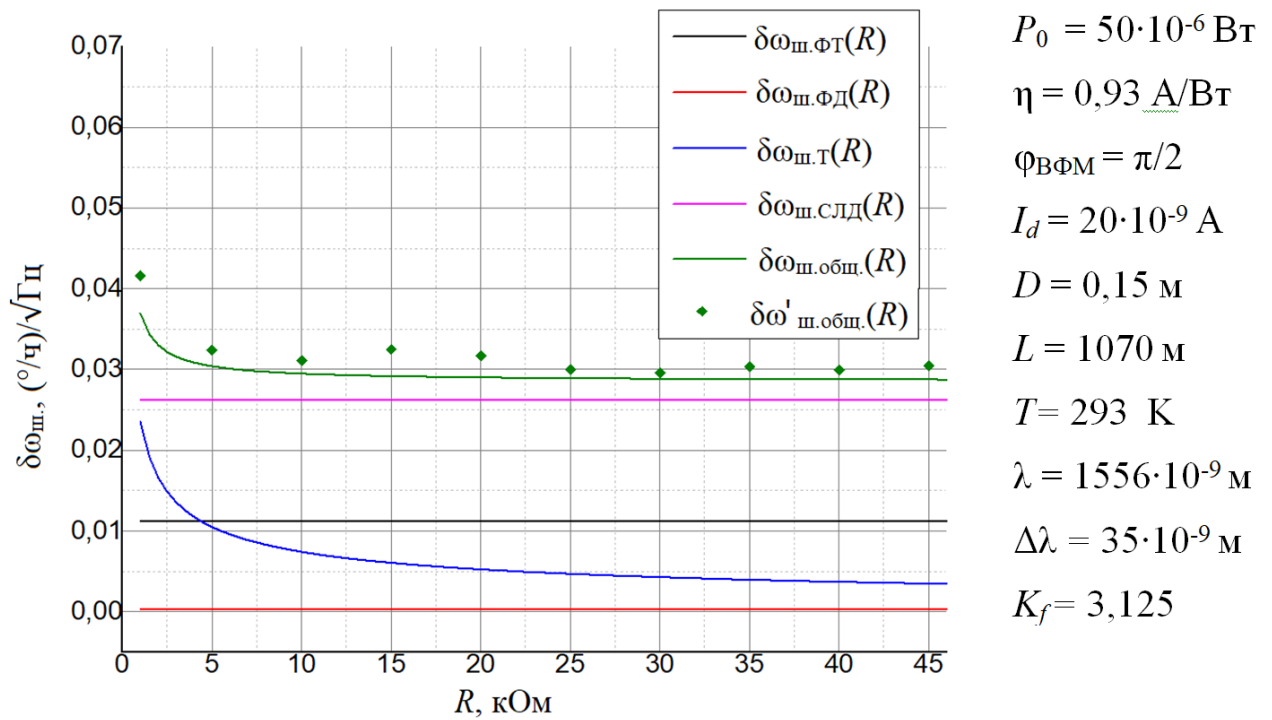


Рисунок 1.9 - Зависимость уровня шума от сопротивления резисторов усилителя фототока. Справа приведены значения параметров выражения (1.22) и имитационной модели при расчете

Расхождение результатов моделирования с помощью имитационной модели и выражением (1.22) определялось как максимальная величина относительной погрешности, вычисленной при одинаковых значениях параметров моделей по формуле:

$$\delta_{max} = \max_i \left(\frac{\delta\omega_{\text{ИМИТАЦ}(i)} - \delta\omega_{\text{ТЕОР}(i)}}{\delta\omega_{\text{ТЕОР}(i)}} \right) \cdot 100\%, \quad (1.32)$$

где δ_{max} - максимальное из вычисленных значений погрешностей, %; \max - функция, вычисляющая максимальное из значений своего аргумента; $\delta\omega_{\text{ИМИТАЦ}(i)}$ - значение СПМШ, определенное с помощью имитационной модели, $(^\circ/\text{ч})/\sqrt{\text{Гц}}$; $\delta\omega_{\text{ТЕОР}(i)}$ - значение СПМШ, определенное с помощью выражения (1.22), $(^\circ/\text{ч})/\sqrt{\text{Гц}}$; i - индекс фиксированной комбинации значений параметров моделей.

Анализ данных показывает, что результаты моделирования шума выражением (1.22) и компьютерной моделью для всех проверенных условий отличаются не более чем на 10%. Также из графиков рисунков 1.7 - 1.9 видно, что в большинстве рассмотренных случаев наибольший вклад в

суммарный шумовой сигнал составляет избыточный шум источника излучения.

1.7.3 Оценка достоверности моделей

Для оценки достоверности рассмотренных выше моделей был проведен анализ данных для выборки из 18 штук серийно выпускаемых волоконно-оптических гироскопов одного типа, отличающихся значениями параметров, входящих в выражения для определения спектральной плотности мощности шума.

В первую очередь были проанализированы результаты измерений шумовой составляющей выходного сигнала и вычислено значение спектральной плотности мощности шума выходного сигнала каждого образца по формуле (1.29).

Затем была проанализирована сопроводительная технологическая документация на каждый исследуемый образец, в результате чего были установлены значения параметров каждого образца, входящие в выражение (1.22). Полученные значения приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Зав.№	P_0 , мкВт	R , кОм	η , А/Вт	t , °С	$\Delta\lambda$, нм	λ , нм
23002	9,775	33,2	0,88	28,1	42,9	1532,6
23003	10,870	33,2	0,92	31,0	37,4	1546,4
23004	14,916	27,4	0,92	21,5	37,1	1545,5
23005	12,295	27,4	0,90	35,0	37,7	1547,3
23006	12,184	33,2	0,89	25,5	37,9	1545,4
23007	10,469	33,2	0,87	25,0	36,9	1539,5
23009	10,335	33,2	0,90	30,5	37,5	1547,4
23010	11,712	27,4	0,87	30,2	37,6	1547,0
23011	10,900	27,4	0,90	33,0	36,7	1537,8
23012	11,914	33,2	0,90	30,0	36,8	1545,7
23013	12,464	33,2	0,87	25,0	37,1	1547,5
23016	8,448	33,2	0,87	38,1	37,2	1529,0
23017	13,488	27,4	0,92	24,0	37,0	1546,0
23018	13,254	27,4	0,89	33,9	37,0	1545,0
23019	6,275	44,2	0,90	28,0	39,1	1531,0
23020	10,953	33,2	0,88	39,1	37,6	1547,0

Продолжение таблицы 1.1

Зав.№	P_0 , мкВт	R , кОм	η , А/Вт	t , °С	$\Delta\lambda$, нм	λ , нм
23022	11,001	33,2	0,92	33,9	37,3	1530,0
23024	8,420	33,2	0,89	35,6	38,5	1532,0

Примечание - Для всех образцов выборки: $D = 0,135$ м; $L = 1070$ м; $K_f = 1,5$; $\varphi = \pi/2$; $i_d = 10 \cdot 10^{-9}$ А.

Полученные значения параметров были подставлены в выражение (1.22) и вычислено теоретическое значение спектральной плотности мощности шума для каждого прибора из выборки.

Также, набор параметров каждого образца был подставлен в имитационную модель и для каждого набора проведена имитация работы ВОГ. Длительность реализации процесса имитации составляла одну секунду, период осреднения выходных данных составлял 10 мс, по полученным данным, по формуле (1.29) вычислено значение спектральной плотности мощности шума для каждого исследуемого образца.

На рисунке 1.10 приведены значения СПМШ для каждого прибора из выборки, вычисленные по результатам измерений, по аналитическому выражению (1.22) и в результате компьютерного моделирования.

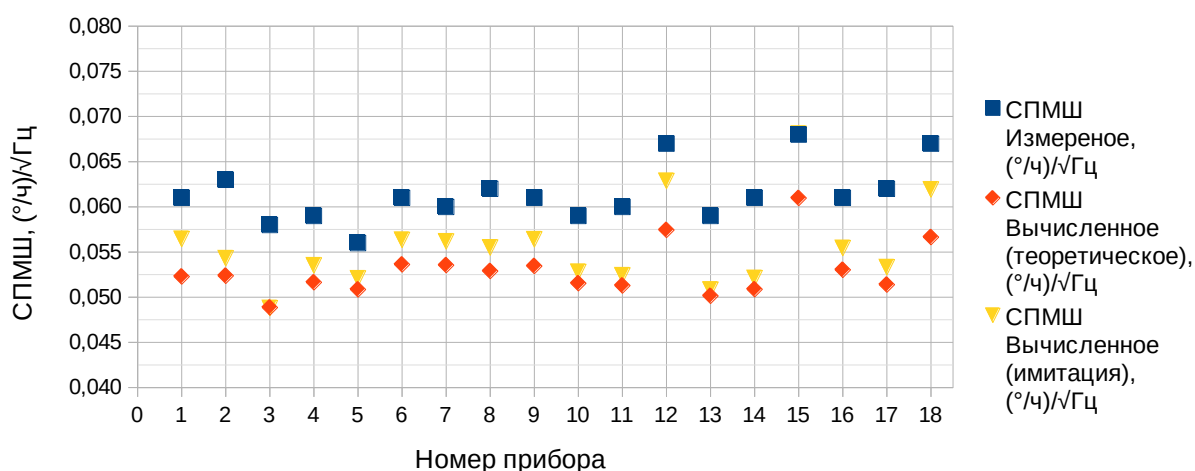


Рисунок 1.10 - Спектральная плотность мощности шума экспериментальной выборки

На рисунках 1.11 - 1.14 приведены значения абсолютной и относительной погрешности, вычисленные для отклонения результатов

вычисления по выражению (1.22) от результатов измерений и отклонений результатов имитационного моделирования от результатов измерения.

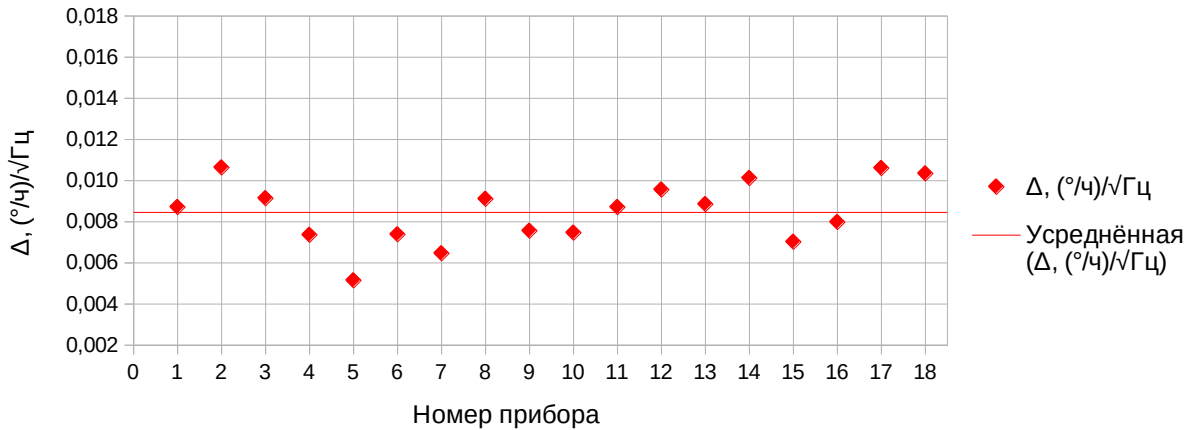


Рисунок 1.11 - Абсолютное отклонение значений СПМШ вычисленных по выражению (1.22) от вычисленных по измеренным значениям

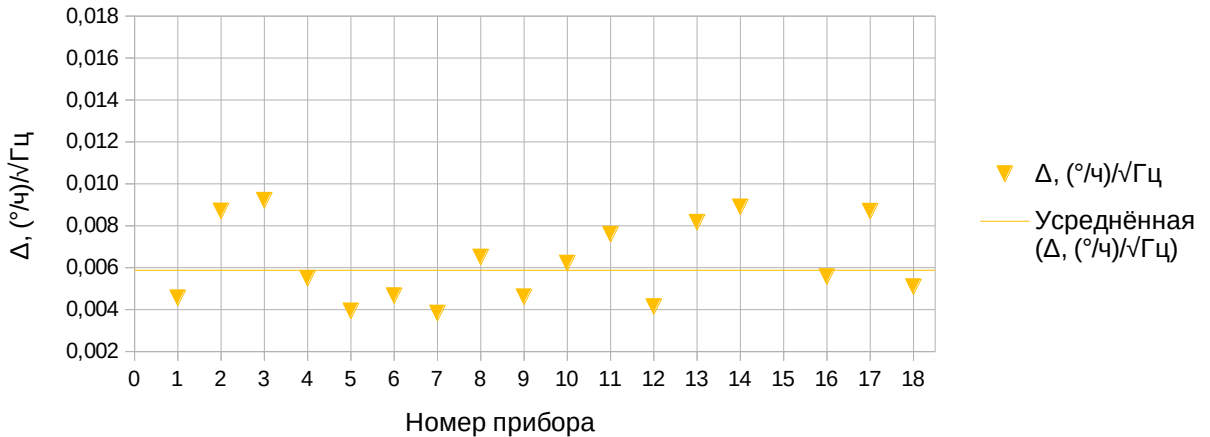


Рисунок 1.12 - Абсолютное отклонение значений СПМШ имитационной модели от вычисленных по измеренным значениям

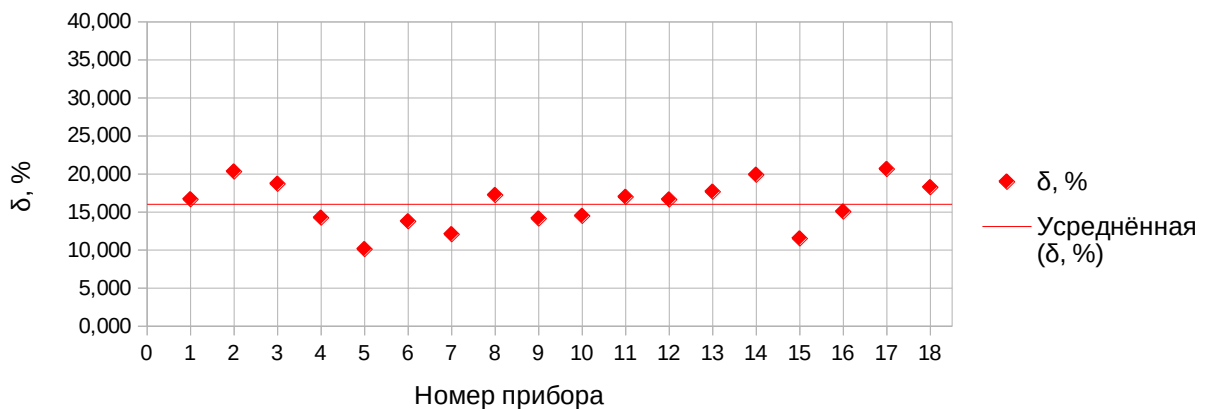


Рисунок 1.13 - Относительное отклонение значений СПМШ вычисленных по выражению (1.22) от вычисленных по измеренным значениям

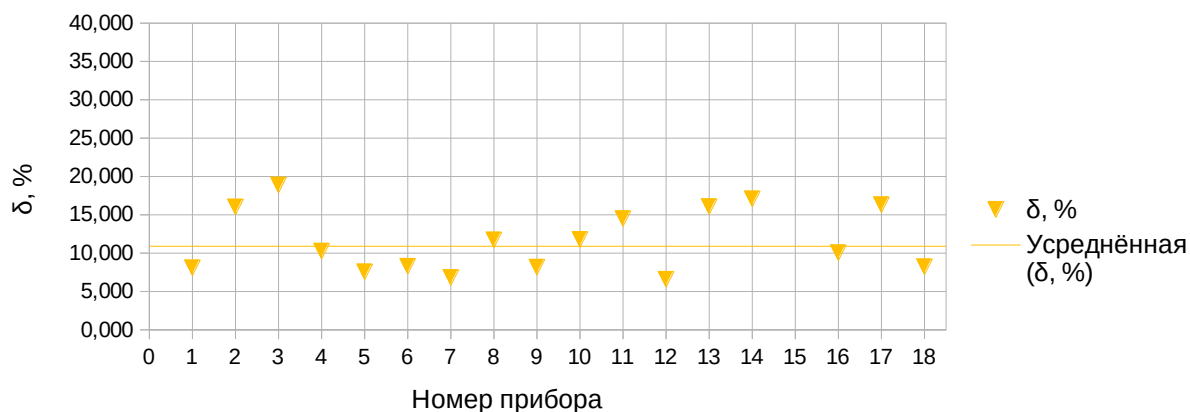


Рисунок 1.14 - Относительное отклонение значений СПМШ имитационной модели от вычисленных по измеренным значениям

В таблице 1.2 приведены значения коэффициента корреляции Пирсона, вычисленные для значений СПМШ выборки исследуемых образцов между результатами измерений и результатами вычислений по выражению (1.22) и между результатами измерений и результатами имитационного моделирования, а также средние значения абсолютной и относительной погрешности.

Таблица 1.2

Параметр	r	$\Delta, (^{\circ}/ч)/\sqrt{Гц}$	$\delta, \%$
Эксперимент / теор. выражение	0,878	0,008	16,028
Эксперимент / имитац. модель	0,885	0,006	10,898

Как видно из таблицы 1.2 значения коэффициентов корреляции в обоих случаях показывают сильную корреляционную связь между результатами эксперимента и результатами вычислений и моделирования. В то же время, значения абсолютной и относительной погрешности между экспериментом и результатами имитационного моделирования в среднем в 1,5 раза меньше чем между экспериментом и вычисленными по (1.22) значениями.

Полученный результат в целом можно считать удовлетворительным. Рассогласование между результатами измерений и

результатами моделирования в среднем равно 11 %. Как будет показано в следующей главе настоящей работы, такое расхождение, между предсказанным и реальным результатами, может быть вызвано наличием в схеме ВОГ других источников шума, не учтенных представленной моделью.

1.8 Выводы по первой главе

В первой главе была представлена вводная информация, необходимая для понимания принципов функционирования ВОГ и процессов формирования шумовой составляющей выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа и методов его оценки. Также в первой главе был проведен вывод основополагающего для всей дальнейшей работы теоретического выражения для определения спектральной плотности мощности шума в выходном сигнале ВОГ. Описанная в первой главе имитационная модель работы ВОГ с включенными в ее состав источниками шума позволяет проводить полунатурные эксперименты без необходимости изготавливать и настраивать физические прототипы ВОГ.

В целом, результаты моделирования, а также проверки моделей путем сравнения результатов моделирования с результатами натуральных испытаний можно оценить как положительные. Модели учитывают все известные естественные источники шумов, присущие ВОГ минимальной конфигурации ВКИ. Расхождение в результатах, полученных при вычислении СПМШ по выражению (1.22), и при компьютерном моделировании не превышает 10 %. Расхождение между результатами моделирования и экспериментальными данными составляет в среднем 11 %. В то же время нужно уточнить, что сравнение модельных и экспериментальных данных проводилось при малой вариации значений

основных параметров модели, обусловленной однотипностью исследуемых образцов. Для дополнения результатов, во второй главе будет проведено сравнение модельных и экспериментальных данных макета ВОГ с системой снижения шума для различных значений глубины ВФМ.

Глава 2. Адаптированный цифровой метод снижения уровня шума выходного сигнала ВОГ за счет подавления шума интенсивности источника оптического излучения

2.1 Адаптированный метод и функциональная схема ВОГ с системой снижения шума выходного сигнала

В настоящее время известно множество способов борьбы с шумом в выходном сигнале ВОГ. При проектировании ВОГ разработчики «по умолчанию» закладывают максимально возможный уровень мощности оптического излучения и значения резисторов обратной связи трансимпедансного усилителя фототока для снижения влияния дробового шума фототока и теплового шума усилителя на уровень шума выходного сигнала. Также предлагаются различные схемотехнические решения для борьбы с дробовыми и тепловыми шумами [109, 110]. Из литературы нам известно, по меньшей мере, о трех разных подходах в борьбе с шумом интенсивности источника оптического излучения при использовании минимальной конфигурации ВКИ ВОГ. Кратко они были упомянуты во введении, рассмотрим их более подробно.

Быстродействующий аналоговый контур отрицательной обратной связи, охватывающий схему накачки источника оптического излучения. Данный метод был опубликован в работе [65]. Функциональная схема системы шумоподавления, основанная на реализации данного метода представлена на рисунке 2.1.

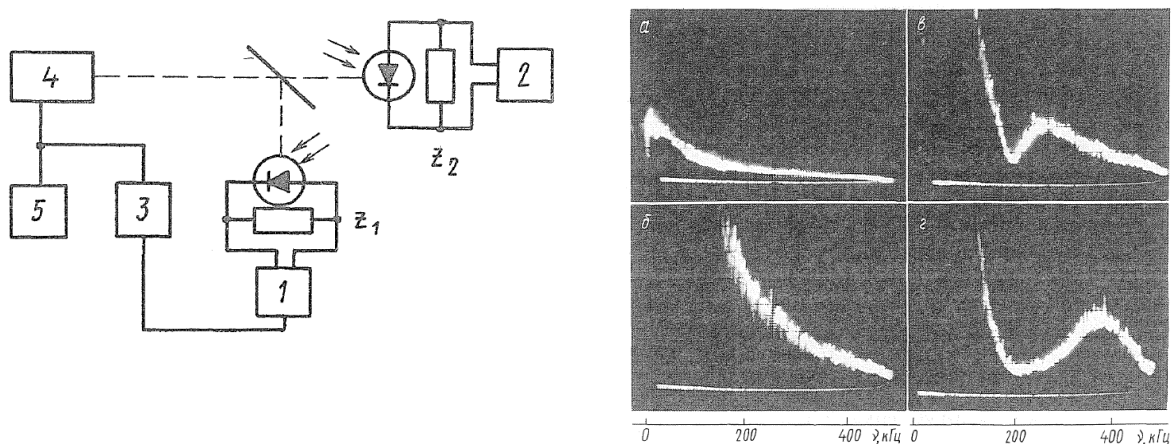


Рисунок 2.1 - Блок-схема системы шумоподавления по методу с обратной связью по току накачки и спектрограммы шума выходного сигнала измерительного канала интерферометра: *a* - спектр дробового шума фотоприемника; *b* - спектр сигнала без шумоподавления; *v, z* - спектры сигнала с небольшой и максимальной обратной связью, из статьи [65]

Принцип действия данного метода заключается в модулировании величины тока накачки полупроводникового лазера таким образом, чтобы скомпенсировать флуктуации мощности оптического излучения на его выходе. Для реализации данного метода, с помощью блока питания 5 лазера, рабочая точка тока накачки на Ватт-Амперной характеристике лазера выбирается на относительно линейном ее участке таким образом, чтобы можно было осуществлять модуляцию тока накачки в окрестностях этой точки. Оптическое излучение от лазера 4 разделяется на две, в общем случае, не равные по мощности части, одна часть направляется в оптическую схему интерферометра Саньяка (на рисунке не показана), попадает на фотоприемник измерительного канала, где преобразуется в электрический ток и далее после усилителя 2 сигнал поступает в схему обработки ВОГ (на рисунке не показана).

Другая часть оптического излучения поступает на фотоприемник измерительного канала контура обратной связи, преобразуется в электрический сигнал, который затем усиливается узкополосным избирательным усилителем 1, совмещенным с фазовращателем и подается в

схему управления током накачки лазера 3. Численные оценки коэффициента снижения шума, приведенные авторами данного метода составляют от 5 до 9 дБ в зависимости от среднего значения тока накачки и соотношения среднего значения фототока в измерительных каналах. На спектрограммах *в*, *г* рисунка 2.1 видно изменение уровня шума на выбранной частоте (в окрестностях 200 кГц) при включенной небольшой и максимальной обратной связи по сравнению с амплитудой шума при выключенной обратной связью, представленной на спектрограмме *б*.

К достоинствам данного метода можно отнести относительную простоту его технической базовой реализации: к схеме «минимальной конфигурации» ВОГ добавляется разветвитель, фотоприемное устройство с усилителем и быстродействующая схема управления током накачки лазера.

На момент разработки данного метода ВОГи строились на аналоговых схемах с использованием синусоидальной вспомогательной фазовой модуляции. При таком виде модуляции информация о действующей на ВОГ угловой скорости содержится в амплитуде первой гармоники сигнала фотоприемника, соответствующей частоте вспомогательной фазовой модуляции. В связи с этим подавление шума в узком частотном диапазоне на частоте первой гармоники выходного сигнала действительно могло привести к существенному снижению уровня шума в выходном сигнале ВОГ. В настоящее время в ВОГ с цифровой обработкой сигналов применяют прямоугольную вспомогательную фазовую модуляцию, при этом информация об угловой скорости содержится в амплитуде меандра выходного сигнала фотоприемника (в ВОГ с замкнутым контуром обратной связи по измерению угловой скорости информация об угловой скорости содержится в величине компенсирующего сигнала, «обнуляющего» амплитуду меандра выходного сигнала фотоприемника). При таком методе вспомогательной модуляции и съема информации узкополосная фильтрация шума не приведет к значительному снижению шума выходного сигнала, так как спектр меандра содержит сумму нечетных гармоник. Практические

исследования показывают, что для достижения заданной точности при цифровом измерении выходного сигнала фотоприемника частота дискретизации сигнала должна быть примерно на два порядка больше частоты первой гармоники измеряемого меандра. То есть для эффективного шумоподавления требуется снижать шум в широком диапазоне частот (десятки МГц), что значительно усложняет техническую реализацию данного метода.

Вторым недостатком данного метода является зависимость коэффициента шумоподавления от изменения мощности оптического сигнала на фотоприемнике канала обратной связи, вызванное, например, изменением внешних условий (температура, давление, радиация) или деградацией оптических элементов с течением времени.

Оптический метод подавления шума интенсивности источника оптического излучения. Подробное описание данного метода было приведено в работах [66, 67].

На рисунке 2.2 приведена оптическая схема интерферометра Саньяка с компенсирующей шум обратной связью.

Оптическое излучение источника «source» проходит через поляризатор «polarizer» и поступает на первый разветвитель, сохраняющий состояние поляризации «PM coupler». Излучение с одного из его выходов проходит через второй разветвитель сохраняющий состояние поляризации «PM (95/5) coupler» с коэффициентом деления 95/5 и поступает на фазовый модулятор «МОС», где разделяется пополам и направляется во встречном направлении в волоконную катушку (ВК) «coil». После прохождения через ВК встречные оптические волны интерферируют в модуляторе и поступают во второй разветвитель, также во второй разветвитель, пройдя через изолятор «isolator» поступает часть оптического излучения, отведенная первым разветвителем. В разветвителе сигналы суммируются, после чего сигнал проходит через первый разветвитель и попадает на фотоприемник «detector».

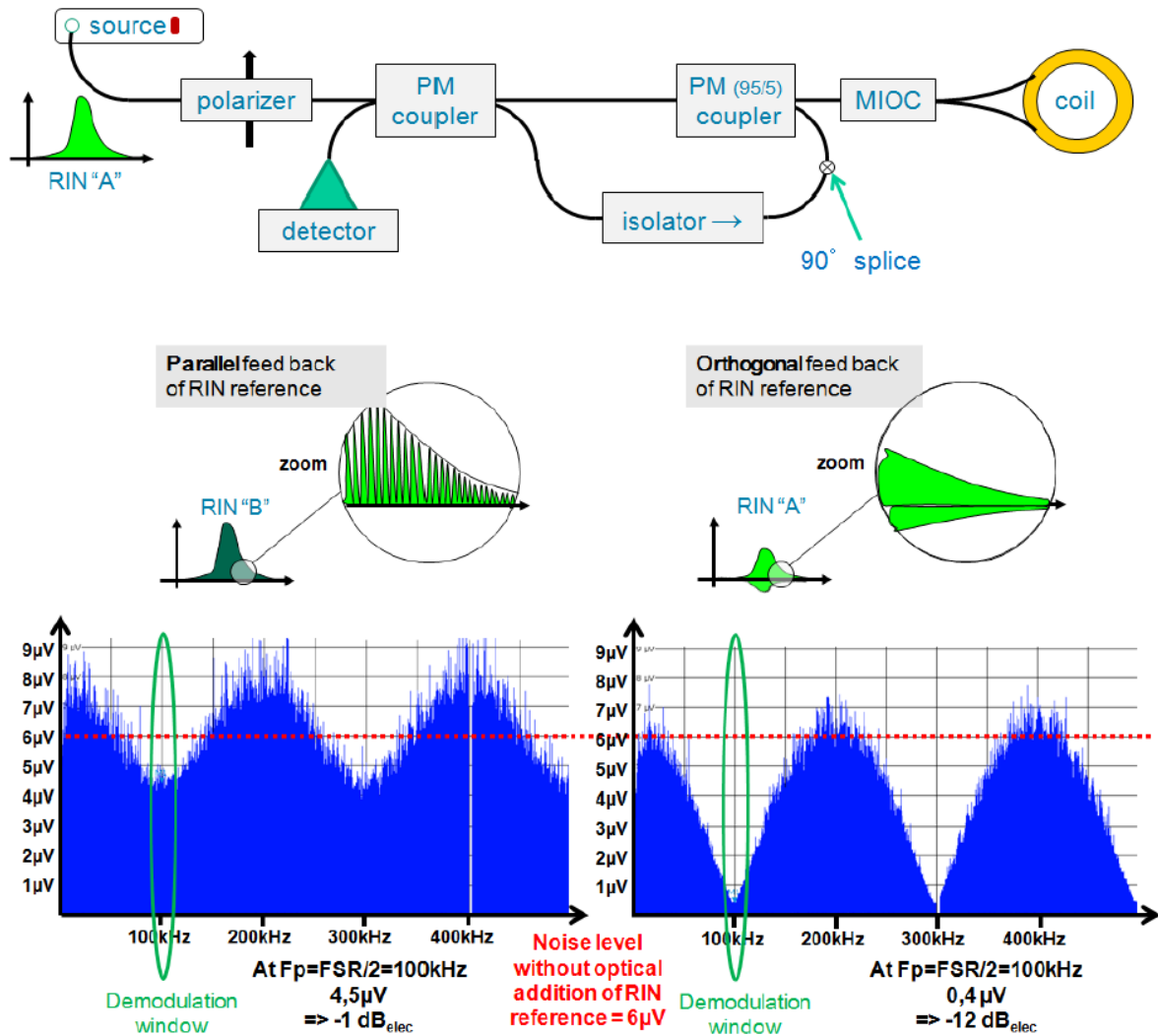


Рисунок 2.2 - Схема системы шумоподавления с контуром оптической обратной связи и спектрограмма шума выходного сигнала, из статьи [66]

Проходя через ВК оптическое излучение получает задержку распространения $\tau = \frac{nL}{c}$, где n - показатель преломления сердцевины оптического волокна, L - длина волоконного контура, c - скорость света в вакууме. Таким образом, на вход второго разветвителя поступают два сигнала: один из них содержит шумовую составляющую, другой - идентичную шумовую составляющую, задержанную на время τ и сигнал интерферометра.

Шум источника оптического излучения обладает равномерным спектральным распределением в широкой полосе частот [104], такой шум может рассматриваться как белый с автокорреляционной функцией

представляющей собой дельта-функцию. При смещении такого сигнала относительно самого себя во временной области (как мы наблюдаем в рассматриваемой схеме) коэффициент корреляции будет стремиться к нулю, а среднеквадратическое значение суммы таких сигналов будет равно корню из суммы их дисперсий $\sigma = \sqrt{D_1 + D_{1-\tau}}$.

Единственным исключением является спектральная составляющая на частоте $f = \frac{1}{2\tau}$ и ее нечетные гармоники (и их окрестности), за счет сдвига на время τ она имеет взаимный фазовый сдвиг относительно самой себя, равный $N\pi$, где $N=1, 3, 5\dots$ для соответствующих гармоник и при смешивании сигналов подавляется (что видно из приведенных на рисунке графиков).

Для устранения возможной интерференции сигналов при их суммировании во втором разветвителе, исходный сигнал, прошедший через изолятор, вводят в разветвитель таким образом, чтобы его плоскость поляризации была ортогональна плоскости поляризации основного сигнала. На рисунке 2.2 график, расположенный в левой части показывает результат шумоподавления при прямом вводе сигнала шума, график в правой части рисунка - шумоподавление при ортогональном вводе сигнала шума. Как видно из графика, данный метод позволяет снизить шум на выбранной частоте и ее нечетных гармониках на величину до 12 дБ.

К достоинствам данного метода можно отнести отсутствие дополнительных источников шума, - второго фотоприемника и схемы обработки для измерения шума интенсивности источника оптического излучения, и простоту технической реализации, а также возможность работы в цифровых ВОГ с прямоугольной вспомогательной фазовой модуляцией.

Основным и принципиально неустранимым недостатком данного метода является зависимость коэффициента шумоподавления от внешних условий и времени, - любое изменение соотношения мощностей сигналов, поступающих на второй разветвитель относительно оптимального значения, будет приводить к снижению коэффициента шумоподавления.

Цифровой метод подавления шума интенсивности источника оптического излучения. Различные реализации данного метода описываются в работах [68 - 70]

Блок-схема ВОГ, в составе, которого реализован данный метод, представлена на рисунке 2.3.

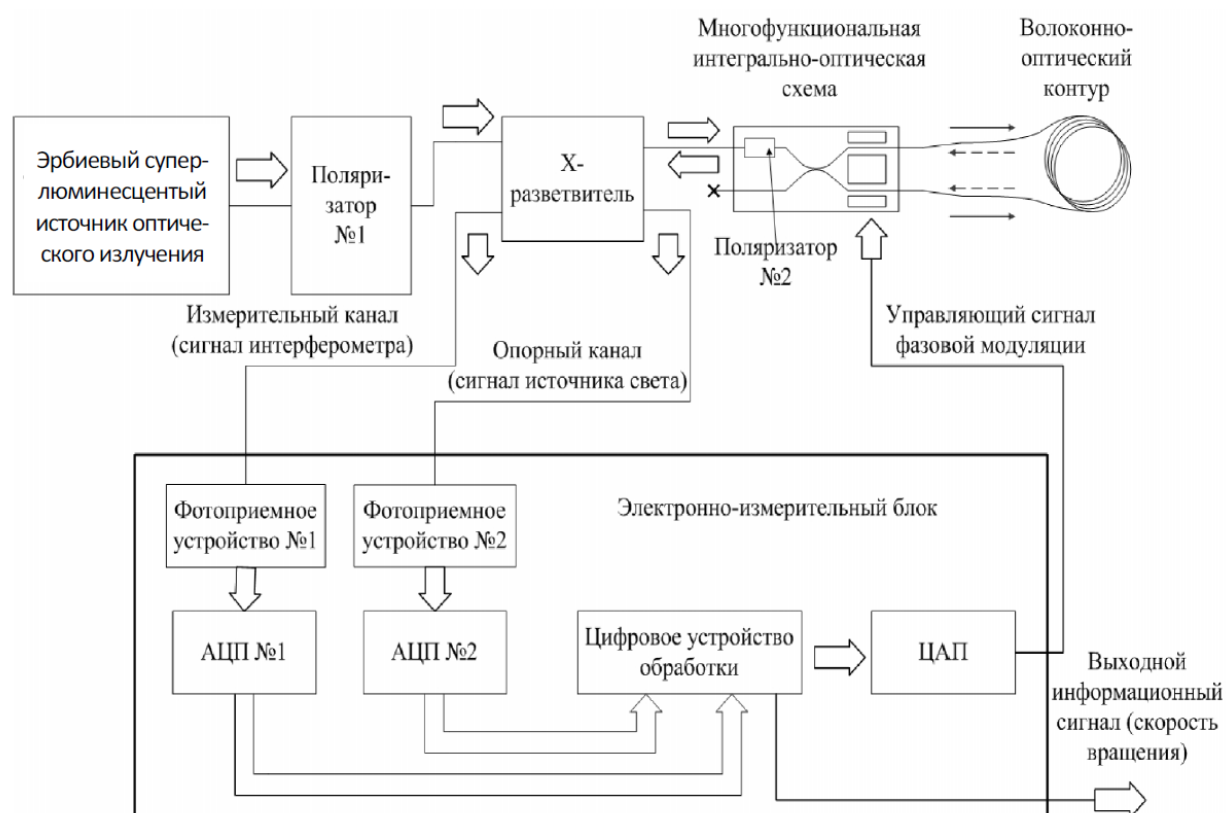


Рисунок 2.3 - Схема ВОГ с цифровой системой снижения шума, из статьи [68]

Оптическое излучение от эрбиевого суперлюминисцентного источника проходит через поляризатор №1 и поступает на X - разветвитель. Часть сигнала после разветвителя подается в многофункциональную интегрально-оптическую схему (МИОС), реализующую функцию X - разветвителя, поляризатора №2 и фазового модулятора, где разделяется на две равные части и во встречном направлении проходит в волоконный контур. Пройдя ВК, оптические волны объединяются в МИОС, и далее оптический сигнал, несущий информацию о фазе Саньяка и шум

интенсивности источника излучения, через поляризатор №2 и X - разветвитель попадает на фотоприемное устройство №1. Далее преобразованный сначала в электрический, а затем в цифровой вид сигнал поступает в цифровое устройство обработки, где формируется выходной сигнал измеренной угловой скорости и управляющий сигнал фазовой модуляции. Другая часть оптического излучения, пройдя X - разветвитель в направлении от источника излучения сразу попадает на фотоприемное устройство №2 и затем через аналого-цифровой преобразователь в цифровое устройство обработки.

В цифровом устройстве обработки реализуется функция задержки сигнала опорного канала на время прохождения сигнала измерительного канала по волоконной катушке и деление сигнала измерительного канала на сигнал опорного канала, что должно приводить к снижению шума в выходном сигнале.

По результатам проведенных в работе [68] исследований коэффициент снижения шума при использовании данного метода и заданных значений параметров схемы ВОГ составляет от 2,82 до 4.3 раза в зависимости от времени усреднения анализируемых сигналов, что говорит о присутствии в сигнале окрашенного шума.

В работе [68] уделено внимание зависимости коэффициента шумоподавления от параметров сигналов опорного и измерительного каналов, - для максимального снижения шума оба оптических сигнала должны содержать только одну поляризационную составляющую, а после преобразования сигналов в электрическую форму - одинаковый спектральный состав и амплитуду шумовой составляющей.

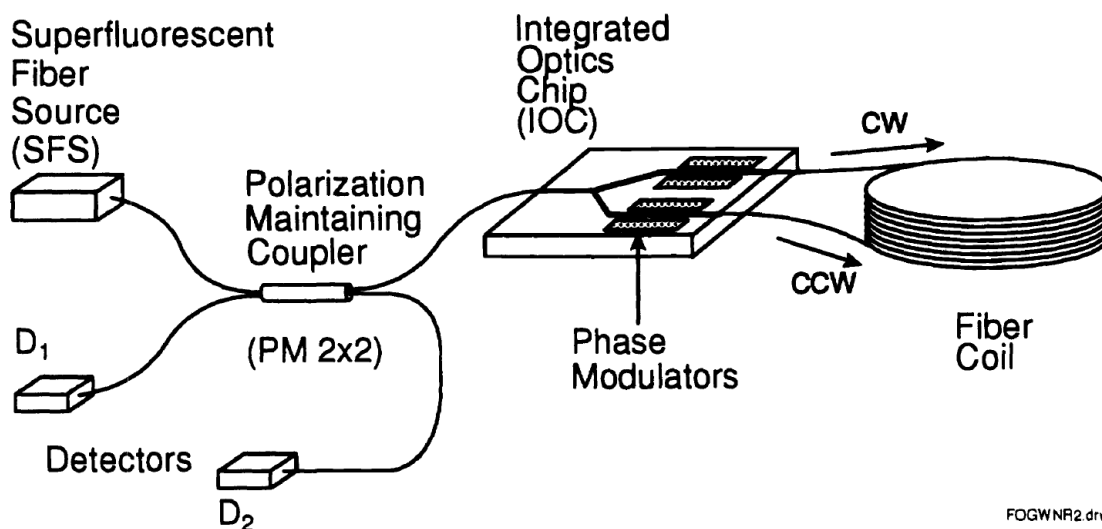
К недостаткам данного метода можно отнести некоторое усложнение ВОГ за счет добавления в оптическую схему X - разветвителя и второго фотоприемника, в электрическую схему - второго усилителя фототока и аналого-цифрового усилителя, в цифровую схему блока задержки сигнала опорного канала и блока деления. Внесение в схему второго фотоприемника

и усилителя фототока приводит к некоторому увеличению результирующего уровня шума.

К достоинствам данного метода относится возможность точной и простой настройки параметров задержки и усиления сигналов в цифровой форме, возможность реализовать дополнительные следящие связи для поддержания оптимальных параметров системы шумоподавления.

Даже в пределах одного подхода могут существовать различные методы в зависимости от сложившихся научно-технических традиций, конкретных конструктивных или схемотехнических решений и так далее.

Дальнейшие рассуждения будут проведены на основе работы [69]. На рисунке 2.4 представлена оптическая схема, а на рисунке 2.5 - функциональная блок-схема ВОГ со схемой снижения шума выходного сигнала из работы [69].

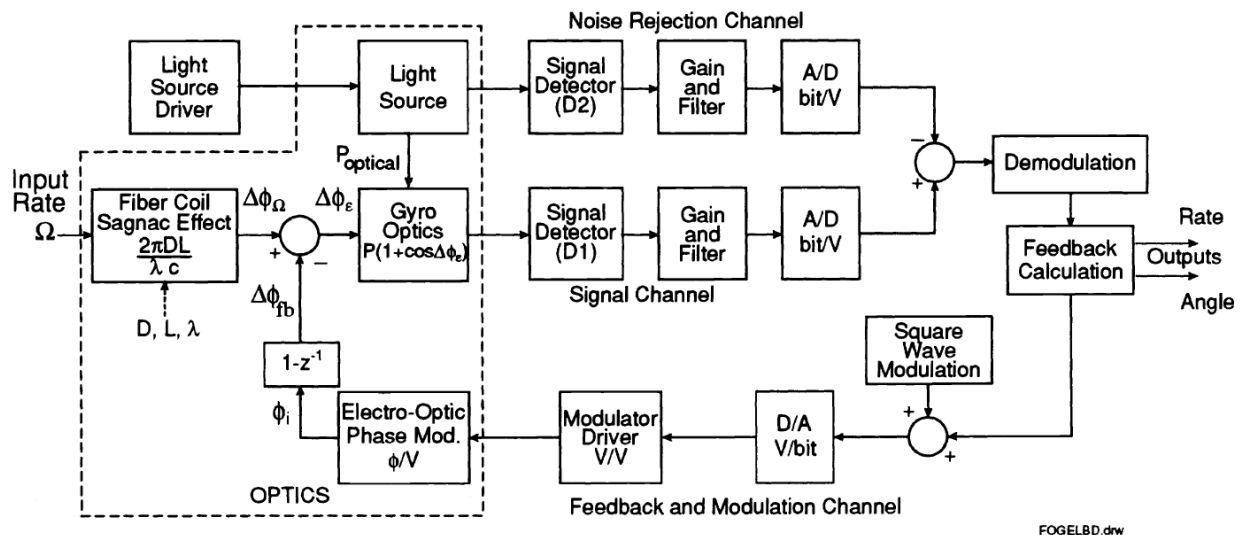


Superfluorescent Fiber Source (SFS) - суперфлуоресцентный волоконный источник; Detectors - (фото) детекторы; Polarization Maintaining Coupler - разветвитель, сохраняющий поляризацию; Integrated Optics Chip (IOC) - интегральный оптический чип; Phase Modulators - фазовые модуляторы; Fiber Coil - волоконная катушка;

Рисунок 2.4 - Оптическая схема ВОГ с системой снижения шума из работы

[69]

Оптическая схема содержит источник оптического излучения, свет от которого, проходя через разветвитель-поляризатор, делится на две равные части, одна из которых направляется в детектор D_2 опорного измерительного канала, а вторая - в интерферометр Саньяка, образованный фазовым модулятором в составе интегрального оптического чипа, волоконным контуром и детектором D_1 .



Light Source Driver - блок управления источником света; Light Source - источник света; Signal Detector - детектор сигнала; Gain and filter - усиление и фильтрация; A/D - аналогово-цифровой преобразователь; Demodulation - демодулятор; Fiber Coil - волоконная катушка; Gyro Optics - оптический гироскоп; Feedback Calculation - вычисление обратной связи; Electro-Optic Phase Mod. - электро-оптический фазовый модулятор; Modulator Driver - блок управления модулятором; D/A - цифро-аналоговый преобразователь; Square Wave Modulation - прямоугольная модуляция; Input Rate - входящая угловая скорость; Noise Rejection Channel - канал подавления шума; Feedback and Modulation Channel - канал обратной связи и модуляции; Outputs Rate / Angle - выходы по угловой скорости / углу

Рисунок 2.5 - Функциональная схема ВОГ с системой снижения шума из работы [69]

Функциональная схема (Рисунок 2.5) содержит два идентичных измерительных канала: «Signal Channel» для измерения полезного сигнала и «Noise Rejection Channel» для измерения шума источника излучения «Light

Source». Вычитание сигналов осуществляется до демодулирования полезного сигнала, на частоте аналого-цифрового преобразования. На схеме не показаны линия задержки и блок амплитудной коррекции сигнала «Noise Rejection Channel», необходимые для синхронизации коррелированной шумовой составляющей сигналов во времени и по средней мощности. Кроме того, коэффициент усиления детектора D2 должен быть значительно меньше, чем у детектора D1, поскольку потери мощности оптического излучения в основном измерительном канале в разы превосходят потери в опорном канале. В работе [69] заявлено, что в результате применения данного метода было достигнуто уменьшение на 40 % шума интенсивности источника оптического излучения.

В статье не обосновывается полученный результат, сказано только, что дальнейшее улучшение обработки сигнала позволило уменьшить уровень шума до 50 % от исходного.

Необходимость адаптации и модернизации данного метода объясняется интеграцией системы снижения шума в уже отработанную и устоявшуюся схему и конструкцию ВОГ, а также оптимизацией расходов вычислительной мощности цифровой схемы обработки сигналов ВОГ.

На рисунке 2.6 приведена блок-схема ВОГ с адаптированной схемой снижения шума.

Блок источника оптического излучения состоит из платы управления излучателем (ПУИ) и передающего оптического модуля. Данный модуль представляет собой объединенные в общем корпусе суперлюминисцентный диод (СЛД), датчик температуры (ДТ) - терморезистор и микроохладитель (МО) на основе элемента Пельтье [111, 112].

Оптическое излучение через циркулятор (ОЦ) поступает в разветвитель-поляризатор (РП) с коэффициентом деления 2/1. Большая часть оптического излучения направляется в интерферометр Саньяка (измерительный канал 1 - ИК1), представленный многофункциональным интегрально-оптическим модулем (МИОМ), объединяющим в своем составе

разветвитель-поляризатор с коэффициентом деления 1/1 и двухплечевой электрооптический фазовый модулятор, волоконным контуром (ВК), представляющим собой цилиндрическую катушку, намотанную одномодовым, сохраняющим состояние поляризации, кварцевым волокном на металлическом каркасе и фотоприемным устройством, состоящим из фотодиода ФД2 и усилителя фототока УФТ2. Циркулятор предохраняет источник оптического излучения от излучения, прошедшего в обратном направлении через разветвители-поляризаторы.

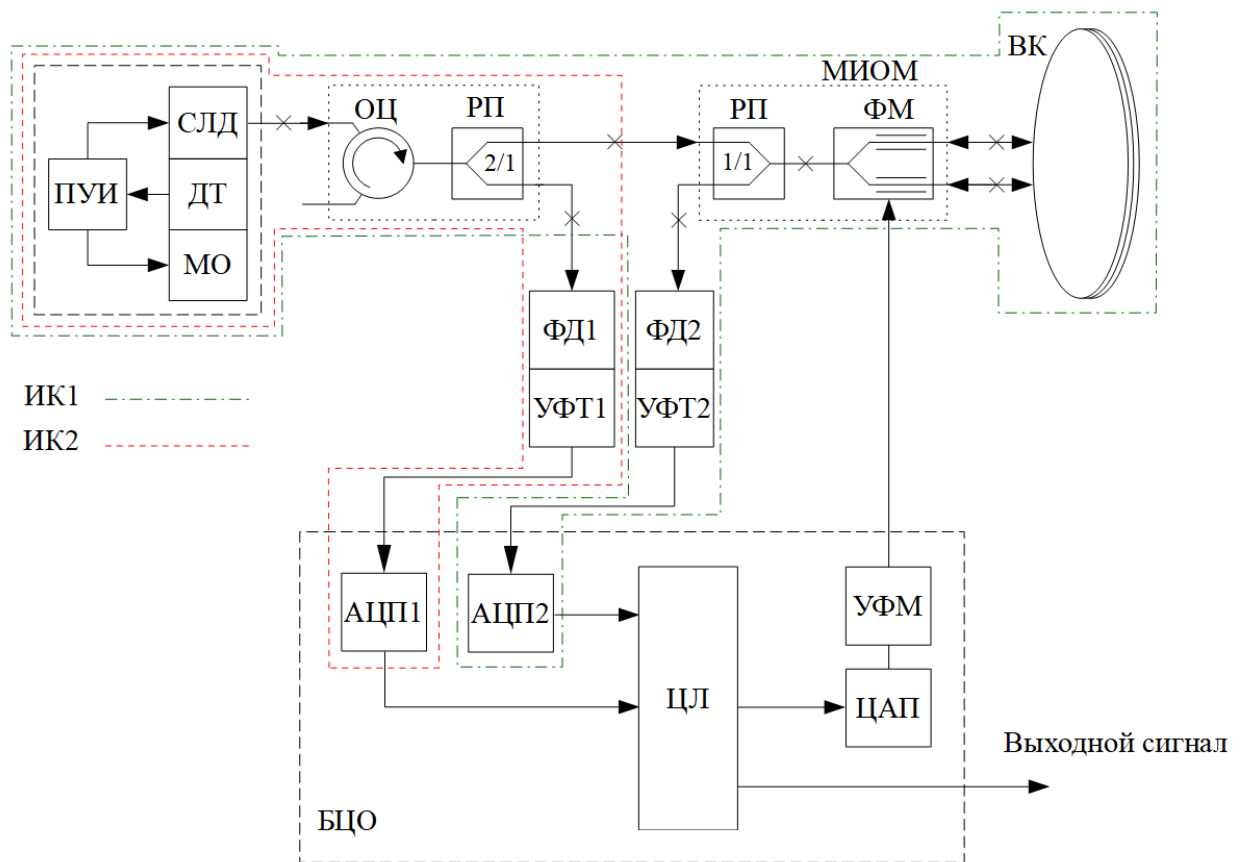


Рисунок 2.6 - Блок-схема ВОГ со схемой снижения шума

Меньшая часть оптического излучения с разветвителя-поляризатора направляется в фотоприемное устройство измерительного канала 2 (ИК2) - ФД1 и УФТ1.

На рисунке 2.7 представлена функциональная схема электронного блока ВОГ.

Основные сигналы измерительных каналов ИК1, ИК2 преобразуются в цифровую форму высокочастотными АЦП_{Б1}, 2 (частота дискретизации составляет 24,576 МГц). Сигнал ИК1 приходит на АЦП_{Б2} с задержкой равной времени обхода оптическим излучением схемы интерферометра Саньяка, а сигнал ИК2 приходит практически без задержки, цифровая линия задержки (цифровой конвейер) выравнивает фронты сигналов ИК1, ИК2 перед тем, как они поступают в демодуляторы 2.1 и 1.1, соответственно.

Демодуляторы 1.1 и 2.1 представляют собой фазочувствительные выпрямители сигнала, работающие на частоте вспомогательной фазовой модуляции $f_{ВФМ}$ и совмещенные с дециматорами сигнала до частоты, равной удвоенной частоте вспомогательной фазовой модуляции $2f_{ВФМ}$.

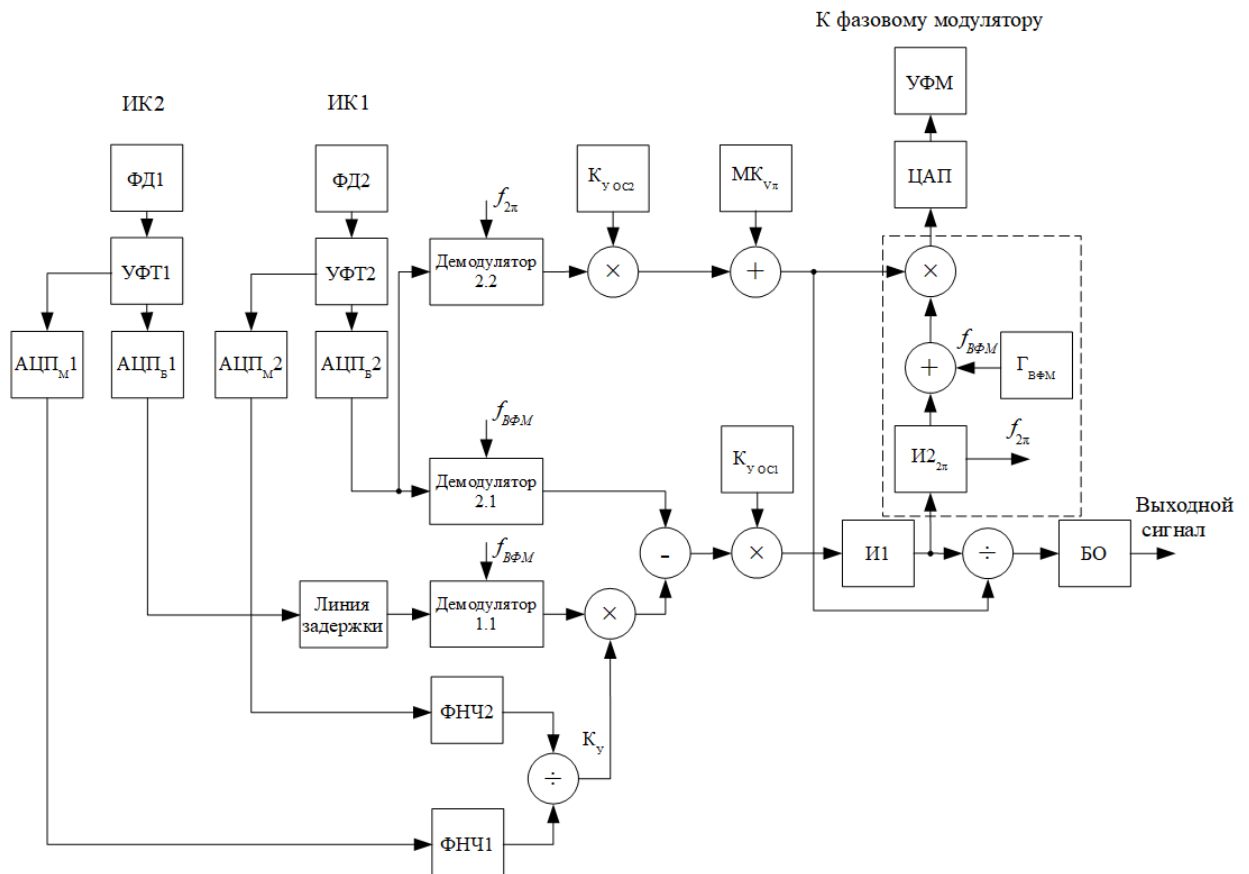


Рисунок 2.7 - Функциональная схема электронного блока ВОГ со схемой снижения шума

Снижение шума происходит при вычитании сигнала с выхода демодулятора 1.1 из сигнала демодулятора 2.1 на частоте $2f_{ВФМ}$. В схеме ВОГ

компенсационного типа с замкнутым контуром обратной связи по измерению угловой скорости полученный сигнал называется сигналом рассогласования. Он поступает на интегратор И1. Выходной сигнал И1 пропорционален действующей на ВОГ угловой скорости.

Сигнал с интегратора И1 поступает на интегратор И2, входящий в схему формирования сигнала фазовой модуляции. Сигнал фазовой модуляции складывается из сигнала вспомогательной фазовой модуляции, задающего рабочую точку интерферометра в отсутствие угловой скорости и сигнала компенсирующей обратной связи, возвращающего рабочую точку на заданное значение с частотой $2f_{\text{ВФМ}}$. Сигнал фазовой модуляции представляет собой «лесенку», длина «ступеньки» которой $\tau = \frac{1}{2f_{\text{ВФМ}}}$, а высота соответствует фазе Саньяка $\delta\varphi_i$, которую нужно скомпенсировать в данный момент времени τ . При этом, по достижении значения $\sum \delta\varphi_i = 2\pi$ происходит обнуление значения компенсирующей фазовой модуляции [89].

Эта схема также охвачена контуром отрицательной обратной связи. Демодулятор 2.2 выделяет сигнал рассогласования на частоте обнуления компенсирующей фазовой модуляции $f_{2\pi} = \frac{1}{T_0}$. Период T_0 при этом определяется угловой скоростью, измеряемой прибором. Применение этого контура позволяет компенсировать изменение электрооптического коэффициента, значительно зависящего от температуры фазового модулятора [113, 114]. Типичный вид сигнала компенсирующей фазовой модуляции приведен на рисунке 2.5.

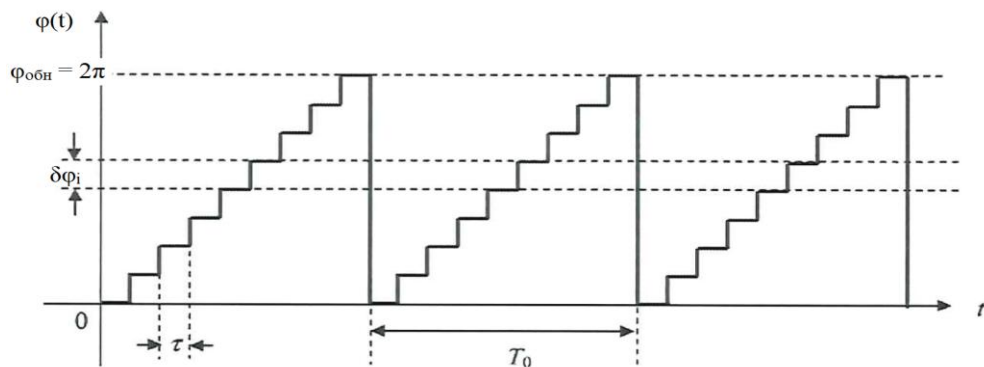


Рисунок 2.8 - Компенсирующая фазовая модуляция

Помимо основных сигнальных цепей, описанных выше, существуют также дополнительные каналы измерения, реализованные с помощью дополнительных выходов УФТ_{1, 2} и низкочастотных АЦП_{М1, 2}. Сигналы этих измерительных каналов необходимы для измерения средней мощности оптического излучения, поступающего на фотодиоды ФД₁, ФД₂ и последующего вычисления коэффициента усиления сигнала ИК₂ для выравнивания интенсивности шумовой коррелированной составляющей сигналов измерительных каналов.

Подводя итог можно сказать, что не считая несколько отличной оптической схемы, адаптация данного компенсационного метода снижения уровня шума в выходном сигнале ВОГ сводится к переносу «точки» вычитания сигналов в цифровом алгоритме на частоту $2f_{\text{ВФМ}}$, благодаря чему стало возможным реализовать контур коррекции интенсивности шума в сигнале ИК₂ в режиме реального времени.

2.2 Обобщенное аналитическое выражение для шумовой составляющей выходного сигнала ВОГ с учетом системы снижения шума

В первой главе были подробно рассмотрены естественные источники собственного шума ВОГ, вносящие основной вклад в формирование шумовой составляющей выходного сигнала ВОГ. Было составлено обобщенное математическое выражение для определения суммарного уровня шума в выходном сигнале ВОГ. Определен источник, вносящий основной вклад в общий уровень шума - шум интенсивности источника оптического излучения.

В этой главе будет рассмотрена математическая модель шума в выходном сигнале ВОГ с системой компенсации шума, реализованной согласно схемам, приведенным на рисунках 2.6 и 2.7, и будет проведен

анализ влияния значений параметров этой модели на уровень шумовой составляющей выходного сигнала ВОГ.

На рисунке 2.6 представлена блок-схема ВОГ со схемой основного измерительного канала (ИК1), выполненного по схеме интерферометра Саньяка, выходной сигнал которого содержит как полезную составляющую, несущую информацию об измеренной угловой скорости, так и шумовую составляющую и дополнительного измерительного канала (ИК2), выходной сигнал которого содержит только шумовую составляющую. Как видно из рисунка 2.6, оба измерительных канала содержат общий источник оптического излучения, - суперлюминесцентный диод, который, согласно [71], вносит основной вклад в результирующий шум выходного сигнала ВОГ (выражение (1.13) - шум интенсивности источника излучения). Также каждый измерительный канал содержит независимый фотоприемник, состоящий из фотодиода (ФД) и усилителя фототока (УФТ). Фотоприемник является источником трех независимых составляющих шума в выходном сигнале ВОГ:

- дробовой шум (выражение (1.10));
- шум, определяемый паразитным темновым током фотодиода (выражение (1.11));
- тепловой шум резисторов обратной связи трансимпедансного усилителя-преобразователя фототока (выражение (1.12))

Метод снижения уровня шума в выходном сигнале ВОГ состоит в том, чтобы вычитать выходной сигнал ИК2 из сигнала ИК1, при этом коррелированная часть шумовой составляющей сигнала будет уменьшаться, а некоррелированная складываться по закону сложения дисперсий независимых случайных процессов. Единственным коррелированным членом шумовой составляющей выходного сигнала измерительных каналов является избыточный шум СЛД. Величина коэффициента взаимной корреляции этой шумовой составляющей в двух измерительных каналах в данном случае

зависит от четырех факторов и стремится к единице при их учете и компенсации:

- временного сдвига между сигналами измерительных каналов ИК 1 и ИК2. Поскольку оптический сигнал в ИК1 проходит через волоконный контур (ВК), длина которого составляет сотни метров, то он поступает на фотоприемное устройство с задержкой, равной времени, которое требуется оптическому сигналу на распространение по ВК. Для компенсации временного рассогласования сигнал от ИК 2 должен проходить через линию задержки, позволяющую точно согласовывать сигналы двух измерительных каналов во времени;

- спектрального состава сигналов измерительных каналов. Для достижения максимального коэффициента корреляции фотоприемные устройства измерительных каналов должны иметь одинаковую полосу пропускания [68], что достигается применением идентичных фотоприемных устройств в обоих ИК;

- согласования интенсивности коррелированных составляющих вычитаемых сигналов. На рассогласование интенсивности сигналов влияют как факторы, обусловленные конструкцией оптической и электрической схем (разные потери мощности оптического излучения в измерительных каналах, разброс параметров элементов схем фотоприемников измерительных каналов), так и принципом работы ВОГ - согласно выражению (1.22) мощность оптического излучения, поступающего на фотоприемник интерферометра Саньяка ИК1, зависит от глубины фазовой модуляции (разности фаз встречных световых волн) φ . Рассогласование, вызванное конструктивными факторами, должно быть учтено при разработке ВОГ, а вызванное фазовой модуляцией - в математической модели и при цифровой обработке сигналов;

- состояния поляризации оптического излучения в измерительных каналах [68]. Состояние поляризации в обоих измерительных каналах должно быть одинаковым. Это достигается включением в оптическую схему

двух поляризаторов: в составе оптического циркулятора-разветвителя и в составе многофункционального интегрально-оптического модуля.

Более подробно про точность соблюдения этих требований будет сказано в третьей главе настоящей работы. На данном этапе будем считать, что требования к временному, спектральному и поляризационному согласованию сигналов выполняются конструктивно, а разница интенсивности сигналов может быть вызвана только отличием средней мощности сигнала ИК1, из-за установки рабочей точки интерферометра в его составе.

В выражении (1.22), в первом и четвертом слагаемых под знаком корня присутствует множитель $\frac{1}{2}(1 + \cos\varphi)$, описывающий зависимость мощности оптического излучения, попадающего на фотоприемник, от разности фаз между встречными световыми волнами в интерферометре Саньяка. Этот множитель также удобно использовать в качестве коэффициента для согласования средней мощности сигналов измерительных каналов.

Опираясь на сказанное выше, аналитическое выражение спектральной плотности мощности шумовой составляющей выходного сигнала ВОГ с компенсацией шума интенсивности СЛД, учитывающее естественные источники шума, будет выглядеть следующим образом:

$$\delta\omega_{ш.} = \frac{\sqrt{2}\lambda c}{2\pi DL} \frac{\sqrt{e\eta \frac{1}{2} P_0(1 + \cos\varphi) + e i_d + \frac{4kT}{R} + K^2 \left(e\eta P_0 + e i_d + \frac{4kT}{R} \right)}}{\eta \frac{1}{2} P_0 \sin\varphi}, \quad (2.1)$$

где $K = \frac{1}{2}(1 + \cos\varphi)$ - коэффициент приведения средней мощности сигнала ИК2.

Выражение (2.1) содержит шесть независимых слагаемых, первые три из которых относятся к ИК1, три других - к ИК2. Член, отвечающий за избыточный шум СЛД, в выражении (2.1) отсутствует, поскольку в данной модели принято, что при вычитании сигналов измерительных каналов вклад

этого источника шума в шумовую составляющую результирующего выходного сигнала ВОГ равен нулю.

При разработке макета ВОГ со схемой шумоподавления был выявлен еще один потенциальный источник шума, описанный также в работах [77, 115], схема формирования и усиления напряжения фазовой модуляции (УФМ). Величина этого шума определяется в основном характеристиками самого усилителя (спектральная плотность напряжения и тока шума, приведенных к входу, сопротивление резисторов в цепи обратной связи), его коэффициентом усиления и коэффициентом эффективности широкополосного электрооптического фазового модулятора. На рисунке 2.9 представлена схема типового включения из информационного листа микросхемы AD8137, примененная при разработке макета.

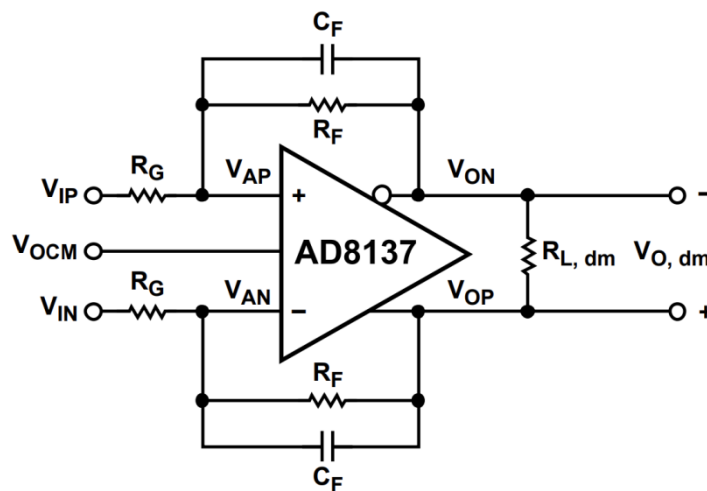


Рисунок 2.9 - Типовая схема включения микросхемы усилителя AD8137 [116]

Выражение, определяющее вклад этого усилителя в общий уровень шума угловой скорости, будет выглядеть следующим образом:

$$\delta\omega_{ш.УФМ} = \frac{\lambda c}{2\pi DL} \sqrt{2 \left(\left(e_n \left(1 + \frac{R_f}{R_g} \right) \right)^2 + 2(i_n R_f)^2 + \right.} \quad (2.2)$$

$$\left. + 8kTR_g \left(\frac{R_f}{R_g} \right)^2 + 8kTR_f \right) K_{эфФМ},$$

где $\delta\omega_{ш.УФМ}$ - спектральная плотность мощности шума угловой скорости от усилителя фазовой модуляции, (рад/с)/ $\sqrt{\text{Гц}}$; e_n - спектральная плотность дифференциального напряжения шума, приведенного ко входу усилителя,

$B/\sqrt{\Gamma\text{ц}}$; R_f - сопротивление резистора обратной связи, Ом; R_g - сопротивление входного резистора усилителя, Ом; i_n - спектральная плотность тока шума, приведенного ко входу усилителя, $A/\sqrt{\Gamma\text{ц}}$; k - постоянная Больцмана, Дж/К; T - температура окружающей среды, К; $K_{\text{эффФМ}} = \frac{\pi}{U_\pi}$ - коэффициент эффективности фазового модулятора, где U_π - напряжение, приложенное к электродам фазового модулятора, необходимое для образования взаимного фазового сдвига встречных оптических волн, равного π радиан.

Сумма под знаком корня определяет спектральную плотность напряжения шума на выходе усилителя. Ее удвоение указывает на статистическую независимость шума, действующего на оптический сигнал при прохождении модулятора в прямом и в обратном направлении.

Параметры выражения (2.2) неизменны в пределах конкретной реализации УФМ, и величину шума УФМ можно принять постоянной, некоторой зависимостью шума УФМ от изменения коэффициента эффективности модулятора можно пренебречь.

С учетом выявленного дополнительного источника шума аналитическое выражение будет выглядеть следующим образом:

$$\delta\omega_{\text{ш.}} = \frac{\sqrt{2}\lambda c}{2\pi DL} \sqrt{\frac{e\eta \frac{1}{2} P_0 (1 + \cos\varphi) + ei_d + \frac{4kT}{R} + K^2 \left(e\eta P_0 + ei_d + \frac{4kT}{R} \right)}{\left(\eta \frac{1}{2} P_0 \sin\varphi \right)^2} + U_{\text{ш.УФМ}} \left(\frac{\pi}{U_\pi} \right)^2}, \quad (2.3)$$

где $U_{\text{ш.УФМ}}$ - подкоренная часть выражения (2.2).

Для определения условий достижения минимального уровня шума в выходном сигнале ВОГ со схемой компенсации был проведен анализ влияния вариаций значений параметров выражения (2.3) на результирующее значение шума. При заданной конструкции ВОГ (геометрических размерах волоконного контура, длине волны и ширине спектра излучения СЛД, полосе пропускания, токовой чувствительности фотодиода, параметрах УФМ) и неизменной температуре окружающей среды, выражение (2.3) будет

содержать три параметра, изменение которых влияет на значение уровня шумовой составляющей выходного сигнала:

- разность фаз φ между прямой и обратной световой волной в интерферометре Саньяка, то есть глубина вспомогательной фазовой модуляции;
- мощность P_0 оптического излучения, падающего на фотодиод в отсутствие фазовой модуляции;
- сопротивление резисторов R обратной связи трансимпедансного усилителя в фотоприемном устройстве.

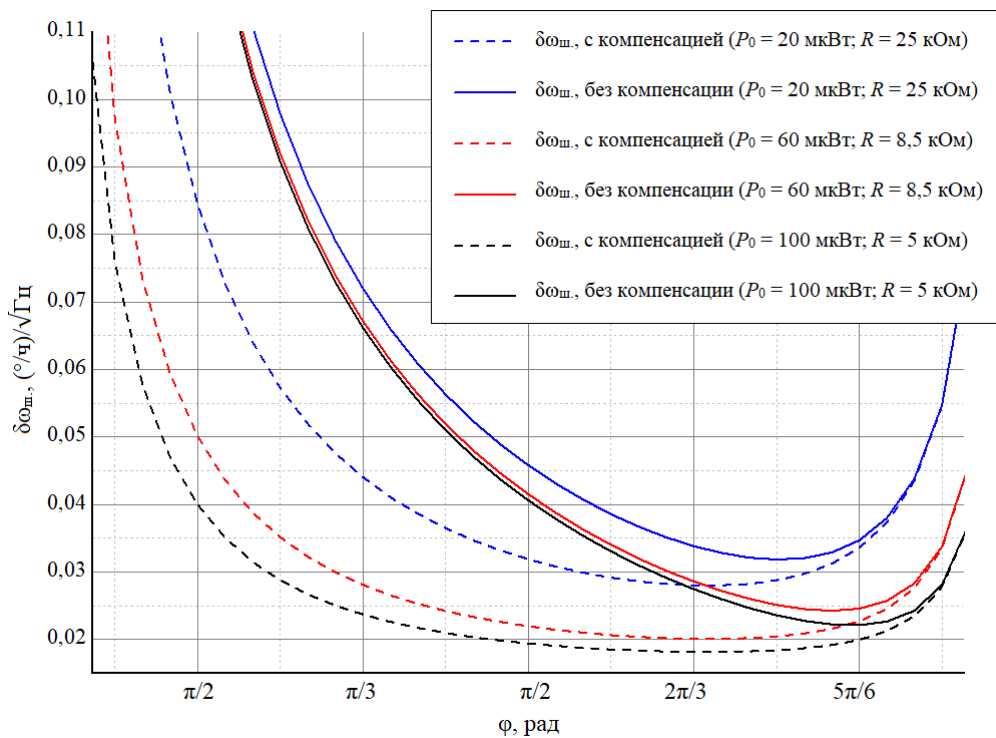
При этом соотношение мощности P_0 и сопротивления R должны удовлетворять соотношению $P_0 \eta R \leq const$, где $const$ - максимально допустимое напряжение на выходе УФТ определяемое электрической схемой ВОГ.

На рисунке 2.10 представлены графики зависимости результирующего уровня шума выходного сигнала для ВОГ без схемы компенсации шума (выражение (1.20)), с учетом источника шума (2.2) и с компенсацией шума (выражение (2.3)) от глубины вспомогательной фазовой модуляции φ при различном уровне мощности оптического излучения P_0 и значении сопротивления резистора R .

Из графиков рисунка 2.10 следует:

- при глубине вспомогательной фазовой модуляции φ равной $\pi/2$, обычно применяемой в ВОГ с импульсной вспомогательной фазовой модуляцией, уровень шума ВОГ со схемой компенсации шума меньше в 1,4 - 2,2 раза в зависимости от соотношения P_0 и R ;
- глубина вспомогательной модуляции, оптимальная с точки зрения минимизации шума, не равна $\pi/2$ и в зависимости от мощности оптического излучения P_0 и сопротивления R , лежит в диапазоне от $2\pi/3$ до $5\pi/6$;
- увеличение мощности оптического сигнала P_0 при выполнении условия $P_0 \eta R = const$ приводит к значительному снижению шума в ВОГ со схемой компенсации шума;

- оптимальной с точки зрения минимизации шума глубиной вспомогательной модуляции для ВОГ с заданными параметрами без схемы компенсации шума является значение $5\pi/6$, для ВОГ со схемой компенсации шума оптимальным является значение $2\pi/3$, при этом уровень шума ВОГ со схемой компенсации шума меньше в 1,2 раз.



$$\eta = 0,93 \text{ А/Вт}$$

$$I_d = 20 \cdot 10^{-9} \text{ А}$$

$$D = 0,135 \text{ м}$$

$$L = 1070 \text{ м}$$

$$T = 293 \text{ К}$$

$$\lambda = 1562 \cdot 10^{-9} \text{ м}$$

$$\Delta\lambda = 35 \cdot 10^{-9} \text{ м}$$

$$K_f = 2$$

Рисунок 2.10 - Зависимость спектральной плотности мощности шума выходного сигнала ВОГ от глубины вспомогательной фазовой модуляции, расчет

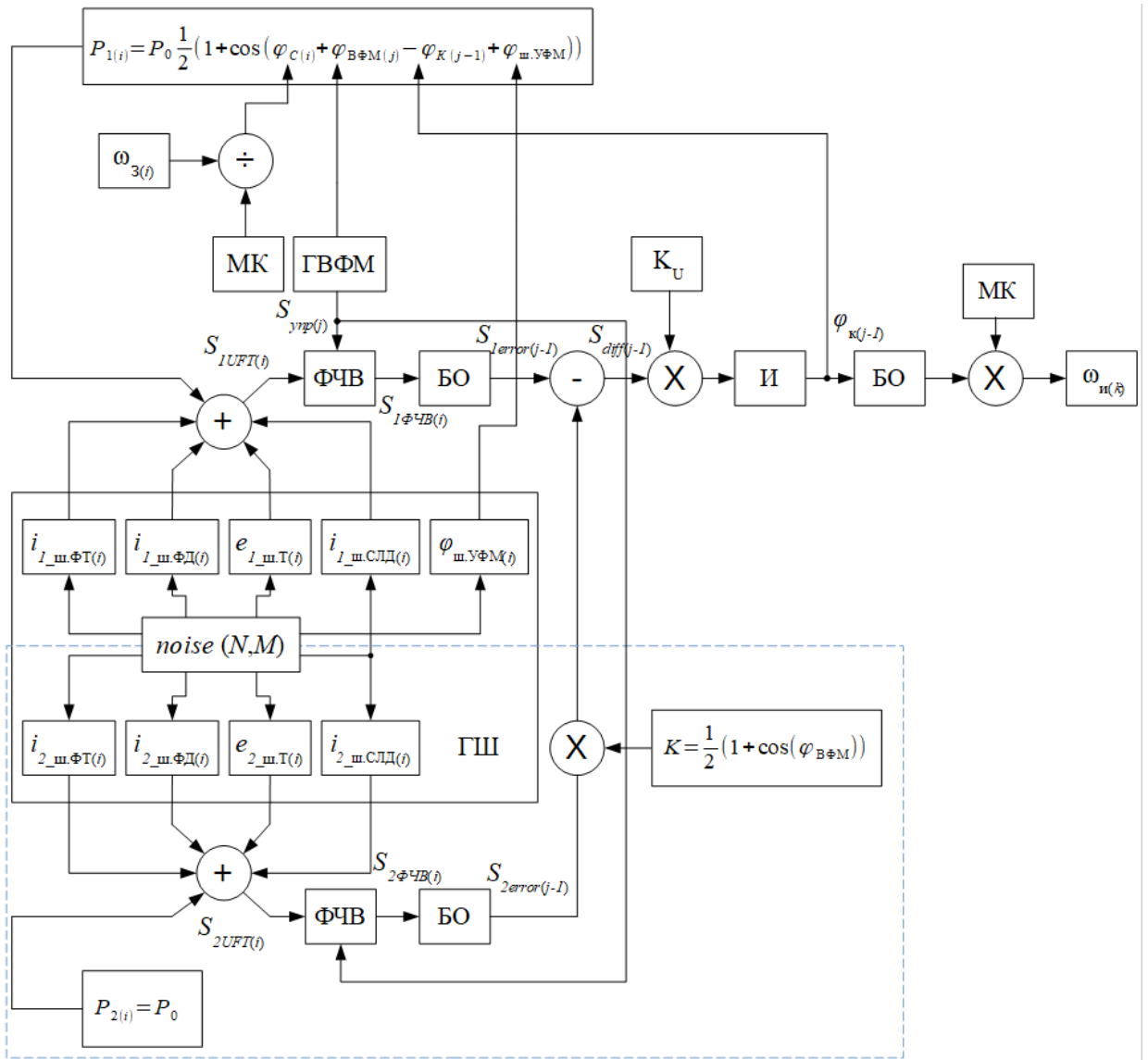
Согласно проведенному анализу, использование в ВОГ схемы компенсации шума в сочетании с выбором оптимальных значений параметров ВОГ позволяет уменьшить шумовую составляющую выходного сигнала от 1,4 до 2,6 раз. Решающее влияние на снижение шума имеет уровень мощности оптического излучения на входе фотоприемных устройств. Выбор оптимальной рабочей точки в ВОГ также позволяет добиться существенного снижения уровня шума в выходном сигнале ВОГ.

2.3 Имитационная модель ВОГ, включающая дополнительный измерительный канал и схему снижения шума

Имитационная модель ВОГ разработана в программной среде «Octave» [117 - 119]. Она моделирует поведение интерферометра Саньяка и цифровой схемы ВОГ компенсационного типа во времени, с учетом влияния источников шума. Общий принцип работы этой модели с одним измерительным каналом достаточно подробно изложен в первой главе. В приведенной ниже на рисунке 2.11 схеме модели ВОГ с шумоподавлением помимо основного добавлен опорный измерительный канал (обведен синей пунктирной линией).

Он включает в себя три независимых источника шума, собственный фазочувствительный выпрямитель (ФЧВ), блок осреднения (БО) и блок умножения на коэффициент выравнивания средней мощности измерительных каналов в зависимости от глубины вспомогательной фазовой модуляции в основном измерительном канале.

Значения отдельных шумовых составляющих при выполнении каждой итерации главного цикла модели определяются выражениями (2.4) - (2.12) для дробового шума фототока $i_{1_ш.ФТ}$, А, шума темнового тока фотодиода $i_{1_ш.ФД}$, А, теплового шума трансимпедансного усилителя фототока $e_{1_ш.Т}$, В, избыточного шума источника излучения $i_{1_ш.СЛД}$, А, шума усилителя фазовой модуляции $\varphi_{ш.УФМ}$, рад, основного ИК и дробового шума фототока $i_{2_ш.ФТ}$, А, шума темнового тока фотодиода $i_{2_ш.ФД}$, А, теплового шума трансимпедансного усилителя фототока $e_{2_ш.Т}$, В, избыточного шума источника излучения $i_{2_ш.СЛД}$, А опорного ИК, соответственно



«+» - блок суммирования, «÷» - блок деления, МК - масштабный коэффициент Саньяка, ГВФМ - генератор вспомогательной фазовой модуляции, ФЧВ - фазочувствительный выпрямитель, ГШ - генератор шума, БО - блок осреднения, «-» - блок вычитания, K_U - коэффициент усиления контура компенсирующей обратной связи, «×» - блок умножения, И - интегратор.

Рисунок 2.11 - Блок-схема компьютерной модели ВОГ с системой снижения шума

$$i_{1_ш.\Phi T(i)} = \sqrt{eP_{(i)}\eta f_{ADC} \text{ noise}(i, 1)}, \quad (2.4)$$

$$i_{1_ш.\Phi Д(i)} = \sqrt{ei_d f_{ADC} \text{ noise}(i, 2)}, \quad (2.5)$$

$$e_{1_ш.T(i)} = \sqrt{4kTRf_{ADC} \text{ noise}(i, 3)}, \quad (2.6)$$

$$i_{1_ш.СЛД(i)} = \sqrt{\frac{\lambda^2 f_{ADC}}{2K_f c \Delta \lambda}} P_0 \eta \frac{1}{2} (1 + \cos \varphi_{B\Phi M}) \text{ noise}(i, 4), \quad (2.7)$$

$$\varphi_{\text{ш.УФМ}(i)} = \sqrt{2 \left(\left(e_n \left(1 + \frac{R_f}{R_g} \right) \right)^2 + 2(i_n R_f)^2 + 8kTR_g \left(\frac{R_f}{R_g} \right)^2 + 8kTR_f \right) \frac{\pi}{V_{pi}}} \text{ noise } (i, 5), \quad (2.8)$$

$$i_{2\text{-ш.ФТ}(i)} = \sqrt{eP_{(i)}\eta f_{ADC}} \text{ noise } (i, 6), \quad (2.9)$$

$$i_{2\text{-ш.ФД}(i)} = \sqrt{e i_d f_{ADC}} \text{ noise } (i, 7), \quad (2.10)$$

$$e_{2\text{-ш.Т}(i)} = \sqrt{4kTR f_{ADC}} \text{ noise } (i, 8), \quad (2.11)$$

$$i_{2\text{-ш.СЛД}(i)} = \sqrt{\frac{\lambda^2 f_{ADC}}{2K_f c \Delta \lambda}} P_0 \eta \text{ noise } (i, 4). \quad (2.12)$$

где Δf - заданная ширина полосы пропускания шума, Гц; $i = 1 \dots N$; $\text{noise } (N, M)$ - числовой массив, имитирующий восемь независимых источников белого (в ограниченной полосе частот) Гауссового шума с нулевым средним значением и единичной дисперсией. Число случайных значений N выбирается равным количеству итераций главного цикла модели.

Шум в измерительном канале вводится как аддитивная составляющая к сигналу $P_{I(i)}$, формируемому на выходе интерферометра Саньяка, в опорном канале как аддитивная составляющая к постоянному уровню мощности P_2 .

Вычитание сигнала опорного канала происходит в цикле основного контура ВОГ, для чего сигнал опорного канала предварительно подвергается фазочувствительному выпрямлению и осреднению аналогично сигналу основного измерительного канала.

Входной информацией для модели является заданная постоянная угловая скорость ω_3 . Выходной информацией модели является массив вычисленных с заданным временем осреднения значений угловой скорости $\omega_{И(k)}$, где k - счетчик осредненных значений в массиве. Для полученного массива выполняются операции вычисления среднего значения, среднеквадратического отклонения и спектральной плотности мощности шума по формуле (1.29).

2.4 Лабораторный макет ВОГ с системой снижения шума, оценка экспериментальных результатов шумоподавления, сравнение с модельными прогнозами

Лабораторный макет был спроектирован согласно блок-схеме, представленной на рисунке 2.6. Алгоритм обработки сигналов основного и опорного измерительных каналов и реализации системы снижения шума, соответствует представленному на функциональной схеме рисунка 2.7, за исключением блока коррекции интенсивности сигнала опорного измерительного канала - в использованном для макета блоке цифровой обработки сигналов отсутствуют необходимые для этого низкочастотные аналого-цифровые преобразователи.

Фотография макета представлена на рисунке 2.12. Конструктивно он состоит из металлического основания, на котором установлены все оптические элементы схемы, блок управления источником оптического излучения и фотоприемные устройства, а также блока цифровой обработки, соединенного с фотоприемными устройствами и фазовым модулятором с помощью экранированных кабелей.

За основу макета был взят серийно выпускаемый компанией ООО «НПК «Оптолинк» ВОГ ОИУС1000 - одноосный волоконно-оптический гироскоп [23, 120]. Далее приведены значения параметров макета, влияющие на уровень шума его выходного сигнала, фигурирующие в выражении (2.3) и в имитационной модели:

- средний диаметр волоконного контура - 0,135 м;
- длина волоконного контура - 1070 м;
- средняя длина волны источника оптического излучения - $1,565 \cdot 10^{-6}$ м;
- ширина спектра излучения источника оптического излучения - $35 \cdot 10^{-9}$ м;

- форма спектра источника оптического излучения - близкая к Гауссовой;
- максимальное значение мощности оптического излучения, падающего на фотодиод - $88 \cdot 10^{-6}$ Вт;
- токовая чувствительность фотодиода - 0,93 А/Вт;
- темновой ток фотодиода - $20 \cdot 10^{-9}$ А;
- сопротивление резисторов обратной связи трансимпедансного усилителя фототока - 5000 Ом.



Рисунок 2.12 - Фотография лабораторного макета ВОГ с системой снижения шума. Общий вид

Эксперимент по измерению шумовой составляющей выходного сигнала был проведен при трех значениях глубины вспомогательной фазовой

модуляции: $\pi/4$, $\pi/2$, $3\pi/4$ при включенной и выключенной системе шумоподавления. Макет при этом был установлен на неподвижное основание, проводился опрос и запись средних за время опроса с частотой 10 Гц значений измеренной угловой скорости. Для каждого полученного массива данных проводилось вычисление спектральной плотности мощности шума по формуле (1.29).

На рисунке 2.13 приведены графики зависимостей СПМШ выходного сигнала ВОГ:

1. Сплошные линии - результаты теоретического расчета по формуле (1.22) с учетом (2.2) и по формуле (2.3);
2. Символы «♦» - результат имитационного моделирования;
3. Символы «■» - результат обработки экспериментальных данных, измеренных с помощью макета.

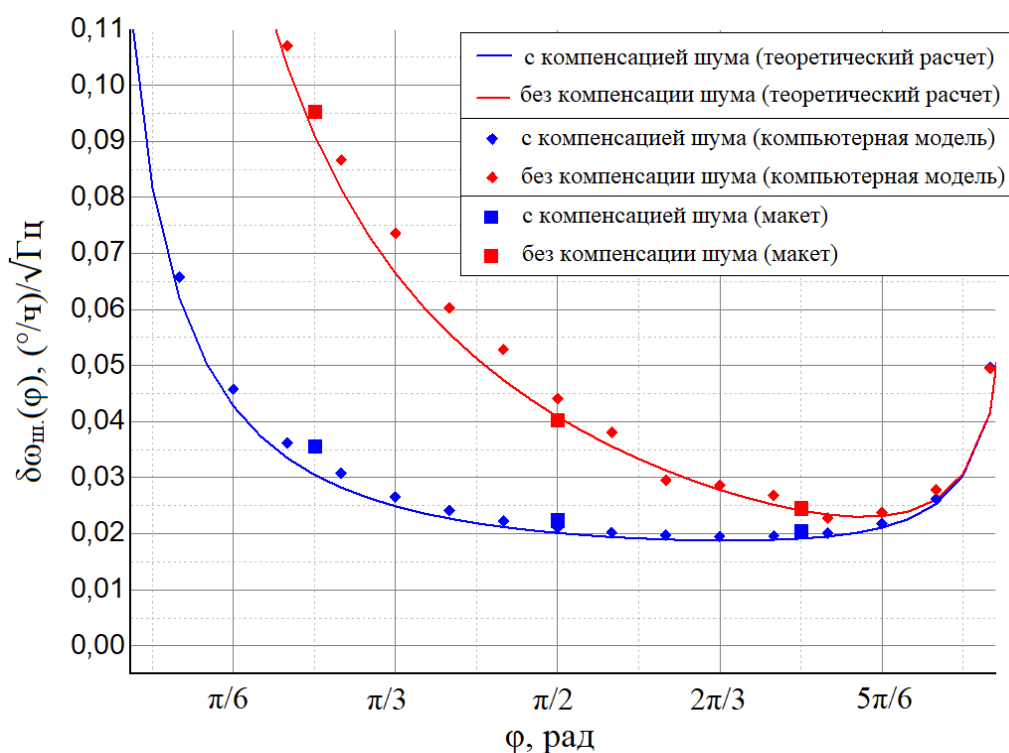


Рисунок 2.13 - Зависимость спектральной плотности мощности шума выходного сигнала ВОГ от глубины вспомогательной фазовой модуляции

Величина глубины вспомогательной фазовой модуляции была выбрана в качестве изменяемого параметра при проверке моделей, поскольку

из основных параметров, величиной которых можно управлять в макете и которые приводят к изменению величины спектральной плотности мощности шума согласно работе [71], ее изменение приводит к наиболее сильному и нелинейному изменению спектральной плотности мощности шума.

Как видно из графика рисунка 2.13 максимальное расхождение между данными, полученными при теоретическом расчете и результатами имитационного моделирования, не превышает 10 %. Результаты, полученные в ходе проведения эксперимента с макетом, также подтверждают правильность построенных моделей, расхождение не превышает 15 %.

С целью оценки полученных результатов при различном времени осреднения выходных данных был проведен эксперимент, включавший в себя измерения выходного сигнала макета ВОГ, установленного на неподвижном основании в течение 5,5 часов при частоте опроса данных, равной 70 Гц. Измерения проводились в двух режимах: с включенной и с выключенной системой подавления шума интенсивности источника излучения. Для минимизации промышленных шумов и помех измерения проводились в ночное время.

Оценка полученных результатов проводилась методом отклонения Аллана. Этот метод был подробно рассмотрен в первой главе.

Численная оценка коэффициента шума N из графика отклонения Аллана определяется как значение линейной аппроксимации продолжения участка с наклоном $-1/2$ в точке, соответствующей времени осреднения, равному 1 час.

На рисунке 2.14 представлен график зависимости отклонения Аллана от времени осреднения для макета ВОГ с отключенной схемой снижения шума (красный график) и с включенной схемой снижения шума (синий график). Пунктирные линии соответствуют графикам линейной аппроксимации участков с наклоном $-1/2$ соответствующих графиков случайной составляющей выходного сигнала ВОГ.

Численное значение коэффициента шума, вычисленное по методу отклонения Аллана, составляет $0,00042 \text{ } ^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ при выключенном шумоподавлении и $0,00022 \text{ } ^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ при включенном шумоподавлении. Коэффициент снижения шума при этом составляет 1,91 раз. Теоретическое значение коэффициента снижения шума, вычисленное с помощью выражения (1.22) с учетом (2.2) и выражения (2.3) при значениях параметров, соответствующих макету, составляет 2,03 раза. Полученное расхождение составляет 6 %, что является хорошим результатом и подтверждает состоятельность разработанных моделей и практическую реализуемость и значимость проведенной работы.

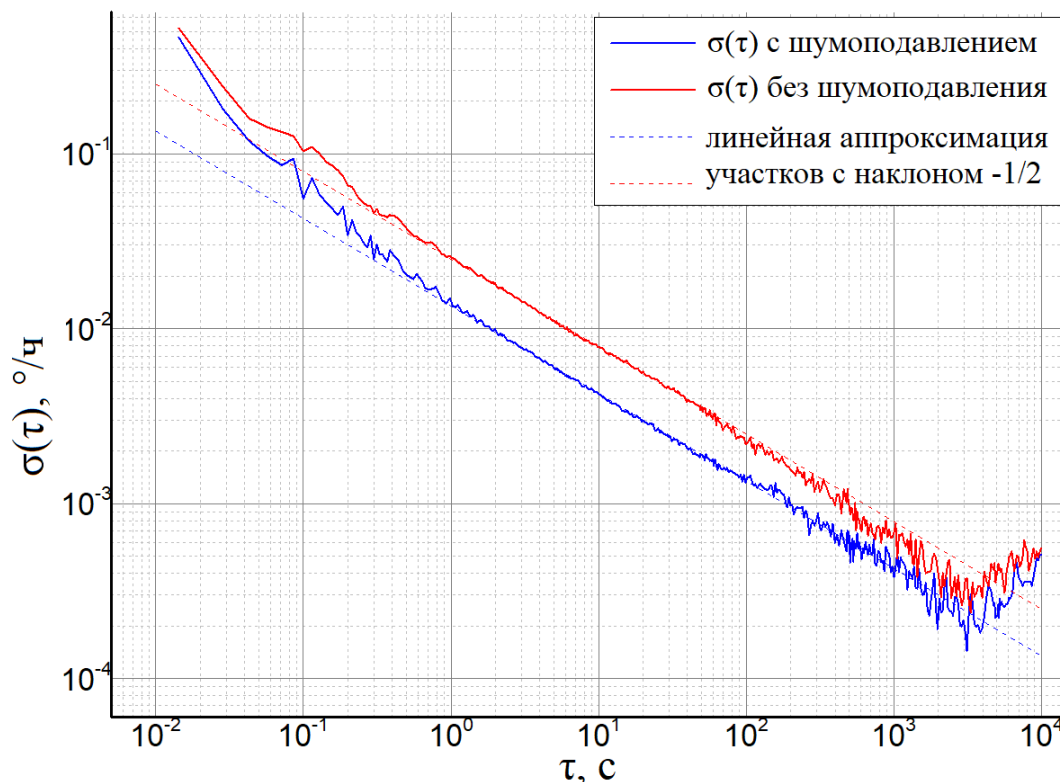


Рисунок 2.14 - График зависимости отклонения Аллана от времени осреднения

Из графиков также видно, что при уменьшении времени осреднения (или, что в данном случае будем эквивалентно, при увеличении частоты опроса данных) коэффициент шумоподавления уменьшается. Это происходит за счет присутствия в сигнале спектральных компонент,

отвечающих шуму квантования, описываемому коэффициентом Q в модели (1.8).

При увеличении времени осреднения графики рисунка 2.14 проходят горизонтальный участок, соответствующий коэффициенту B (нестабильность нулевого сигнала) в модели (1.8). При этом видно, что на графике сигнала с шумоподавлением значение нестабильности нулевого сигнала несколько меньше чем на графике без шумоподавления. Это свидетельствует о важном факте частичной маскировки величины коэффициента нестабильности нулевого сигнала, присутствующим в сигнале шумом.

2.5 Выводы по второй главе

На этапе поиска и анализа литературных источников по вопросам уменьшения уровня шумовой составляющей в выходном сигнале ВОГ, методы, изложенные в работах [68] и [69] были признаны как наиболее перспективные и соответствующие настоящему уровню развития техники. Вместе с тем требовалось, как проверить на практике их работоспособность и эффективность, так и расчетным путем определить границы ожидаемых результатов. Для решения этих задач, и с учетом технических особенностей была разработана функциональная схема ВОГ с системой снижения шума и проведена адаптация метода снижения шума, описанного в работе [69]. В результате было получено схемно-техническое решение, позволяющее с минимальным вмешательством ввести в схему ВОГ дополнительный измерительный канал и реализовать обработку его сигнала с целью подавления шума интенсивности источника оптического излучения.

С целью прогнозирования ожидаемых результатов, с учетом взаимодействия источников шума и сигналов измерительных каналов было выведено аналитическое выражение для определения спектральной

плотности мощности шумовой составляющей выходного сигнала ВОГ с системой снижения шума. Был определен дополнительный источник шума, не учтенный ранее, значение спектральной плотности мощности шума которого определяется только схмотехникой усилителя фазовой модуляции. Учет этого источника шума очень важен, особенно при оценке эффективности работы системы снижения шума: в зависимости от порядка величины шума этого источника его вклад может приводить к значительным расхождениям в теоретических и экспериментальных оценках достигнутого результата. Для примера определим ожидаемый уровень шума макета ВОГ из п. 2.4 при фиксированной глубине ВФМ, равной $\pi/2$ не по формуле 2.3, а по формуле 2.1, в которой отсутствует источник шума усилителя фазовой модуляции. Расчетный уровень шума макета с системой снижения шума составит $0,02$ ($^{\circ}/\text{ч}$)/ $\sqrt{\text{Гц}}$ при учете шума УФМ и $0,014$ ($^{\circ}/\text{ч}$)/ $\sqrt{\text{Гц}}$ без его учета. При этом, расчетный уровень шума макета с отключенной системой снижения шума составил $0,041$ ($^{\circ}/\text{ч}$)/ $\sqrt{\text{Гц}}$ при учете шума УФМ и $0,038$ ($^{\circ}/\text{ч}$)/ $\sqrt{\text{Гц}}$ без его учета.

В процентном соотношении разница для ВОГ с системой снижения шума составляет 30 %, а для ВОГ без системы снижения шума - 7,3 %. Как видно из приведенных данных, игнорирование шума УФМ приводит к завышенным ожиданиям значения коэффициента снижения шума.

Для проверки корректности поведения выведенного аналитического выражения при различных значениях параметров ВОГ была усовершенствована имитационная модель ВОГ, рассмотренная в первой главе. В нее был добавлен второй измерительный канал и независимые источники шума, в том числе шум УФМ, реализовано взаимодействие источников шума, аналогичное физическому устройству, результаты имитационного моделирования хорошо согласуются с результатами вычислений по аналитическому выражению 2.3.

Разработанный и изготовленный лабораторный макет позволил экспериментально доказать эффективность системы снижения шума.

Достигнутый результат снижения шума составил 1,91 раз при расчетном значении 2,03 раза. Близкие значения расчетного и экспериментального результата говорят о правильности проведенных теоретических и практических исследований и, о близком к полному, подавлении шума интенсивности источника оптического излучения в выходном сигнале ВОГ. Численное значение спектральной плотности мощности шума макета с включенной схемой снижения шума, равное $0,00022 \text{ } \circ/\sqrt{\text{ч}}$ (при оценивании по методу вариации Аллана) сопоставимо с результатами, демонстрируемыми ВОГ с длиной волоконного контура порядка 2000 метров, равной, соответственно $0,00025 \text{ } \circ/\sqrt{\text{ч}}$ (при оценивании по методу вариации Аллана) [24, 121] при сохранении массогабаритных и других технических характеристик присущих ВОГ с длиной контура, равной 1000 метров.

Анализ других работ, посвященных вопросу снижения шума интенсивности в выходном сигнале ВОГ, показывает, что значения коэффициента шумоподавления, полученные их авторами, значительно превосходят полученные в настоящей работе результаты, например в работе [68] коэффициент шумоподавления составил 2,82 раз, а в работе [66] - 4 раза. Здесь нужно обратить внимание, что в рассматриваемых работах в качестве источника излучения используется эрбиевый суперлюминисцентный волоконный источник оптического излучения (ЭСВИОИ). Он обладает более узким спектром оптического излучения по сравнению с используемым в настоящей работе СЛД (15...25 нм у ЭСВИОИ, 30...60 нм у СЛД), что, согласно выражению (1.13), приводит к повышенному избыточному шуму. Подавление более высокого исходного уровня шума логично приводит к более высокому коэффициенту шумоподавления при равном уровне прочих шумов. Кроме того, в работе [66] в схеме не используется дополнительный фотоприемник опорного измерительного канала, что так же приводит к увеличению коэффициента шумоподавления.

Таким образом, материал, изложенный во второй главе настоящей работы, подтверждает правильность разработанных математических моделей

и их адекватность при различных значениях параметров системы, а также возможность и целесообразность технической реализации данного метода шумоподавления в случае ВОГ с суперлюминисцентным диодом в качестве источника оптического излучения.

Глава 3. Анализ эффективности метода снижения шума при варьировании параметров модели

Во второй главе работы был рассмотрен метод снижения уровня шума выходного сигнала ВОГ, основанный на выделении, с последующим вычитанием из полезного сигнала, шума интенсивности источника оптического излучения. Был проведен анализ влияния параметров выражения (2.1) на уровень шума выходного сигнала ВОГ без схемы снижения шума и со схемой снижения шума. При этом было принято допущение, что сигналы основного и опорного измерительных каналов ВОГ со схемой снижения шума полностью согласованы между собой во времени, по средней мощности, имеют одинаковый спектральный состав и одинаковое состояние поляризации. Все это позволило считать, что при работе схемы снижения шума в выходном сигнале ВОГ происходит полное подавление шума интенсивности источника оптического излучения.

На самом деле, в таком сложном физическом устройстве как ВОГ, состоящем как из оптических, так и из электронных и оптоэлектронных компонентов, в процессе эксплуатации могут возникать условия, приводящие, в общем случае, к тому, что сигналы измерительных каналов будут взаимно несогласованы в том, или ином смысле. Например, влияние температуры окружающей среды может приводить к изменению длины волоконного контура основного измерительного канала и, следовательно, к изменению времени прохождения по нему оптического сигнала, что приведет, в конечном счете, к несогласованности сигналов измерительных каналов во времени. Другим механизмом влияния температуры может являться изменение количества потерь мощности оптического излучения в различных элементах оптической схемы ВОГ. Это приведет к рассогласованию сигналов измерительных каналов по средней мощности, что также приведет к ухудшению шумоподавления. Также, в работе [68]

уделяется большое внимание необходимости точного соблюдения равенства полос пропускания измерительных каналов и состояния поляризации оптического излучения в измерительных каналах для получения максимального эффекта шумоподавления.

В третьей главе проводится анализ влияния рассогласования сигналов измерительных каналов ВОГ со схемой снижения шума на уровень шума в выходном сигнале. Результаты, представленные в третьей главе, опубликованы в работе [73].

3.1 Обобщенное аналитическое выражение для шумовой составляющей выходного сигнала ВОГ с учетом неполного согласования измерительных каналов системы снижения шума

Получим выражение для шумовой составляющей выходного сигнала ВОГ, учитывая, что согласование устройств, составляющих измерительный канал является неполным. Для этого запишем выражение (2.1) с учетом слагаемого, отвечающего за шум источника оптического излучения, присутствующий в основном и опорном измерительных каналах. Обозначим через $1-K_S$ долю шума источника оптического излучения, остающуюся после шумоподавления:

$$\delta\omega_{ш.} = \frac{\sqrt{2}\lambda c}{2\pi DL} \sqrt{\frac{e\eta \frac{1}{2} P_0 (1 + \cos\varphi) + ei_d + \frac{4kT}{R} + K^2 \left(e\eta P_0 + ei_d + \frac{4kT}{R} \right) + \frac{\lambda^2 \eta^2 \frac{1}{4} P_0^2 (1 + \cos\varphi)^2 + \lambda^2 \eta^2 P_0^2 K^2}{2K_f c \Delta \lambda} (1 - K_S)}{\eta \frac{1}{2} P_0 \sin\varphi}. \quad (3.1)$$

Ограничим диапазон значений K_S в пределах от -1 до 1. Таким образом, может быть реализован как случай полного подавления шума

интенсивности источника оптического излучения, так и его увеличение до двух раз. Конкретный вид зависимости K_S от различных параметров рассмотрен ниже.

Для более компактной записи обозначим спектральную плотность мощности шума каждого источника шума, выраженную в единицах электрического шумового тока, буквой i с соответствующим номером: 1 - дробовой шум фототока, 2 - дробовой шум темнового тока фотодиода, 3 - тепловой шум резисторов обратной связи трансимпедансного усилителя, 4 - шум интенсивности источника оптического излучения:

$$i_{ш.1} = \sqrt{e\eta P_0}, \quad (3.2)$$

$$i_{ш.2} = \sqrt{e i_d}, \quad (3.3)$$

$$i_{ш.3} = \sqrt{\frac{4kT}{R}}, \quad (3.4)$$

$$i_{ш.4} = \sqrt{\frac{\lambda^2}{2K_f c \Delta \lambda}} \eta P_0. \quad (3.5)$$

Буквой M обозначим величину, обратную оптическому масштабному коэффициенту эффекта Саньяка:

$$M = \frac{\sqrt{2}\lambda c}{2\pi DL}. \quad (3.6)$$

Перепишем выражение (3.1) с учетом обозначений (3.2) - (3.6):

$$\delta\omega_{ш.} = M \sqrt{\frac{i_{ш.1}^2 \frac{1}{2} (1 + \cos\varphi) + i_{ш.2}^2 + i_{ш.3}^2 + K^2 (i_{ш.1}^2 + i_{ш.2}^2 + i_{ш.3}^2) + \left(i_{ш.4}^2 \frac{1}{4} (1 + \cos\varphi)^2 + i_{ш.4}^2 K^2 \right) (1 - K_S)}{\eta \frac{1}{2} P_0 \sin\varphi}}. \quad (3.7)$$

Зафиксируем значение φ , равным $\pi/2$, а коэффициент K примем равным 0,5, тогда выражение для СПМШ примет более компактный, удобный для дальнейшего анализа вид:

$$\delta\omega_{\text{ш.}} = M \frac{\sqrt{\frac{1}{2}i_{\text{ш.1}}^2 + i_{\text{ш.2}}^2 + i_{\text{ш.3}}^2 + \frac{1}{4}(i_{\text{ш.1}}^2 + i_{\text{ш.2}}^2 + i_{\text{ш.3}}^2) + \frac{1}{2}i_{\text{ш.4}}^2(1 - K_s)}}{\eta \frac{1}{2}P_0}. \quad (3.8)$$

Минимальный уровень шума выходного сигнала достигается при значении коэффициента K_s , равном единице при выполнении условия полного совпадения, «одинаковости» компоненты шума, описываемой выражением (3.5) в сигналах основного и опорного измерительных каналов. Определим смысл и критерии этой «одинаковости».

3.2 Влияние согласования сигналов измерительных каналов во времени на уровень шума выходного сигнала

Сигналы измерительных каналов должны быть синхронизированы во времени и поступать в блок, реализующий операцию вычитания сигнала опорного измерительного канала ИК2 из сигнала основного измерительного канала ИК1, одновременно. Согласно схеме, изображенной на рисунке 2.6 второй главы, оптический сигнал разделяется разветвителем-поляризатором РП2/1 на две составляющие, одна из которых подается непосредственно на фотодетектор ФД1 опорного измерительного канала ИК2, другая составляющая проходит оптический путь через интерферометр Саньяка (основной измерительный канал ИК1). Расстояние, которое проходит оптический сигнал в измерительном канале ИК2 составляет порядка одного метра, при этом время распространения излучения в оптическом волноводе из кварцевого волокна длиной 1 метр с показателем преломления $n \approx 1,46$ составляет $4,87 \cdot 10^{-9}$ секунд. В измерительном канале ИК1 оптическое излучение проходит волоконный контур, длина которого может составлять от сотен до тысяч метров, для определенности зададимся конкретной длиной

волоконного контура, равной 1070 метров (такая «не круглая» длина объясняется конструктивными особенностями ВОГ с цифровой обработкой сигналов), при этом время распространения оптического излучения в ИК1 составляет $5,21 \cdot 10^{-6}$ секунд. Таким образом, временное рассогласование между сигналами ИК1 и ИК2 составляет $\sim 5,21 \cdot 10^{-6}$ секунд. Для компенсации этого рассогласования применяется специальная схема, - цифровая линия задержки сигнала опорного измерительного канала, реализованная в виде блока хранения оцифрованного сигнала.

Оценим, как будет меняться уровень СПМШ выходного сигнала ВОГ со схемой шумоподавления если по каким-то причинам (например, как это описано во введении к этой главе) при поступлении в блок вычитания сигналов между ними будет не равное нулю рассогласование во времени Δt .

Запишем сигнал опорного измерительного канала ИК2 как сумму регулярной и случайной составляющих:

$$X(t) = P_0 + \tilde{x}_1(t) + \tilde{x}_2(t) \quad (3.9)$$

где P_0 - постоянная составляющая сигнала, определяемая средней мощностью оптического излучения; $\tilde{x}_1(t)$ - случайная составляющая сигнала, порождаемая дробовым и тепловым шумами фотоприемного устройства ИК2; $\tilde{x}_2(t)$ - случайная составляющая, порождаемая шумом источника оптического излучения.

Сигнал основного измерительного канала ИК1 можно записать следующим образом:

$$Y(t) = S_1(t) + \tilde{y}_1(t) + \tilde{x}_2(t + \Delta t) \quad (3.10)$$

где $S_1(t)$ - составляющая, содержащая полезную информацию об измеряемой прибором величине; $\tilde{y}_1(t)$ - случайная составляющая сигнала, порождаемая дробовым и тепловым шумами фотоприемного устройства ИК1; $\tilde{x}_2(t + \Delta t)$ - случайная составляющая, порождаемая шумом источника оптического излучения; Δt - время задержки.

Поскольку шумовые составляющие $\tilde{x}_1(t), \tilde{y}_1(t)$, фотоприемников статистически независимы, то во взаимную корреляцию сигналов ИК1, ИК2

входят только элементы, отвечающие за шум источника оптического излучения:

$$B_{XY} = \langle (X(t) - \langle X(t) \rangle)(Y(t) - \langle Y(t) \rangle) \rangle = \langle (\tilde{x}_1(t) + \tilde{x}_2(t))(\tilde{y}_1(t) + \tilde{x}_2(t + \Delta t)) \rangle = \langle \tilde{x}_2(t)\tilde{x}_2(t + \Delta t) \rangle = B_{\tilde{x}_2}(\Delta t). \quad (3.11)$$

где скобки $\langle \dots \rangle$ означают статистическое усреднение.

Из выражения (3.11) следует, что поскольку в обоих сигналах присутствует только одна коррелированная составляющая, при этом порождаемая одним источником, но смещенная во времени, то вместо взаимной корреляции двух сигналов можно рассматривать автокорреляцию одного из сигналов.

Считая шум источника излучения стационарным случайным процессом, к которому применима теорема Винера-Хинчина и располагая информацией о форме спектра шума после прохождения через алгоритм обработки ВОГ, можно определить конкретный вид автокорреляционной функции $B_{\tilde{x}_2}(\Delta t)$ и коэффициента корреляции.

Согласно теореме Винера-Хинчина автокорреляционная функция стационарного случайного процесса является обратным преобразованием Фурье от спектра этого процесса [122, 123]:

$$B_{\tilde{x}_2}(\Delta t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) e^{-i\omega\Delta t} d\omega, \quad (3.12)$$

где $G(\omega)$ - спектральная амплитуда в зависимости от частоты ω .

В области положительных частот соотношение (3.12) можно записать следующим образом:

$$B_{\tilde{x}_2}(\Delta t) = 2 \int_0^{\infty} G(\omega) \cos(\omega\Delta t) d\omega. \quad (3.13)$$

Коэффициент корреляции определяется как нормированная корреляционная функция:

$$R(\Delta t) = \frac{2}{\sigma^2} \int_0^{\infty} G(\omega) \cos(\omega\Delta t) d\omega. \quad (3.14)$$

После прохождения сигнала через алгоритм обработки ВОГ широкополосный шум преобразуется в полосовой, с центральной частотой

ω_0 , равной частоте вспомогательной модуляции $\omega_0 = 2\pi f_{\text{ВФМ}}$. Спектр этого шума можно аппроксимировать прямоугольником шириной $\Delta\omega$, определяемой полосой пропускания выходного сигнала. Его дисперсия будет определяться выражением $\sigma^2 = G_0 2\Delta\omega$, где $G_0 = \text{const}$, а спектральная плотность $G(\omega)$ задается функцией

$$G(\omega) = \begin{cases} G_0, & \omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2} \leq \omega \leq \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2} \\ 0, & \omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2} \geq \omega \geq \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2} \end{cases}.$$

Исходя из сказанного выше коэффициент корреляции $R(\Delta t)$ равен:

$$\begin{aligned} R(\Delta t) &= \frac{2}{\sigma^2} \int_{\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}}^{\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}} G_0 \cos(\omega \Delta t) d\omega = \frac{2G_0}{\sigma^2} \left(\frac{\sin\left(\omega_0 \tau + \frac{\Delta\omega}{2} \Delta t\right) - \sin\left(\omega_0 \tau - \frac{\Delta\omega}{2} \Delta t\right)}{\tau} \right) = \\ &= \frac{2G_0}{\sigma^2} \left(\frac{\sin(\omega_0 \tau) \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2} \Delta t\right) + \cos(\omega_0 \tau) \sin\left(\frac{\Delta\omega}{2} \Delta t\right) - \sin(\omega_0 \tau) \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2} \Delta t\right) + \cos(\omega_0 \tau) \sin\left(\frac{\Delta\omega}{2} \Delta t\right)}{\tau} \right) \quad (3.15) \\ &= \frac{4G_0}{\sigma^2} \frac{\cos(\omega_0 \Delta t) \sin\left(\frac{\Delta\omega}{2} \Delta t\right)}{\tau} = \cos(\omega_0 \tau) \frac{\sin\left(\frac{\Delta\omega}{2} \Delta t\right)}{\frac{\Delta\omega}{2} \Delta t}. \end{aligned}$$

Как было выяснено выше, все шумовые составляющие, кроме избыточного шума источника излучения, описываемого выражением (3.5), изначально некоррелированы и их временной сдвиг относительно друг друга не влияет на их степень корреляции и, соответственно, на их вклад в результирующий уровень шума. Заменяем в выражении (3.8) K_S на коэффициент корреляции $R(\Delta t)$ и, сделав замену переменной: $\omega \rightarrow 2\pi f$ получим следующее выражение для зависимости СПМШ выходного сигнала ВОГ от времени рассогласования сигналов измерительных каналов:

$$\delta\omega_{\text{ш.}}(\Delta t) = M \sqrt{\frac{\frac{1}{2} i_{\text{ш.1}}^2 + i_{\text{ш.2}}^2 + i_{\text{ш.3}}^2 + \frac{1}{4} (i_{\text{ш.1}}^2 + i_{\text{ш.2}}^2 + i_{\text{ш.3}}^2) + \frac{1}{2} i_{\text{ш.4}}^2 \left(1 - \cos(2\pi f_{\text{ВФМ}} \Delta t) \frac{\sin\left(\frac{2\pi \Delta f \Delta t}{2}\right)}{\frac{2\pi \Delta f \Delta t}{2}} \right)}{\eta \frac{1}{2} P_0}}. \quad (3.16)$$

где Δf - ширина спектра шума, в рассматриваемой системе пропорциональна частоте дискретизации выходного сигнала.

На рисунке 3.1 представлены графики зависимости уровня СПМШ выходного сигнала ВОГ от времени рассогласования (взаимного сдвига) сигналов измерительных каналов при различной частоте дискретизации выходного сигнала.

Сплошными линиями обозначены результаты расчетов по соответствующим аналитическим выражениям: выражение (1.22) для ВОГ без схемы снижения шума, красный график, выражение (3.16) - со схемой снижения шума, синий и черный графики, а точками - результаты компьютерного моделирования. Имитационная модель, использованная для этого, была подробно описана во второй главе и работах [71, 72]. Коротко укажем, что данная модель представляет собой компьютерную имитацию цифрового ВОГ компенсирующего типа с импульсной фазовой модуляцией, разработанную в среде «Octave».

Из графиков, представленных на рисунке 3.1 можно сделать три важных вывода:

1. Минимальный уровень шума выходного сигнала достигается в очень узком диапазоне временного согласования сигналов измерительных каналов порядка десятков наносекунд, при этом максимальный уровень шума наблюдается при времени рассогласования порядка 5,1...5,2 мкс (в зависимости от ширины спектра Δf), что соответствует времени задержки распространения оптического излучения в волоконном контуре измерительного канала ИК1, то есть наблюдается антикорреляция шумовых составляющих источника оптического излучения в сигналах измерительных каналов.
2. Частота дискретизации выходного сигнала напрямую влияет на степень корреляции сигналов измерительных каналов, а, следовательно, и на уровень шума при отступлении от точного временного согласования сигналов измерительных каналов.

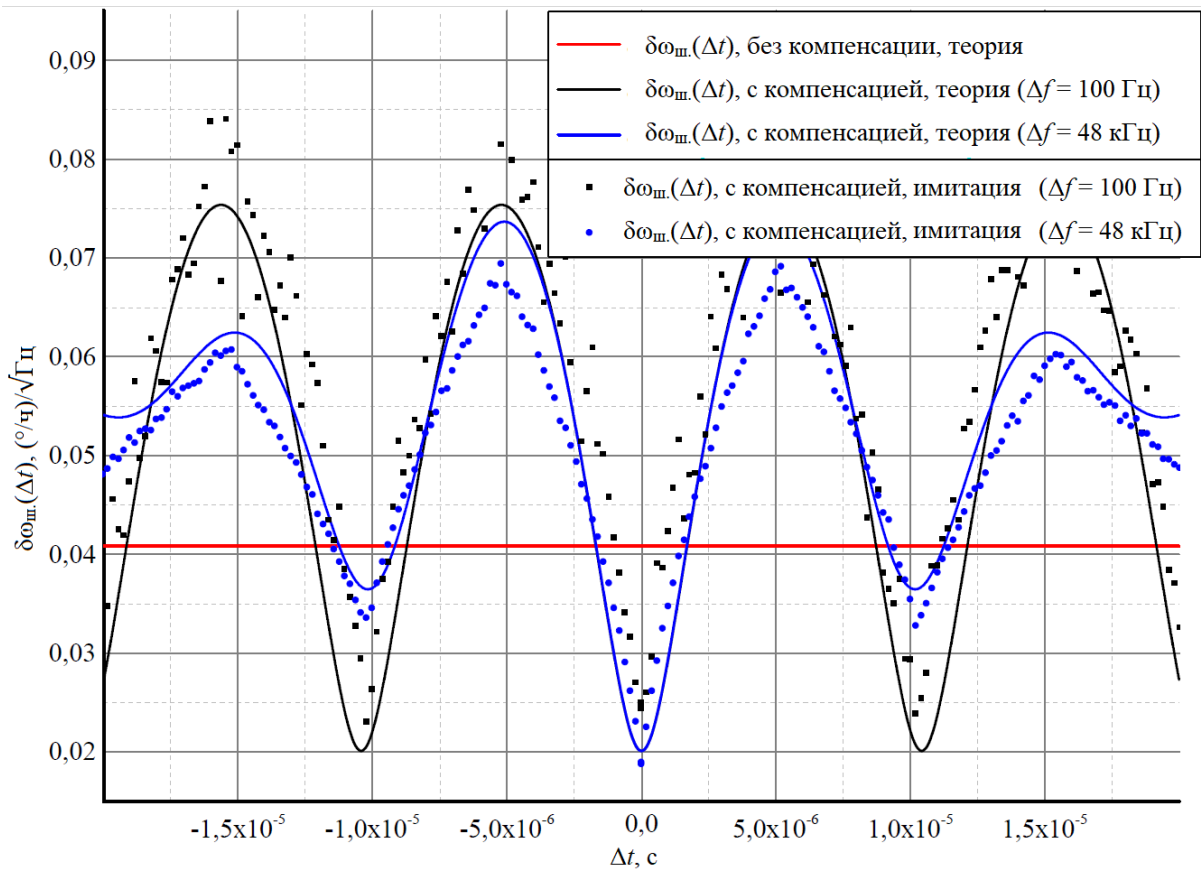


Рисунок 3.1 – Зависимость спектральной плотности мощности шума выходного сигнала ВОГ с компенсацией шума от времени рассогласования сигналов при различной ширине спектра шума (черный, синий и фиолетовый графики), уровень шума выходного сигнала ВОГ без компенсации при тех же параметрах (красный график)

3. Во второй главе настоящей работы был описан метод снижения шума в выходном сигнале ВОГ, основанный на суммировании оптических сигналов: отведенного непосредственно от источника оптического излучения и прошедшего через интерферометр Саньяка. При таком подходе эффективно подавляются спектральные компоненты шума на частоте вспомогательной фазовой модуляции и ее нечетных гармониках. Наличие антикорреляционных максимумов на графиках рисунка 3.1, при времени рассогласования порядка $\pm 5,2 \cdot 10^{-6}$ секунд (напомним, что это значение времени рассогласования соответствует времени τ обхода оптической волной волоконного контура и связано с частотой вспомогательной фазовой

модуляции соотношением $f_{\text{ВФМ}} = \frac{1}{2\tau}$) указывает на возможность реализации аналога данного оптического метода в рассматриваемой в настоящей работе схеме в электронно-цифровой форме, что позволяет нивелировать недостатки оптического метода, описанные во второй главе. В то же время, такая модификация цифрового метода снижения шума позволяет отказаться от цифровой линии задержки опорного сигнала, что может быть важно при его практической реализации в условиях ограниченных вычислительных мощностей программируемой логической интегральной схемы или микроконтроллера.

3.3 Зависимость уровня шума от соотношения средней мощности сигналов измерительных каналов

Рассмотрим схему измерительных каналов ИК1, ИК2, изображенную на рисунке 2.6 второй главы. Основной измерительный канал ИК1 содержит волоконный контур ВК, длина которого, как уже было сказано выше, может достигать нескольких тысяч метров. Потери мощности оптического излучения в волноводе в нормальных условиях составляют $\sim 1,5 \dots 2,5$ дБ/км. В зависимости от внешних воздействующих факторов (температура, давление, радиация и т.д.) потери мощности оптического излучения в оптическом тракте могут значительно меняться, что, в конечном счете, приводит к изменению уровня мощности оптического излучения, поступающего на фотодиод ФД2 фотоприемника измерительного канала ИК1. В то же время длина оптической линии ИК2 не превышает одного метра, вследствие чего для нее можно пренебречь потерями мощности оптического излучения, вызываемыми перечисленными выше причинами. Для определения влияния различия мощности оптического излучения в измерительных каналах на эффективность шумоподавления, модернизируем

выражение (3.8), введя в него коэффициент K_{OP} , изменяя который будем менять значение мощности оптического излучения в основном измерительном канале. Согласно выражению (3.1) средняя мощность оптического излучения влияет только на величины дробового шума фототока и шума интенсивности источника оптического излучения, исходя из этого, запишем выражение (3.17):

$$\delta\omega_{ш.}(K_{OP}) = M \sqrt{\frac{K_{OP} \frac{1}{2} i_{ш.1}^2 + i_{ш.2}^2 + i_{ш.3}^2 + \frac{1}{4} (i_{ш.1}^2 + i_{ш.2}^2 + i_{ш.3}^2) + \frac{1}{4} i_{ш.4}^2 (1 - K_{OP})^2}{K_{OP} \eta \frac{1}{2} P_0}}, \quad (3.17)$$

где K_{OP} – коэффициент мощности оптического излучения ИК1.

На рисунке 3.2 представлены графики спектральной плотности мощности шума выходного сигнала ВОГ в зависимости от коэффициента мощности K_{OP} оптического сигнала в основном измерительном канале. Из графиков зависимости $\delta\omega_{ш.}$ от K_{OP} видно, что при уровне мощности оптического излучения в ИК1 меньшем чем в ИК2 (в диапазоне значений K_{OP} от 0 до 1) происходит резкое увеличение уровня шума выходного сигнала, вызванное двумя причинами: снижением соотношения сигнал / шум в ИК1 (это видно так же из графика уровня шума для ВОГ без компенсации шума) и снижением коэффициента шумоподавления, вызванного неполным вычитанием коррелированного шума (шума интенсивности источника излучения) измерительных каналов. При уровне мощности оптического излучения в ИК1 большем чем в ИК2 (в диапазоне значений K_{OP} от 1 до 2) уровень шума плавно увеличивается, как и в первом случае, за счет снижения коэффициента шумоподавления.

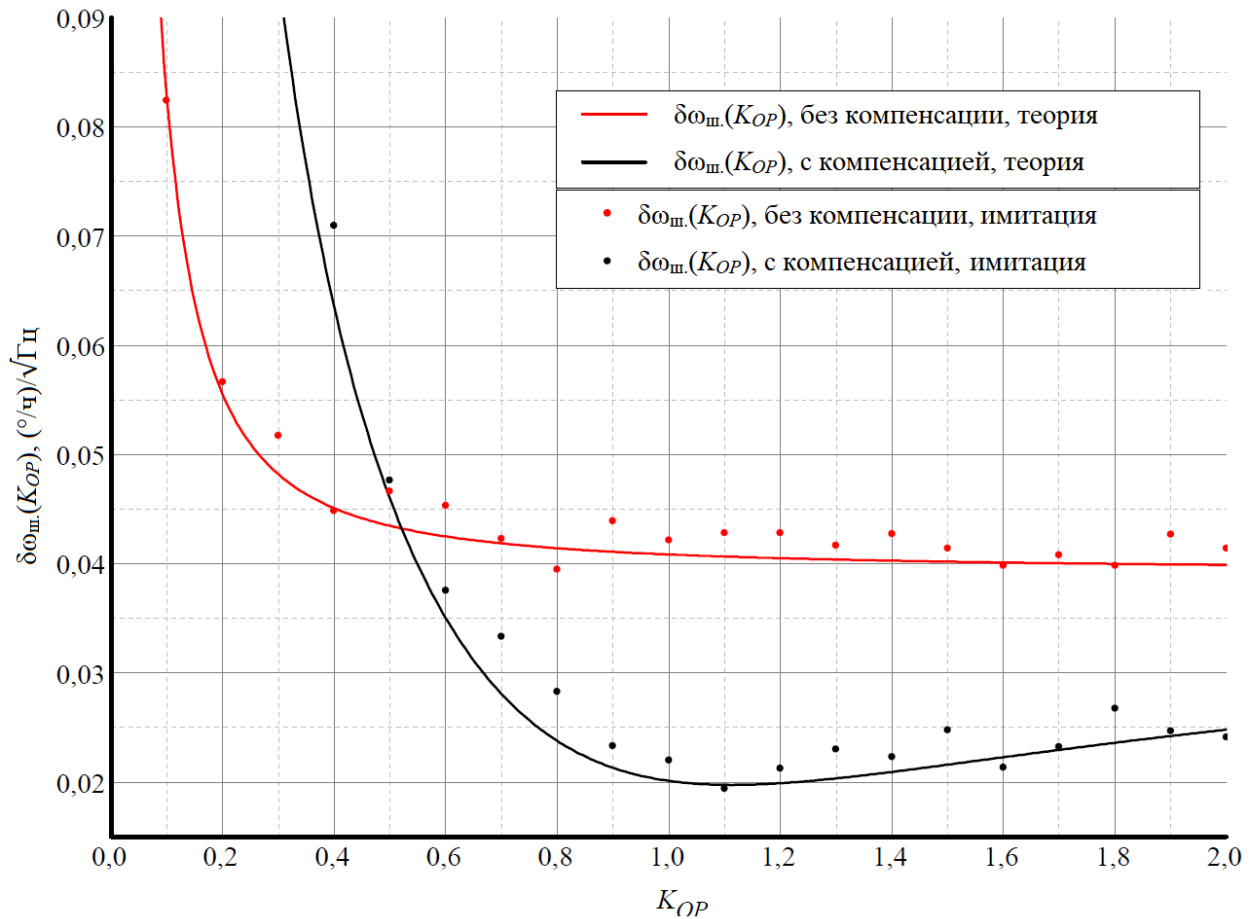


Рисунок 3.2 – Зависимость спектральной плотности мощности шума выходного сигнала ВОГ с компенсацией шума и ВОГ без компенсации от величины коэффициента K_{OP} мощности оптического излучения в ИК1

В каждом измерительном канале ИК1, ИК2, оптический сигнал поступает на соответствующий фотоприемник, где преобразуется в электрический сигнал, который затем поступает на аналого-цифровой преобразователь и в дальнейшем подвергается цифровой обработке по алгоритмам работы ВОГ. Электрический и цифровой тракт прохождения каждого сигнала характеризуется собственными коэффициентами преобразования / усиления / ослабления, комплексное влияние которых на уровень шумовой составляющей выходного сигнала выражается через соответствующие коэффициенты K_{u1} , K_{u2} в выражении (3.18):

$$\delta\omega_{\text{ш.}}(\Delta K_u) = M \sqrt{\frac{K_{u1}^2 \left(\frac{1}{2} i_{\text{ш.1}}^2 + i_{\text{ш.2}}^2 + i_{\text{ш.3}}^2 \right) + \frac{1}{4} K_{u2}^2 (i_{\text{ш.1}}^2 + i_{\text{ш.2}}^2 + i_{\text{ш.3}}^2) + \frac{1}{4} i_{\text{ш.4}}^2 \Delta K_u^2}{K_{u1} \eta \frac{1}{2} P_0}}, \quad (3.18)$$

где K_{u1} , K_{u2} – нормированные коэффициенты преобразования / усиления амплитуды сигналов в фотопреобразующих устройствах и трактах цифровой обработки сигналов, $\Delta K_u = K_{u1} - K_{u2}$ – разность нормированных коэффициентов.

На рисунке 3.3 представлены графики СПМШ выходного сигнала ВОГ в зависимости от разности коэффициентов усиления сигналов измерительных каналов ΔK_U .

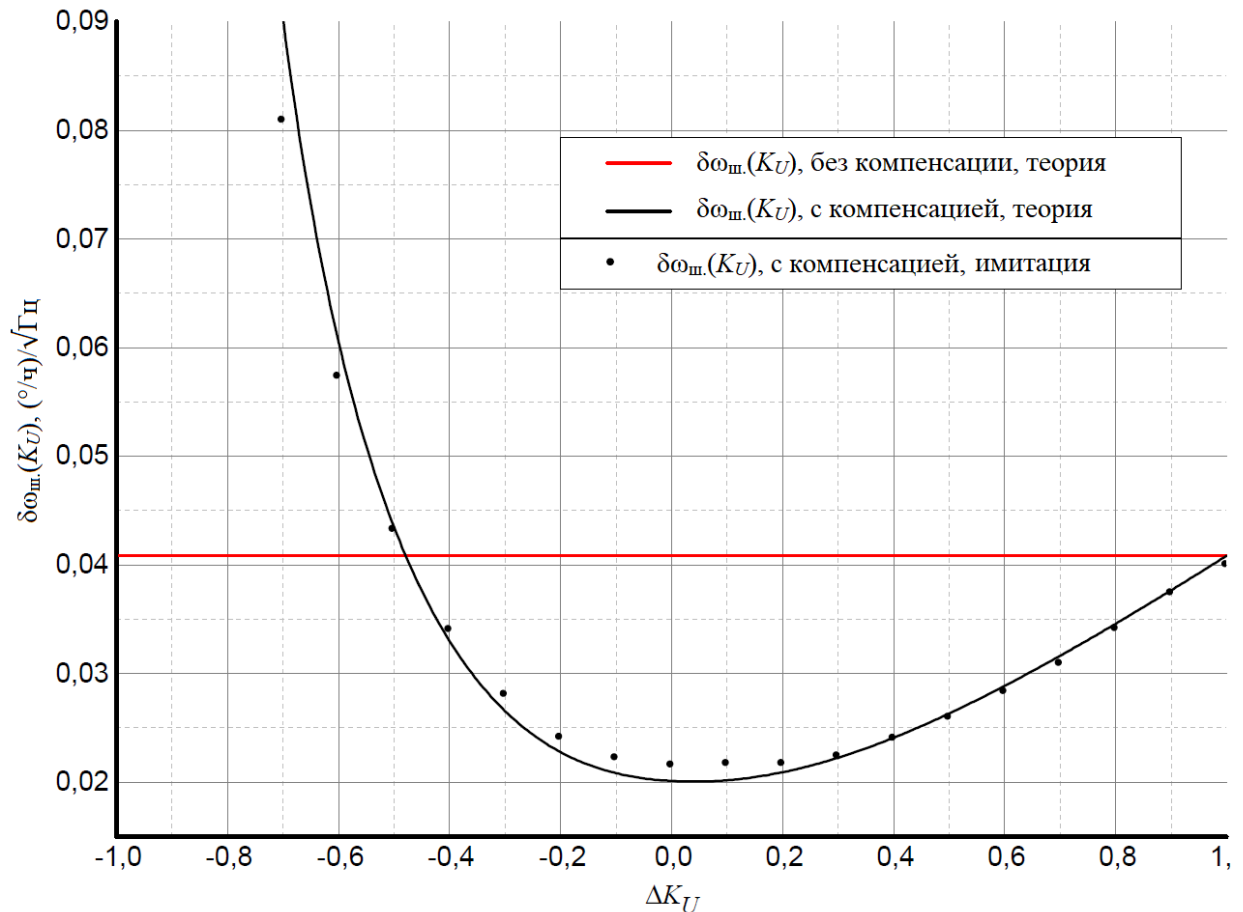


Рисунок 3.3 – Зависимость спектральной плотности мощности шума выходного сигнала ВОГ с компенсацией шума и ВОГ без компенсации от ΔK_U - соотношения коэффициентов усиления сигналов измерительных каналов

Из графиков зависимости $\delta\omega_{ш.}$ от ΔK_U видно, что при уменьшении амплитуды сигнала опорного измерительного канала ИК2 (уменьшение коэффициента K_{U2} в диапазоне значений ΔK_U от 0 до 1) уровень шума увеличивается за счет снижения коэффициента шумоподавления, вызванного не полным вычитанием коррелированного шума измерительных каналов. При уменьшении амплитуды сигнала главного измерительного канала ИК1 (уменьшение коэффициента K_{U1} в диапазоне значений ΔK_U от 0 до -1) дополнительно ухудшается соотношение сигнал/шум, что вызвано относительным увеличением в результирующем сигнале шума сигнала ИК2.

3.4 Влияние полосы пропускания измерительных каналов ВОГ на уровень шума выходного сигнала ВОГ

В работе [68] было указано, что для максимально эффективной работы схемы снижения шума должно выполняться условие равенства полосы пропускания фотоприемных устройств основного и опорного измерительных каналов. Рассмотрим, как именно будет выглядеть зависимость уровня шума в выходном сигнале ВОГ от соотношения полос пропускания фотоприемных устройств измерительных каналов. Отметим следующие факты:

- полоса пропускания фотоприемных устройств и частота дискретизации АЦП, как правило, выбирается достаточно большой (порядка десятков мегагерц), чтобы без искажений воспроизводить исходный сигнал в цифровой форме для его дальнейшей обработки [124];

- алгоритм обработки сигнала в ВОГ включает в себя осреднение исходного широкополосного оцифрованного сигнала на интервалах времени, равных $\frac{1}{2f_{ВФМ}}$, что приближенно можно считать эквивалентным применению

низкочастотного фильтра первого порядка с частотой среза $2f_{\text{ВФМ}}$. В зависимости от длины волоконного контура частота $f_{\text{ВФМ}}$ лежит в диапазоне от десятков килоггерц до единиц мегагерц.

Таким образом, высокочастотные компоненты спектра шумовой составляющей сигнала отфильтровываются в ходе цифровой обработки сигнала по алгоритмам ВОГ. Заметное влияние различной ширины полосы пропускания фотоприемных устройств будет наблюдаться только при сужении этой полосы до частот порядка $f_{\text{ВФМ}}$.

Учитывая равномерную спектральную плотность мощности шума сигнала в диапазоне полосы пропускания фотоприемных устройств можно задать нормализованную функцию, описывающую зависимость эффективной полосы пропускания измерительного канала от полосы пропускания фотоприемного устройства для каждого измерительного канала: $\Delta F_1 = 1 - \frac{f_{\text{ВФМ}}}{\Delta f_1}$, $\Delta F_2 = 1 - \frac{f_{\text{ВФМ}}}{\Delta f_2}$, где Δf_1 , Δf_2 – ширина полосы пропускания фотоприемных устройств измерительных каналов ИК1 и ИК2 соответственно.

Для определения количественного влияния разности ширины полос пропускания фотоприемных устройств на уровень снижения шума в выходном сигнале ВОГ, введем в выражение (3.8) определенные выше нормированные функции зависимости интенсивности шумовых составляющих сигнала от ширины полосы пропускания фотоприемных устройств:

$$\delta\omega_{\text{ш.}}(\Delta f_1, \Delta f_2) = M \sqrt{\frac{\Delta F_1 \left(\frac{1}{2} i_{\text{ш.1}}^2 + i_{\text{ш.2}}^2 + i_{\text{ш.3}}^2 \right) + \frac{1}{4} \Delta F_2 (i_{\text{ш.1}}^2 + i_{\text{ш.2}}^2 + i_{\text{ш.3}}^2) + \frac{1}{4} i_{\text{ш.4}}^2 |\Delta F_1 - \Delta F_2|}{\eta \frac{1}{2} P_0}} \quad (3.19)$$

Зависимость спектральной плотности мощности шума угловой скорости выходного сигнала ВОГ с системой подавления шума от разности

нормированных полос пропускания фотоприемных устройств измерительных каналов приведена на рисунке 3.4.

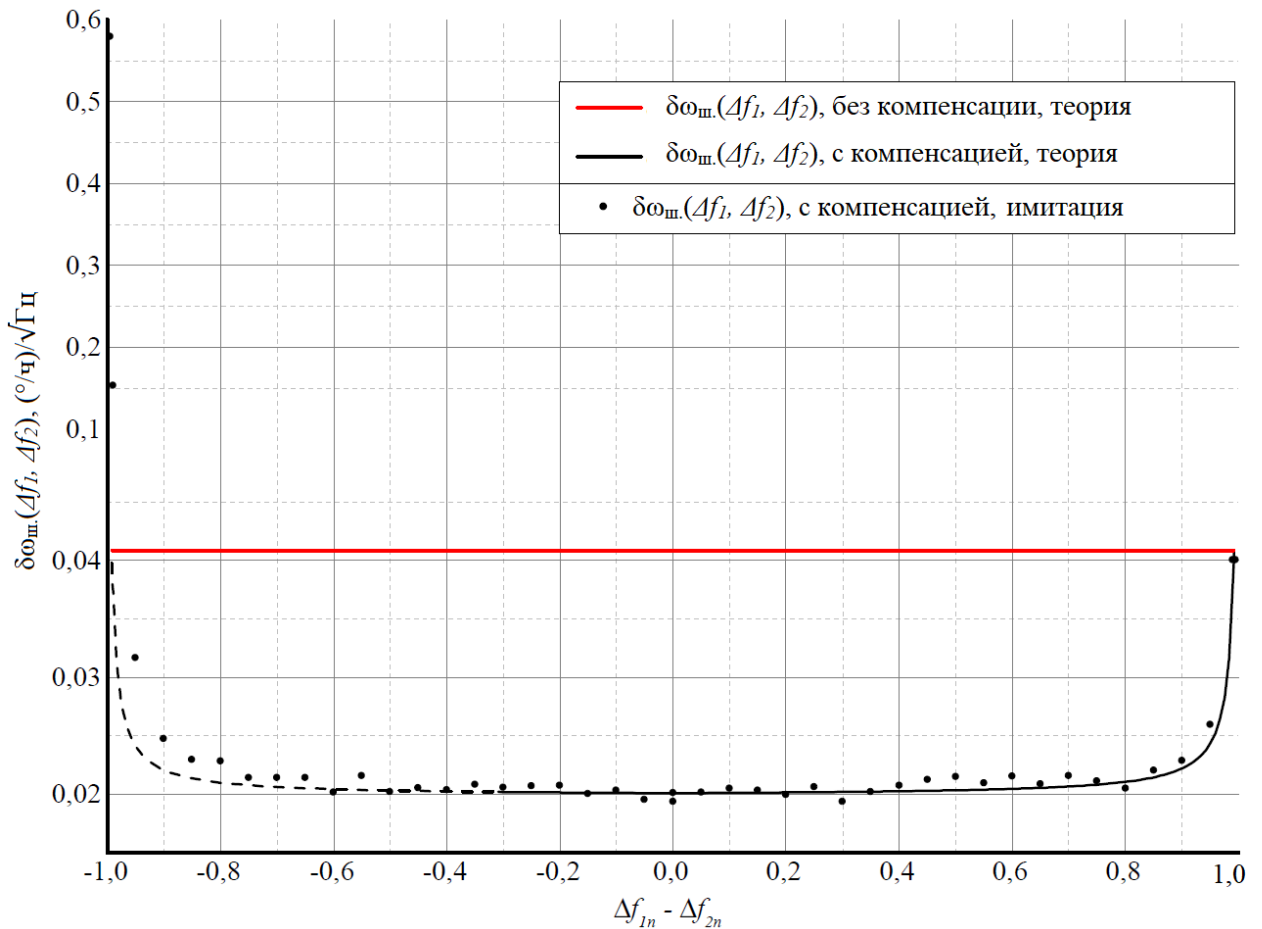


Рисунок 3.4 – Зависимость спектральной плотности мощности шума выходного сигнала ВОГ с компенсацией шума от соотношения ширины нормированных спектров сигналов (черный график), уровень шума выходного сигнала ВОГ без компенсации при тех же параметрах (красный график)

В целом, как видно из приведенного графика, уменьшение ширины полосы пропускания фотоприемного устройства ИК1 до 0,75 при сохранении максимальной ширины полосы пропускания ИК2 (в диапазоне от 0 до $-0,25$ ($\Delta f_{1n} - \Delta f_{2n}$)) и уменьшение ширины полосы пропускания фотоприемного устройства ИК2 до 0,5 при сохранении максимальной ширины полосы пропускания ИК1 (в диапазоне от 0 до 0,5 ($\Delta f_{1n} - \Delta f_{2n}$)) не приводит к существенному увеличению уровня шума выходного сигнала.

Отклонение графика имитационного моделирования от рассчитанного по теоретической формуле в области значений от $-0,25$ до -1 ($\Delta f_{1n} - \Delta f_{2n}$), то есть при уменьшении полосы пропускания ИК1 в диапазоне от $0,75$ до 0 , можно объяснить тем, что выражение (3.19) не учитывает процессы, связанные со снижением быстродействия контура компенсирующей обратной связи при сужении полосы пропускания фотоприемного устройства основного измерительного канала ИК1, приводящие к увеличению СПМШ выходного сигнала ВОГ. Как видно из приведенного графика, отклонение ширины полосы пропускания фотоприемных устройств в пределах порядка $\pm 0,5 \Delta F_{1,2}$ не приводит к существенному увеличению уровня шума выходного сигнала.

3.5 Влияние поляризации оптического сигнала в измерительных каналах ВОГ на уровень шума выходного сигнала ВОГ

В силу ряда объективных причин в настоящее время большинство ВОГ работают с использованием плоско-поляризованного оптического излучения. В зависимости от конкретной реализации ВОГ это достигается либо использованием источника оптического излучения конструктивно объединенного с поляризатором, либо применением отдельных поляризаторов или поляризаторов в составе интегрально-оптических схем (например, когда сигнал источника излучения нужно разделить на несколько измерительных каналов в многоосном ВОГ это проще сделать с помощью изотропных волоконных разветвителей, а затем поляризовать излучение в каждом измерительном канале) [125].

В рассматриваемой схеме ВОГ применяется источник с линейно поляризованным излучением с коэффициентом экстинкции не менее 20 дБ. Применение такого источника излучения заведомо обеспечивает отсутствие

отличных от заданного, состояний поляризации излучения. Наличие в оптической схеме (рисунок 2.6) последовательно установленных поляризаторов в составе разветвителя РП2/1, разветвителя РП1/1 и фазового модулятора с коэффициентом экстинкции каждого не менее 20 дБ, а так же применение оптического волокна, сохраняющего состояние поляризации при изготовлении волоконного контура интерферометра Саньяка обеспечивает сохранение состояния поляризации на всем протяжении оптического тракта ВОГ. В рамках данной работы важным является тот факт, что состояние поляризации излучения, падающего на фотодиоды опорного и основного измерительных каналов, является одинаковым, а значит, в нем не содержится некоррелированных составляющих шума интенсивности источника оптического излучения. В тоже время нужно учесть, что в зависимости от точности юстировки плоскости поляризации всех поляризаторов в составе ВОГ (а так же сохранения их юстировки во времени) и стабильности h – параметра волновода волоконного контура зависит сохранение соотношения мощности оптического излучения, падающего на фотоприемники измерительных каналов. Влияние этих факторов может быть описано с помощью закона Малюса [126]: $I = I_0 \cos^2 \psi$, выражающегося в зависимости интенсивности I линейно-поляризованного оптического излучения, прошедшего поляризатор, от интенсивности падающего на поляризатор излучения I_0 и угла ψ между плоскостями поляризации падающего излучения и поляризатора. Учтем в выражении (3.20) спектральной плотности мощности шума угловой скорости выходного сигнала ВОГ со схемой снижения шума зависимость мощности оптического излучения, падающего на фотоприемник основного измерительного канала ИК1, от угла ψ , выражающего суммарную погрешность ориентации плоскости поляризации во всем оптическом тракте:

$$\delta\omega_{ш.}(\psi) = M \sqrt{\frac{\cos^2 \psi \frac{1}{2} i_{ш.1}^2 + i_{ш.2}^2 + i_{ш.3}^2 + \frac{1}{4} (i_{ш.1}^2 + i_{ш.2}^2 + i_{ш.3}^2) + \frac{1}{4} i_{ш.4}^2 (1 - \cos^2 \psi)^2}{\cos^2 \psi \eta \frac{1}{2} P_0}}. \quad (3.20)$$

График зависимости уровня шума выходного сигнала в ВОГ со схемой снижения шума от изменения угла ψ на $\pm 180^\circ$ представлен на рисунке 3.5.

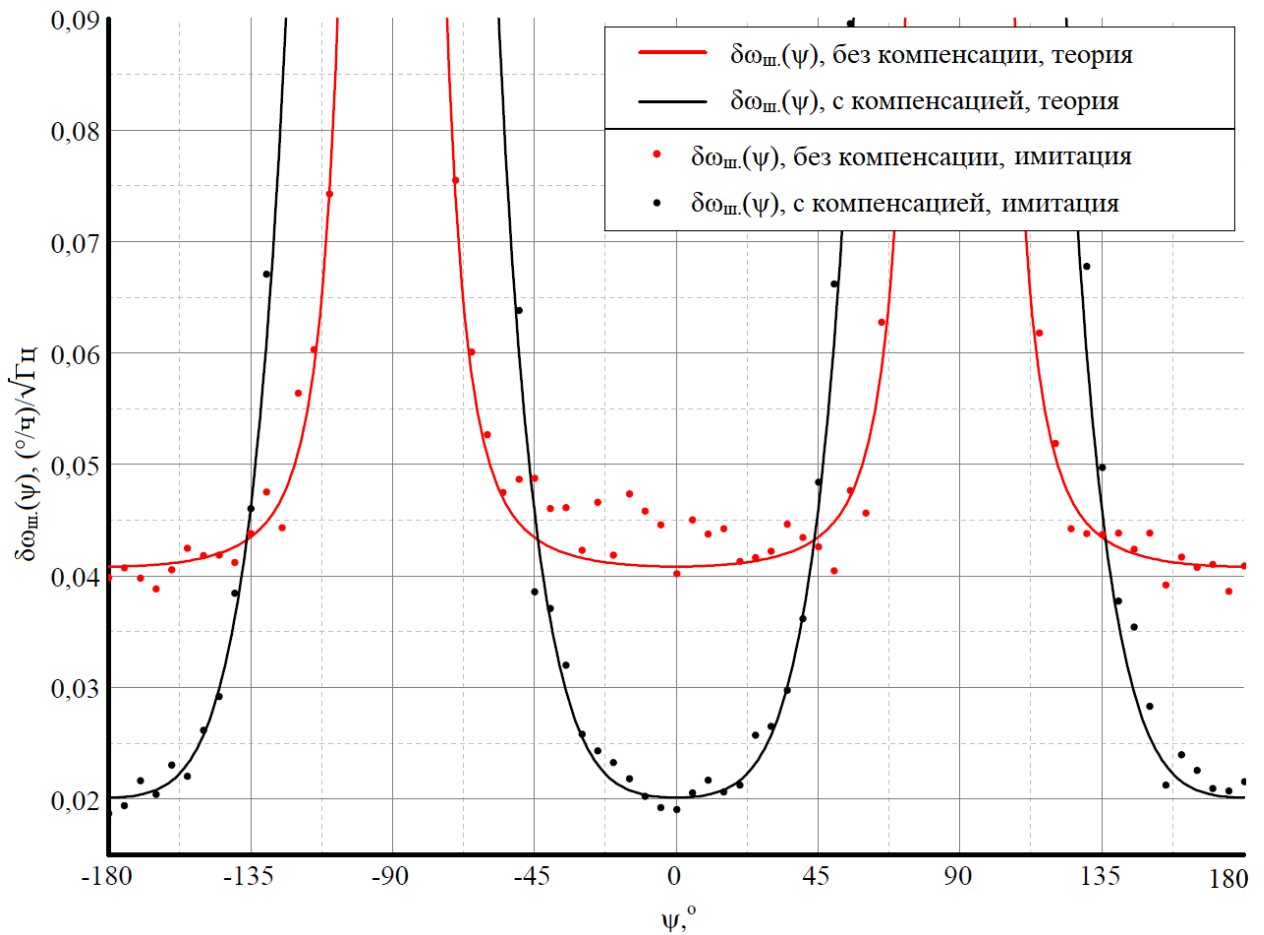


Рисунок 3.5 – Зависимость шума выходного сигнала ВОГ с компенсацией шума от угла ψ рассогласования вектора поляризации сигналов измерительных каналов (черный график), уровень шума выходного сигнала ВОГ без компенсации при тех же параметрах (красный график)

В реальных условиях угол ψ , как правило, не превышает единиц градусов, а h – параметр оптического волновода после прохождения технологического цикла изготовления волоконного контура увеличивается в среднем с 10^{-6} до 10^{-4} 1/м и, в дальнейшем, практически не зависит от температурных воздействий в диапазоне эксплуатационных температур от - 40 до 60 °С. Все это позволяет считать, что в ВОГ, использующем линейно поляризованный источник оптического излучения и построенном по схеме, соответствующей рисунку 2.6 не наблюдается заметного влияния состояния поляризации на уровень СПМШ, определяемый выражением (3.20).

3.6 Выводы по третьей главе

В данной главе были рассмотрены четыре основных условия, выполнение которых приводит к подавлению шума интенсивности источника оптического излучения в выходном сигнале ВОГ, построенном по схеме, приведенной на рисунке 2.6 второй главы и описываемом выражением (3.8) для определения спектральной плотности мощности шума выходного сигнала ВОГ со схемой снижения шума. Анализ полученных зависимостей уровня СПМШ выходного сигнала ВОГ со схемой снижения шума позволяет определить границы точности соблюдения этих условий без значительного ухудшения работы схемы снижения шума. Проведенные исследования показывают, что для выполнения условия сохранения минимального уровня шума выходного сигнала ВОГ со схемой снижения шума должны выполняться следующие требования:

1. Условие синхронизации сигналов измерительных каналов во времени должно выполняться с точностью не хуже 5 % от времени максимального рассогласования, в рассмотренном случае это соответствует примерно ± 200 нс.

2. Условие равенства интенсивностей сигналов измерительных каналов имеет не симметричный вид и, в зависимости от природы отклонения (изменение мощности оптического излучения или различный коэффициент усиления фотоприемных устройств), имеет различное оптимальное соотношение. Отношение средних мощностей оптических сигналов и отношение коэффициентов усиления электрических сигналов в измерительных каналах должно находиться в диапазоне $1 - 1,1$.

3. Условие равенства полос пропускания измерительных каналов в рассматриваемом случае не является критическим, оно должно выполняться с точностью не менее $0,75\Delta f_{1n}$ от нормированной полосы пропускания ИК1 и не менее $0,5\Delta f_{2n}$ от нормированной полосы пропускания ИК2.

4. Условие одинакового состояния поляризации формально выполняется за счет применения в рассматриваемой схеме источника оптического излучения с линейной поляризацией в заданной плоскости, требование к точности выставки и сохранению угла ψ суммарной погрешности ориентации плоскости поляризации должно выполняться с точностью не хуже $\pm 10^\circ$.

Заключение

Были исследованы источники шума и их влияние на формирование шумовой составляющей выходного сигнала интерферометрической измерительной системы на примере волоконно-оптического гироскопа. При этом были получены следующие основные результаты:

1. Анализ литературных источников показал, что основным путем снижения уровня шума в выходном сигнале волоконно-оптического гироскопа считается тот или иной подход к подавлению шума источника оптического излучения.

2. Проведен анализ схемы волоконно-кольцевого интерферометра Саньяка минимальной конфигурации, определены и математически описаны естественные источники шума для этой схемы, так же выявлен и описан дополнительный источник шума, вклад которого в ряде случаев сопоставим с вкладом естественных шумов. Получено аналитическое выражение для шумовой составляющей выходного сигнала ВОГ. Анализ полученного выражения при различных значениях параметров ВОГ показал, что в большинстве случаев главный вклад в результирующий уровень шума вносит шум источника оптического излучения.

3. Для уточнения влияния схемы и алгоритмов обработки сигналов в ВОГ на уровень шума выходного сигнала была разработана имитационная модель ВОГ с замкнутым контуром обратной связи по измеряемой угловой скорости, учитывающая выявленные ранее источники шумов.

4. Проведено экспериментальное исследование с целью подтверждения справедливости аналитического выражения и имитационной модели. Полученные результаты показали сильную корреляционную связь результатов эксперимента и результатов расчета и моделирования, при этом погрешность результатов имитационного моделирования оказалась несколько ниже по сравнению с результатами расчетов (11 % против 16 %).

5. Адаптирован один из известных методов подавления шума источника оптического излучения в выходном сигнале ВОГ, основанный на выделении шума источника оптического излучения в отдельный измерительный канал и последующее вычитание этого шума из сигнала основного измерительного канала в реальном времени. Для данной адаптации получено обобщенное аналитическое выражение шумовой составляющей выходного сигнала и модифицирована имитационная модель. Для получения оценки прогнозируемого шумоподавления проведено моделирование и с учетом полученных результатов принято решение об изготовлении макета ВОГ с системой шумоподавления.

6. Изготовлен макет ВОГ с системой шумоподавления и проведены его лабораторные исследования, полученный коэффициент снижения шума составил 1,91 раз при расчетном значении 2,03 раз, что было признано положительным результатом.

7. Были исследованы частные случаи рассогласования сигналов измерительных каналов ВОГ в схеме с системой снижения уровня шума, в результате чего были определены количественные оценки, рассогласования этих сигналов по ряду параметров, не приводящие к значительному ухудшению работы системы шумоподавления.

Таким образом, в ходе исследования были решены все поставленные задачи диссертации и достигнута поставленная цель, - получен гибкий инструмент, позволяющий проводить моделирование работы ВОГ различной конфигурации и в различных условиях. Полученные теоретические результаты подтверждены оценками физических измерений на специально разработанном и изготовленном макете ВОГ.

Список сокращений и условных обозначений

АЦП	аналого-цифровой преобразователь
БО	блок осреднения
БЦО	блок цифровой обработки
ВК	волоконный контур
ВКИ	волоконно-кольцевой интерферометр
ВОГ	волоконно-оптический гироскоп
ВФМ	вспомогательная фазовая модуляция
ГВФМ	генератор вспомогательной фазовой модуляции
ГШ	генератор шума
ДТ	датчик температуры
И	интегратор
ИК	измерительный канал
МИОМ	модуль интегрально-оптический многофункциональный
МК	масштабный коэффициент
МО	микроохладитель
НС	нулевой сигнал
ОКТ	оптический когерентный томограф
ОЦ	оптический циркулятор
ПУИ	плата управления излучателем
РП	разветвитель-поляризатор
СИ	международная система единиц физических величин
СКЗ	среднеквадратическое значение
СКО	среднеквадратическое отклонение
СКДО	среднеквадратическое относительное двухвыборочное отклонение
СЛД	суперлюминисцентный диод
СПМШ	спектральная плотность мощности шума
УФМ	усилитель фазовой модуляции

УФТ	усилитель фототока
ФД	фотодиод
ФМ	фазовый модулятор
ФНЧ	фильтр нижних частот
ФЧВ	фазочувствительный выпрямитель
ЦАП	цифро-аналоговый преобразователь
ЦЛ	цифровая логика
ЭСВИОИ	эрбиевый суперлюминисцентный волоконный источник оптического излучения

Литература

1. Букингем, М. Шумы в электронных приборах и системах: пер. с англ. / М. Букингем. – М.: Мир, 1986. – 399 с.
2. Жалуд, В. Шумы в полупроводниковых устройствах / В. Жалуд, В. Н. Кулешов ; под общ. ред. А. К. Нарышкина ; совместное советско-чешское издание. – М. : Советское радио, 1977. – 416 с.
3. Отт, Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах: пер. с англ. / Г. Отт. – М.: Мир, 1979. – 318 с.
4. Колесникова, Т. Анализ шумов электронных схем как эффективное средство обеспечения целостности сигнала / Т. Колесникова // Современная электроника. – 2019. – № 1. – С. 62-68.
5. Якубович, Б. И. О природе избыточного низкочастотного шума (обзор) / Б. И. Якубович // Успехи прикладной физики. – 2016. – Т. 4, № 2. – С. 127-138.
6. Волков, А. В. Разработка и исследование способов подавления аддитивных шумов в волоконно-оптических интерферометрических датчиках / А. В. Волков, А. П. Малмакин, С. А. Ушанов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2024. – Т. 24, № 6. – С. 899-906. – DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-6-899-906.
7. Ратхор, Т. С. Цифровые измерения. Методы и схемотехника: пер. с англ. / Т. С. Ратхор. – М.: Техносфера, 2004. – 376 с.

8. Гуров И.П. Основы теории систем и системного анализа в оптике: учебно-методическое пособие / И.П. Гуров. – СПб.: Университет ИТМО, 2020. – 110 с.
9. Sagnac, G. The luminiferous ether demonstrated by the effect of the relative motion of the ether in an interferometer in uniform motion / G. Sagnac // CR Hebd. Seances Acad. Sci. – 1913. – Vol. 157. – P. 708-710.
10. Sagnac, G. Regarding the proof for the existence of a luminiferous ether using a rotating interferometer experiment / G. Sagnac // Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. – 1913. – Vol. 157. – P. 1410-1413.
11. Huang, D. Optical coherence tomography / D. Huang [et al.] // Science. – 1991. – Vol. 254, № 5035. – P. 1178-1181.
12. Youngquist, R. C. Optical coherence-domain reflectometry: a new optical evaluation technique / R. C. Youngquist, S. Carr, D. E. N. Davies // Optics Letters. – 1987. – Vol. 12, № 3. – P. 158-160.
13. Геликонов, В. М. Десять лет оптической когерентной томографии в России. От эксперимента к клинической практике / В. М. Геликонов, Н. Д. Гладкова // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2004. – Т. 47, № 10-11. – С. 928-942.
14. Смит, А. Прикладная ИК-спектроскопия: пер. с англ. / А. Смит. – М.: Мир, 1982. – 328 с.
15. Скоков, И.В. Оптические спектральные приборы: учебное пособие для вузов / И.В. Скоков. – М.: Машиностроение, 1984. – 240 с.

16. Born, M. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light / M. Born, E. Wolf. – Amsterdam: Elsevier, 2013. – 934 p.
17. Коломийцов, Ю.В. Интерферометры: основы инженерной теории, применение / Ю.В. Коломийцов. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1976. – 294 с.
18. Полещук, А. Г. Лазерные интерферометры для контроля формы оптических поверхностей / А. Г. Полещук, В. Н. Хомутов, А. Е. Маточкин, Р. К. Насыров, В. В. Черкашин // Фотоника. – 2016. – Т. 58, № 4. – С. 38-50.
19. Афанасьев, В. М. Электрооптический модулятор по схеме интерферометра Маха-Цендера / В. М. Афанасьев // Прикладная фотоника. – 2016. – Т. 3, № 4. – С. 341-369.
20. Желтиков, В. А. Обзор электрооптических модуляторов в квантовых оптических интегральных схемах / В. А. Желтиков, Д. В. Пасечникова, С. Хыдырова // Политехнический молодёжный журнал. – 2022. – № 05(70). – DOI: 10.18698/2541-8009-2022-05-798.
21. Малыкин, Г. Б. История развития методов и интерференционных приборов для измерения малой разности оптических фаз (обзор) / Г. Б. Малыкин // Оптика и спектроскопия. – 2021. – Т. 129, № 2. – С. 174-188.
22. Астахов, Ю. С. Оптическая когерентная томография: как всё начиналось и современные диагностические возможности методики / Ю. С. Астахов, С. Г. Белехова // Офтальмологические ведомости. – 2014. – Т. 7, № 2. – С. 60-68.

23. Одноосный волоконно-оптический гироскоп ОИУС1000: раздел сайта / Москва, 2002. – URL: http://optolink.ru/ru/products/single_axis_fog/srs-1000 (дата обращения: 03.06.2025). – Текст: электронный.
24. Одноосный волоконно-оптический гироскоп ОИУС2000: раздел сайта / Москва, 2002. – URL:http://optolink.ru/ru/products/single_axis_fog/srs2000 (дата обращения: 03.06.2025). – Текст: электронный.
25. Яковенко, С. В. Система учёта температурной погрешности показаний интерферометра автономного лазерного измерителя колебаний давления / С. В. Яковенко // Фотоника. – 2020. – Т. 14, № 6. – С. 532-537.
26. Hayes, J. Dynamic Interferometry: Getting Rid of the Jitters / J. Hayes, J. Millerd // Photonics Handbook. – 2006.
27. Губин, В. П. Экспериментальное исследование взаимного влияния волоконных фарадеевских элементов в интерферометре на srun-волокне / В. П. Губин, С. К. Моршнева, Я. В. Пржиялковский, Н. И. Старостин, А. И. Сазонов // Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45, № 8. – С. 754–758.
28. Мухтубаев, А. Б. Исследование влияния внешнего относительного давления на сдвиг фазы в интерферометре Саньяка / А. Б. Мухтубаев, С. М. Аксарин, А. Н. Никитенко, И. Г. Дейнека, А. С. Алейник // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 507–514. – DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-507-514.
29. Виноградова, Г. Н. Основы микроскопии / Г. Н. Виноградова, В. В. Захаров. – СПб. : Университетские телекоммуникации, 2020. – 411 с.

30. Дукельский, К. В. Неразрушающие методы исследования стереометрии и внутренних дефектов оптического волокна для элементной базы микроэлектроники и микропроцессорной техники / К. В. Дукельский, В. Л. Ткалич, В. Н. Фролков, М. А. Коробейникова // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2004. – № 16. – С. 74-81.
31. Мешковский, И. К. Дефекты намотки оптического волокна при изготовлении чувствительного элемента волоконно-оптического интерферометра / И. К. Мешковский, С. С. Киселёв, А. В. Куликов, Р. Л. Новиков // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2010. – Т. 53, № 2. – С. 47-51.
32. Геликонов, В. М. Об избыточных шумах широкополосного излучения при равных интенсивностях в плечах интерферометра / В. М. Геликонов, В. Н. Ромашов, Г. В. Геликонов // Квантовая электроника. — 2021. — Т. 51, № 5. — С. 377–382.
33. Андропова, И. А. Физические проблемы волоконной гироскопии на эффекте Саньяка / И. А. Андропова, Г. Б. Малыкин // Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172, № 8. – С. 849-873.
34. Benford, D. J. Precision attitude control for the BETTII balloon-borne interferometer / D. J. Benford [et al.] // Ground-based and Airborne Telescopes IV. – SPIE, 2012. – Vol. 8444. – P. 911-921.
35. Rizzo, M. J. Building an interferometer at the edge of space: pointing and phase control system for BETTII / M. J. Rizzo [et al.] // Space Telescopes and Instrumentation 2014: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. – SPIE, 2014. – Vol. 9143. – P. 1050-1061.

36. Rinehart, S. A. The balloon experimental twin telescope for infrared interferometry (BETTII): an experiment for high angular resolution in the far-infrared / S. A. Rinehart [et al.] // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2014. – Vol. 126, № 941.
37. Rinehart, S. The balloon experimental twin telescope for infrared interferometry (BETTII) / S. Rinehart // Optical and Infrared Interferometry II. – SPIE, 2010. – Vol. 7734. – P. 198-209.
38. de Lorenzo, J. V. H. Attitude control system for a balloon based telescope / J. V. H. de Lorenzo, G. Nehmetallah, S. A. Rinehart // Signal Processing, Sensor/Information Fusion, and Target Recognition XXVII. – SPIE, 2018. – Vol. 10646. – P. 117-132.
39. de Lorenzo, J. V. H. Flight performance of the attitude control system of the balloon experimental twin telescope for infrared interferometry (BETTII) / J. V. H. de Lorenzo [et al.] // Ground-based and Airborne Telescopes VII. – SPIE, 2018. – Vol. 10700. – P. 1855–1874.
40. Rinehart, S. A. The Balloon Experimental Twin Telescope for infrared interferometry (BETTII): first flight / S. A. Rinehart [et al.] // Ground-based and Airborne Telescopes VII. – SPIE, 2018. – Vol. 10700. – P. 121-133.
41. Tajmar, M. Anomalous fiber optic gyroscope signals observed above spinning rings at low temperature / M. Tajmar, F. Plesescu, B. Seifert // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2009. – Vol. 150, № 3.

42. Tajmar, M. Fiber-Optic-Gyroscope Measurements Close to Rotating Liquid Helium / M. Tajmar, F. Plesescu // AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics, 2010. – Vol. 1208, № 1. – P. 220-226.
43. Tajmar, M. Evaluation of enhanced frame-dragging in the vicinity of a rotating niobium superconductor, liquid helium and a helium superfluid / M. Tajmar // Superconductor Science and Technology. – 2011. – Vol. 24, № 12.
44. Никишин, В. Б. Повышение точности подземной навигации на основе интеграции БИНС, одометров и приёмников GPS/ГЛОНАСС / В. Б. Никишин [и др.] // XVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – 2010. – С. 169-174.
45. Вавилова, Н. Б. Результаты разработки и тестирования навигационных систем дефектоскопов магистральных нефте- и газопроводов / Н. Б. Вавилова [и др.] // Сборник материалов XXII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – 2015. – С. 318-323.
46. Бельский, Л. Н. Бесплатформенная инерциальная навигационная система для средств выведения: точность начальной выставки и периодическая калибровка / Л. Н. Бельский, Л. В. Водичева, Ю. В. Парышева // Юбилейная XXV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – 2018. – Т. 15. – С. 250-253.
47. Чернодаров, А. В. Лётная отработка инерциально-спутниковой навигационной системы БИНС-500НС в высоких широтах / А. В. Чернодаров, А. П. Патрикеев, О. А. Карпов // Юбилейная XXV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным

навигационным системам. – СПб. : ОАО «ЦНИИ Электроприбор», 2018. – С. 296-299.

48. Чернодаров, А. В. Лётная отработка распределённой системы инерциально-спутниковой микронавигации для радиолокатора с синтезированной апертурой / А. В. Чернодаров [и др.] // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 222-231.

49. Бронников, С. В. Исследование технологии и средств привязки изображений Земли, полученных на пилотируемом космическом аппарате с помощью свободно перемещаемых камер / С. В. Бронников, Д. Ю. Караваяев, А. С. Рожков // Космическая техника и технологии. – 2016. – № 2 (13). – С. 105-115.

50. Чернодаров, А. В. Лётная отработка гравиинерциально-спутниковой навигационной системы / А. В. Чернодаров [и др.] // XXIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – 2016. – С. 244-247.

51. Чернодаров, А. В. Использование инерциально-спутниковой навигационной системы для определения параметров движения фазового центра антенны радиолокатора / А. В. Чернодаров [и др.] // XXIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – 2016. – С. 266-274.

52. Кробка, Н. И. О топологии графиков вариации Аллана и типовых заблуждениях в интерпретации структуры шумов гироскопов. Часть I. «О различии закономерностей накопления шумов гироскопов в платформенных и бесплатформенных инерциальных системах». Часть II. «Техника графиков

Аллана для идентификации структуры шумов гироскопов» / Н. И. Кробка // Сборник материалов XXII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – 2015. – С. 457-484.

53. Златкин, О. Ю. Разработка высокоточной бесплатформенной инерциальной системы ракетно-космического назначения на базе волоконно-оптических гироскопов среднего класса точности / О. Ю. Златкин [и др.] // XXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – 2014. – С. 272-287.

54. Буров, Д. А. Создание ряда систем ориентирования для мобильных роботов / Д. А. Буров, Е. И. Верзунов // XXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – 2014. – С. 330-336.

55. Заварзин, В. И. Методика определения элементов внешнего ориентирования для оперативной координатной привязки снимков оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли / В. И. Заварзин, А. В. Ли // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 9 (21). – С. 30.

56. Плотников, П. К. Погрешности бесплатформенного гироскопа для объектов с неограниченными углами поворотов / П. К. Плотников, А. В. Михеев, С. Г. Наумов // XX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – 2013. – С. 50-53.

57. Златкин, Ю. М. Технология и результаты испытаний бесплатформенного астроинерциального блока для систем управления космических аппаратов /

Ю. М. Златкин [и др.] // Сборник трудов XIX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». – 2012. – С. 211-214.

58. Чернодаров, А. В. Пространственно-распределённая система микронавигации для радиолокатора с синтезированной апертурой / А. В. Чернодаров [и др.] // XVIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – 2011. – С. 185-194.

59. Егоров, Д.А. Исследование температурной зависимости h -параметра катушки волоконно-оптического гироскопа / Д.А. Егоров, Р.Л. Новиков // Гироскопия и навигация. – 2023. – Т. 31. – № 4. – С. 206-214.

60. Колеватов, А. П. Классификация дефектов теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа / А. П. Колеватов [и др.] // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10. – № 8. – С. 59-81.

61. Есипенко, И. А. Математическая модель теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа и её экспериментальная верификация / И. А. Есипенко, Д. А. Лыков // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2017. – № 5 (116). – С. 31-46.

62. Кузьминых, Я. С. Исследование стабильности параметров оптического волокна типа PANDA при внешних механических и температурных воздействиях / Я. С. Кузьминых, В. С. Постников // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2014. – Т. 16. – № 4. – С. 107-112.

63. Алексеев, Э. И. Влияние статистики излучения на чувствительность волоконного кольцевого интерферометра / Э. И. Алексеев [и др.] // Квантовая электроника. – 1987. – Т. 14. – № 1. – С. 192-194.
64. Гусовский, Д. Д. Флуктуационные характеристики цельноволокonnого интерферометра Саньяка на волну 0,85 мкм / Д. Д. Гусовский, В. М. Геликонов // Журнал технической физики. – 1990. – Т. 60. – № 2. – С. 216-219.
65. Андрoнова, И. А. Подавление флуктуаций интенсивности полупроводниковых лазеров / И. А. Андрoнова, И. Л. Берштейн // Квантовая электроника. – 1991. – Т. 18. – № 6. – С. 678-680.
66. Guattari, F. A simple optical technique to compensate for excess RIN in a fiber-optic gyroscope / F. Guattari [et al.] // 2014 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS). – IEEE, 2014. – P. 1-14.
67. Guattari, F. Touching the limit of FOG angular random walk: Challenges and applications / F. Guattari [et al.] // 2016 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS). – 2016. – P. 1-13.
68. Алейник, А. С. Компенсация избыточного шума в волоконно-оптическом гироскопе / А. С. Алейник [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2016. – Т. 24. – № 2. – С. 20-32.
69. Killian, K. M. High-performance fiber optic gyroscope with noise reduction / K. M. Killian, M. Burmenko, W. Hollinger // Fiber Optic and Laser Sensors XII. – SPIE, 1994. – Vol. 2292. – P. 255-263.

70. Алексеев, Э. И. Волоконно-оптический гироскоп с подавлением избыточного шума источника излучения / Э. И. Алексеев [и др.] // Письма в Журнал технической физики. – 1998. – Т. 24. – № 18. – С. 30-35.

71. Спиридонов, Д. М. Аналитическая и компьютерная программная математические модели шума выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа, анализ и верификация / Д. М. Спиридонов, Д. В. Обухович // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 4. – DOI: 10.30898/1684-1719.2024.3.7.

72. Спиридонов, Д. М. Волоконно-оптический гироскоп с системой снижения уровня шума в выходном сигнале, математическое моделирование, эксперимент / Д. М. Спиридонов, Д. В. Обухович // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 12. – DOI: 10.30898/1684-1719.2024.12.13.

73. Спиридонов, Д. М. Волоконно-оптический гироскоп с системой снижения шума в выходном сигнале, влияние параметров системы на шумоподавление / Д. М. Спиридонов, Т. Е. Вадивасова, Д. В. Обухович // Известия вузов. ПНД. – 2025. – Т. 33, вып. 4. – С. 497–512. – DOI: 10.18500/0869-6632-003168. – EDN: RGVGLG.

74. Спиридонов, Д. М. Математическая модель шумов выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа / Д. М. Спиридонов, А. А. Игнатъев, Д. В. Обухович // Проблемы оптической физики и биофотоники. SFM-2021 : материалы Международного симпозиума и Международной молодёжной научной школы Saratov Fall Meeting 2021 / под ред. Г. В. Симоненко, В. В. Тучина. – Саратов : Изд-во «Саратовский источник», 2021. – С. 72-77. – ISBN 978-5-6047595-9-2.

75. Спиридонов, Д. М. Синтез и анализ математической модели шумовой составляющей выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа с системой компенсации шума / Д. М. Спиридонов, А. А. Игнатъев, Д. В. Обухович // Проблемы оптической физики и биофотоники. SFM-2022 : материалы Международного симпозиума и Международной молодёжной научной школы Saratov Fall Meeting 2022 / под ред. Г. В. Симоненко, В. В. Тучина. – Саратов : Изд-во «Саратовский источник», 2022. – С. 44-47. – ISBN 978-5-6049275-0-2.

76. Спиридонов, Д. М. Экспериментальная проверка аппаратно-программного метода снижения шума в выходном сигнале волоконно-оптического гироскопа / Д. М. Спиридонов, А. А. Игнатъев // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами. – 2022. – С. 132-136.

77. Спиридонов, Д. М. Влияние шума сигнала фазовой модуляции на выходной сигнал волоконно-оптического гироскопа / Д. М. Спиридонов, Д. В. Обухович // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами. – 2025. – С. 90-95.

78. Спиридонов, Д. М. Программа для симулирования работы волоконно-оптического гироскопа с замкнутым контуром обратной связи по измерению угловой скорости в условиях влияния источников собственных шумов / Д. М. Спиридонов. – Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025685252. – 2025.

79. Малыкин, Г. Б. Эффект Саньяка. Корректные и некорректные объяснения / Г. Б. Малыкин // Успехи физических наук. – 2000. – Т. 170. – № 12. – С. 1325-1349.
80. Ulrich, R. Fiber-optic rotation sensing with low drift / R. Ulrich // Optics Letters. – 1980. – Vol. 5. – № 5. – P. 173-175.
81. LeFèvre, H. C. Fundamentals of the interferometric fiber-optic gyroscope / H. C. LeFèvre // Optical Review. – 1997. – Vol. 4. – № 1A. – P. 20-27.
82. Graeme, J. Photodiode amplifiers: op amp solutions / J. Graeme. – New York : McGraw-Hill, Inc., 1995. – 320 p.
83. Li, X. Design of high shielding effectiveness magnetic shield for fiber optic gyroscope / X. Li [et al.] // Optik. – 2019. – Vol. 198. – P. 163160.
84. Олехнович, Р. О. Изучение изменения сигнала волоконно-оптического гироскопа, вызванного изменением температуры окружающей среды и внешним магнитным полем / Р. О. Олехнович, С. А. Тараканов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2008. – № 49. – С. 164-174.
85. Грабов, А. Б. Активная компенсация магнитной погрешности волоконно-оптических гироскопов на основе магниторезистивных чувствительных элементов / А. Б. Грабов, Е. В. Ковалева, В. И. Суханов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2020. – Т. 7. – № 3. – С. 93-102.
86. Курбатов, А. М. Вибрационная ошибка угловой скорости волоконно-оптического гироскопа и методы её подавления / А. М. Курбатов,

Р. А. Курбатов // Радиотехника и электроника. – 2013. – Т. 58. – № 8. – С. 842-842.

87. Gao, Z. Modeling for IFOG vibration error based on the strain distribution of quadrupolar fiber coil / Z. Gao, Y. Zhang, Y. Zhang // Sensors. – 2016. – Vol. 16. – № 7. – P. 1131.

88. IEEE standard specification format guide and test procedure for single-axis interferometric fiber optic gyros: IEEE std 952-1997 // IEEE standards collection. – 1998.

89. Lefevre, H.C. The fiber-optic gyroscope / H.C. Lefevre. – Norwood, MA: Artech House, 2022. – 432 с.

90. Blotekjaer, K. Fundamental noise sources that limit the ultimate resolution of fiber optic sensors / K. Blotekjaer // Optical and Fiber Optic Sensor Systems. – 1998. – Vol. 3555. – P. 1-12.

91. Vali, V. Fiber ring interferometer / V. Vali, R. W. Shorthill // Applied Optics. – 1976. – Vol. 15. – № 5. – P. 1099-1100.

92. Vali, V. Ring interferometer 950 m long / V. Vali, R. W. Shorthill // Applied Optics. – 1977. – Vol. 16. – № 2. – P. 290-291.

93. Giles, I. P. Coherent backscatter-induced drift in phase-modulated optical fibre gyroscopes / I. P. Giles [et al.] // Electronics Letters. – 1986. – Vol. 22. – № 9. – P. 494-496.

94. Iwatsuki, K. Backscattering in an optical passive ring-resonator gyro: experiment / K. Iwatsuki, K. Hotate, M. Higashiguchi // *Applied Optics*. – 1986. – Vol. 25. – № 23. – P. 4448-4451.
95. Cutler, C. C. Limitation of rotation sensing by scattering / C. C. Cutler, S. A. Newton, H. J. Shaw // *Optics Letters*. – 1980. – Vol. 5. – № 11. – P. 488-490.
96. Okamoto, K. All-Panda-fibre gyroscope with long-term stability / K. Okamoto [et al.] // *Electronics Letters*. – 1984. – Vol. 20. – № 10. – P. 429-430.
97. Стариков, С. С. Измерение шумов волоконно-оптических источников излучения / С. С. Стариков, О. Л. Кель, И. Л. Вольхин // *Вестник Пермского университета. Серия: Физика*. – 2019. – № 1. – С. 66-73.
98. Сабитов, Д. Р. Суперлюминесцентные диоды спектрального диапазона 1,5–1,6 мкм на основе напряжённо-компенсированных квантовых ям AlGaInAs/InP / Д. Р. Сабитов [и др.] // *Квантовая электроника*. – 2020. – Т. 50. – № 9. – С. 830-833.
99. Böhm, K. Low-drift fibre gyro using a superluminescent diode / K. Böhm [et al.] // *Electronics Letters*. – 1981. – Vol. 17. – № 10. – P. 352-353.
100. Morkel, P. R. Noise characteristics of high-power doped-fibre superluminescent sources / P. R. Morkel, R. I. Laming, D. N. Payne // *Electronics Letters*. – 1990. – Vol. 26. – № 2. – P. 96-98.
101. Mohr, F. Thermooptically induced bias drift in fiber optical Sagnac interferometers / F. Mohr // *Journal of Lightwave Technology*. – 1996. – Vol. 14. – № 1. – P. 27-41.

102. Хоровиц, П. Искусство схемотехники : в 3 т. Т. 2 / П. Хоровиц, У. Хилл. – М. : Мир, 1993. – 371 с.
103. Ван-дер-Зил, А. Шум: источники, описание, измерение / А. Ван-дер-Зил. – М.: Советское радио, 1973. – 228 с.
104. Baney, D. M. Broadband frequency characterization of optical receivers using intensity noise / D. M. Baney, W. V. Sorin // Hewlett Packard Journal. – 1995. – Vol. 46. – P. 6-12.
105. Погорелая, Д. А. Особенности настройки ПИД-регулятора в цепи обратной связи волоконно-оптического гироскопа / Д. А. Погорелая [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2017. – Т. 25. – № 1. – С. 119-127.
106. Сирая, Т. Н. Статистическая интерпретация вариации Аллана как характеристики измерительных и навигационных устройств / Т. Н. Сирая // Гироскопия и навигация. – 2020. – Т. 28. – № 1 (108). – С. 3-18.
107. Вариация Аллана для ВОГ ОИУС1000 производства НПК «Оптолинк»: раздел сайта / Москва, 2002. – URL:http://optolink.ru/media/Allan/Rus%20Allan_SRS1000.jpg (дата обращения: 03.06.2025). – Текст: электронный.
108. Микляшев, А. В. Погрешность волоконно-оптического гироскопа при угловых колебаниях / А. В. Микляшев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2019. – Т. 62. – № 11. – С. 982-988.
109. Zhang, S. High-performance fully differential photodiode amplifier for miniature fiber-optic gyroscopes / S. Zhang [et al.] // Optics Express. – 2019. – Vol. 27. – № 3. – P. 2125-2141.

110. Fink, M. Entanglement-enhanced optical gyroscope / M. Fink [et al.] // *New Journal of Physics*. – 2019. – Vol. 21. – № 5. – P. 053010.

111. Патент № 2019013 Российская Федерация, МПК H01S 3/025, Оптический передающий модуль : № 5059725/25 : заявл. 02.06.1992 : опубл. 30.08.1994 / А. А. Беляев, В. П. Дураев, С. М. Сапожников, М. А. Сумарков, В. И. Швейкин. - 8 с. : ил. - Текст : непосредственный.

112. Сабитов, Д. Р. Новые оптические передающие модули высокой надёжности на основе мощных суперлюминесцентных диодов спектрального диапазона 1,5–1,6 мкм / Д. Р. Сабитов [и др.] // *Квантовая электроника*. – 2023. – Т. 53. – № 7. – С. 561-564.

113. Salvestrini, J. P. Analysis and Control of the DC Drift in LiNbO₃-Based Mach–Zehnder Modulators / J. P. Salvestrini [et al.] // *Journal of Lightwave Technology*. – 2011. – Vol. 29. – № 10. – P. 1522-1534.

114. Sun, F. Study on the Drift of Modulated Phase in Interference Fiber Optic Gyroscope / F. Sun [et al.] // *J. Comput.* – 2010. – Vol. 5. – № 3. – P. 394-400.

115. Öğüt, S. Implementation of digital detection scheme for fiber optic gyroscope: диссертация / S. Öğüt. – Bilkent Universitesi (Turkey), 2013.

116. Техническое описание на микросхему AD8137 : [раздел сайта] / *Analog Devices*. – URL: <https://www.farnell.com/datasheets/52626.pdf> (дата обращения: 05.06.2025). – Текст: электронный.

117. GNU Octave: Научный язык программирования: официальный сайт / The GNU Octave Team. – URL: <https://octave.org> (дата обращения: 03.06.2025). – Текст: электронный.

118. Нигмедзянова, А. М. Среда программирования Octave. Задачи линейной алгебры. Графика : учебное пособие / А. М. Нигмедзянова, Э. И. Минсафина, А. Н. Мамешина. – Казань : Казан. ун-т, 2016. – 78 с.

119. Алексеев, Е. Р. Введение в Octave для инженеров и математиков / Е. Р. Алексеев, О. В. Чеснокова. – М. : ALT Linux, 2012. – 368 с.

120. Коркишко, Ю. Н. Прецизионный волоконно-оптический гироскоп с расширенным диапазоном измерения угловых скоростей / Ю. Н. Коркишко [и др.] // XXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – 2014. – С. 183-190.

121. Коркишко, Ю. Н. Исследование и идентификация структуры шумов высокоточных волоконно-оптических гироскопов / Ю. Н. Коркишко [и др.] // Доклады XX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – 2013. – С. 32-35.

122 Тихонов, В.И. Статистическая радиотехника: 2-е изд., перераб. и доп. / В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.

123. Ахманов, Д. Введение в статистическую радиофизику и оптику / Д. Ахманов [и др.]. – М.: Наука, 1981. – 640 с.

124. Коркишко, Ю. Н. Волоконно-оптический гироскоп навигационного класса точности / Ю. Н. Коркишко [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2008. – № 1. – С. 71-81.

125. Korkishko, Y. N. Three-Axis Fiber Optical Gyroscope for Rocket & Space Applications / Y. N. Korkishko [et al.] // 13th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2006 – Proceedings. – 2006. – P. 237-242.

126. Яворский, Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Наука, 1968. – 735 с. – Раздел: Анализ поляризованного света. Эллиптическая и круговая поляризация света.

Приложение



Научно-Производственная Компания “ОПТОЛИНК”

ООО НПК «ОПТОЛИНК», 124489, Москва, Зеленоград, Сосновая аллея, дом 6А, строение 5
Тел. (495) 663-1760. Факс (495) 663-1761 E-mail: opto@optolink.ru, www.optolink.ru

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО НПК «ОПТОЛИНК»

В.А. Кузнецов

«07» 12 2025 г.

АКТ

внедрения (использования) результатов диссертационной работы
Спиридонова Дмитрия Михайловича

Комиссия в составе:

председатель:	Директор отделения ВОГ	С.В. Прилуцкий
члены комиссии:	Технический директор отделения ВОГ	Д.В. Обухович
	<u>Начальник сектора БЭ</u>	<u>А.И. Морев</u>

составили настоящий акт о том, что результаты исследований, изложенные в работе Д.М. Спиридонова «Моделирование и подавление шумов в выходном сигнале измерительной интерферометрической системы», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, полученные в том числе в рамках выполнения работ «Об изготовлении макета ВОГ со встроенной схемой подавления шумовой составляющей выходного сигнала» (приказ №133 от 30.08.2023 года), используются в ООО НПК «Оптолинк». Разработанные Д.М. Спиридоновым адаптированные функциональная и алгоритмическая схемы волоконно-оптического гироскопа с системой снижения шума выходного сигнала наряду с результатами анализа их работы были применены при разработке комплекта конструкторской документации прибора ОИУС1000 ПНСК40-081 ПНСК.402137.081.

Председатель комиссии:

Члены комиссии:

С.В. Прилуцкий

Д.В. Обухович

А.И. Морев