

**Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого  
Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций**

На правах рукописи

**Костромитин Алексей Олегович**

**Разработка методов расчета параметров сигналов в волоконно-  
оптических интерферометрических измерительных системах с  
мультиплексированием чувствительных элементов**

Направление подготовки 03.06.01 Физика и астрономия

---

*Код и наименование*

Направленность 01.04.03 Радиофизика

---

*Код и наименование*

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

об основных результатах научно-квалификационной работы  
(диссертации)

Автор работы: Костромитин  
Алексей Олегович  
Научный руководитель: профессор,  
д.ф.-м.н., Котов Олег Иванович

Санкт Петербург – 2020

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе прикладной физики и космических технологий Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШПФиКТ: – *Величко Елена Николаевна,*  
*к.т.н., доцент*

Научный руководитель: – *Котов Олег Иванович,*  
*д.ф.-м.н., профессор*

Рецензент: – *Юхта Павел Валерьевич,*  
*к.т.н., начальник отдела,*  
*АО «Концерн «ЦНИИ*  
*«Электроприбор»*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Волоконно-оптические интерферометрические датчики физических величин получают всё более широкое распространение и активно применяются в различных областях промышленности и приборостроения, а также для научных экспериментов. Во многих случаях необходимо проводить распределенные измерения, в которых необходимо собирать и обрабатывать информацию об измеряемом воздействии с использованием большого числа датчиков. Например, в гидроакустических антеннах, где используется большое число гидрофонов. Одним из перспективных подходов для решения такой задачи является применение волоконно-оптических измерительных систем с мультиплексированием чувствительных элементов. Однако для улучшения характеристик таких измерительных систем требуется знать связь между параметрами отдельных элементов и системы в целом.

В виду отсутствия в доступной литературе комплексного анализа параметров элементов с выходными характеристиками таких систем возникает необходимость рассмотрения и детального изучения целого ряда вопросов, показывающих особенности работы таких интерферометрических систем и их использование для улучшения измерительных параметров. При этом для решения этой задачи требуются как теоретические, так и экспериментальные исследования. Наиболее важными из них являются: модельные расчеты распространения оптических сигналов в мультиплексированных волоконных системах, разработка и апробация метода измерения шумов лазерного источника. Решение этих вопросов является актуальной задачей при разработке новых волоконно-оптических интерферометрических мультиплексированных измерительных устройств с улучшенными параметрами выходных сигналов.

## **Цель и задачи исследования**

Целью исследования является разработка методов расчета параметров сигналов (оптических и электрических) в измерительных интерферометрических системах с мультиплексированием чувствительных элементов. Для этого в процессе исследования был решен ряд задач:

1. Разработана методика расчета параметров элементов для нескольких вариантов оптических схем с мультиплексированием чувствительных элементов.
2. Получены зависимости мощности оптического сигнала от числа и параметров элементов в оптической схеме мультиплексирования с использованием разработанной методики.
3. Разработан метод измерения частотных шумов лазера с формированием и обработкой сигнала интерферометрических осцилляций на поднесущей частоте.

## **Научная новизна**

1. Детально изучены несколько основных волоконных интерферометрических схем с мультиплексированием чувствительных элементов. Показано, что характеристики выходных сигналов в такой схеме существенно зависят от параметров элементов.

2. Разработан метод расчета параметров элементов, позволяющий оптимизировать схему с точки зрения достижения максимального уровня и контраста формируемых интерференционных сигналов, при этом учитываются потери оптической мощности, как в делительных элементах, так и в отрезках волокон и в зеркалах, входящих в волоконно-оптическую схему.

3. Предложена идеология анализа мультиплексированной схемы, позволяющая не только выполнять расчет оптимальных коэффициентов деления разветвителей в схеме, но и достигаемую мощность импульсов на выходе схемы, что дает также возможность оценивать влияние изменения

параметров отдельных элементов оптической схемы (в том числе случайных) на характеристики системы в целом.

4. Для измерения шумов лазера предложена и детально разработана простая и эффективная методика с пилообразной вспомогательной модуляцией разности фаз интерферирующих лучей, обеспечивающая сигнал поднесущей частоты  $f_0$ , модулированной по фазе искомыми флуктуациями частоты лазера, что существенно облегчает и ускоряет измерения шумовых параметров лазерного излучения.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Теоретическая значимость диссертационной работы определяется тем, что она расширяет круг решенных задач, существенных для понимания и расчета процессов распространения и трансформации электромагнитных волн оптического инфракрасного диапазона в мультиплексированных волоконно-оптических измерительных системах.

Практическая значимость работы заключается в возможности непосредственного использования её результатов при проектировании и построении волоконно-оптических распределенных датчиков физических величин, использующих мультиплексированные волоконно-оптические измерительные системы.

### **Апробация работы**

Результаты работы были использованы при разработке интерферометрических измерительных систем на основе волоконно-оптических датчиков с мультиплексированными чувствительными элементами в рамках совместных работ ФГАОУ «СПбПУ» и АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

## Публикации

1. Костромитин А.О., Лиокумович Л.Б., Экспериментальный анализ частотных шумов лазерных диодов с распределенной обратной связью, Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ-2014» Материалы научно-практической конференции. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций СПбПУ
2. Костромитин А.О., Кудряшов А.В., Лиокумович Л.Б., Измерение и анализ модуляции и шумов частоты излучения одночастотных полупроводниковых лазерных диодов, Журнал прикладной спектроскопии. 2015. Т. 82. №4. С. 622-627.
3. Костромитин А.О., Лиокумович Л.Б., Оптимизация пассивного волоконно-оптического датчика, «Неделя науки СПбПУ-2016» Материалы научной конференции с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. 2016
4. Костромитин А.О., Лиокумович Л.Б., Шум и модуляция излучения одночастотных полупроводниковых лазеров, «Неделя науки СПбПУ-2016» Материалы научной конференции с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. 2016
5. Костромитин А.О., Лиокумович Л.Б., Муравьев К.В., Повышение точности волоконно-оптического гидрофона за счет использования алгоритма определения амплитуды фазовой модуляции по интерференционному сигналу, Материалы XXI конференции молодых ученых «Навигация и управление движением», 2019
6. Полозов, В. В., Лиокумович, Л. Б., Скляр, Ф. В., Костромитин, А. О. МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОГРАММЫ СИСТЕМЫ ОПРОСА МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАННЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ АМПЛИТУДЫ СИГНАЛА ПОДНЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЫ //Неделя науки СПбПУ. – 2019. – С. 126-129.

7. Полозов, В. В., Ликумович, Л. Б., Скляр, Ф. В., Костромитин, А. О. ОБРАБОТКА СИГНАЛА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ С МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАННЫМИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ ДЕМОДУЛЯЦИИ С ПРОИЗВОЛЬНОЙ АМПЛИТУДОЙ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ МОДУЛЯЦИИ //Неделя науки СПбПУ. – 2019. – С. 68-70.
8. Скляр, Ф. В., Костромитин, А. О., Муравьев, К. В., Ликумович, Л. Б. ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДЫ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ МОДУЛЯЦИИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО СИГНАЛА ПРИ МОДУЛЯЦИИ ТОКА ЛАЗЕРА //Неделя науки СПбПУ. – 2019. – С. 70-73.
9. Ликумович, Л. Б., Костромитин, А. О., Ушаков, Н. А., Кудряшов, А. В. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ШУМОВ ЛАЗЕРОВ //Журнал прикладной спектроскопии. – 2019. – Т. 86. – №. 6. – С. 1000-1006.
10. Kostromitin, A., Liokumovich, L., Muravyov, K., Skliarov, P. Methods for measuring the auxiliary modulation step in interferometric fiber optic sensor //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1326. – №. 1 – С. 012016.
11. Skliarov P. V., Kostromitin A. O., Muravyov K. V. Distortion Analysis of Interferometric Signal with Auxiliary Emission Modulation in Semiconductor Laser //2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). – IEEE, 2019. – С. 332-335.
12. Kostromitin, A. O., Skliarov, P. V., Liokumovich, L. B., & Ushakov, N. A. Laser Frequency Noise Measurement by Forming an Interference Signal with Subcarrier Frequency //2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). – IEEE, 2019. – С. 336-338.
13. Девятьяров Данила Ренатович (RU), Скляр Филипп Владимирович (RU) , Костромитин Алексей Олегович (RU), Ликумович Леонид Борисович (RU) «Оценка чувствительности волоконно-оптического акустического преобразователя интерферометрического датчика»

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019613969

14. Девятьяров Данила Ренатович (RU), Костромитин Алексей Олегович (RU), Лиокумович Леонид Борисович (RU), Скляров Филипп Владимирович (RU). «Прием и демодуляция интерферометрического сигнала с использованием вспомогательной фазовой модуляции»  
Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018664097

15. Костромитин, А.О., Лиокумович, Л. Б., Скляров Ф.В., Котов, О. И., Анализ выходной мощности в оптоволоконных интерферометрических схемах с мультиплексированными чувствительными элементами // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2020. – Т. 13. – №. 2. – С. 126-141.

#### **Представление научного доклада: основные положения**

1. Методика расчета параметров элементов оптических схем волоконно-оптических датчиков с мультиплексированными чувствительными элементами.
2. Результаты моделирования параметров элементов и оптических сигналов в оптических схемах с мультиплексированием чувствительных элементов.
3. Метод измерения частотных шумов лазера с формированием и обработкой сигнала интерферометрических осцилляций на поднесущей частоте.



## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	10
1 Постановка задачи.....	12
1.1 Интерференционный сигнал.....	12
1.2 Основные схемы волоконных интерферометров .....	13
1.3 Технологии мультиплексирования ЧЭ .....	15
1.4 Формирование интерференционного сигнала в волоконно- оптических датчиках с мультиплексированием ЧЭ .....	16
2 Методика расчета и оптимизации параметров элементов оптических схем мультиплексирования.....	18
3 Измерение частотного шума лазера с формированием сигнала интерферометрических колебаний на поднесущей частоте.....	26
Заключение .....	34
Список литературы .....	35

## Введение

За последние несколько десятилетий волоконно-оптические датчики (ВОД) прошли путь от опытных лабораторных образцов к повсеместно распространенным устройствам [1, 2]. Во многом этому способствовало развитие элементной базы волоконно-оптических линий связи.

Принцип работы любого ВОД основан на модуляции характеристик оптического излучения (интенсивности, фазы, состояния поляризации) под действием измеряемой физической величины. Наиболее чувствительными являются ВОД с чувствительным элементом (ЧЭ) на основе интерферометра, в котором под действием измеряемого воздействия модулируется фаза интерферирующих лучей [3].

Уникальные свойства ВОД такие как электронейтральность, малые габариты, мультиплексирование большого числа ЧЭ с использованием одного оптического волокна, возможность значительного удаления от аппаратуры обработки сигнала делают этот тип датчиков привлекательным для различных применений [3, 4]. Например, создание гидрофонов на основе ВОД позволяет создавать гидроакустические антенны, лишенные недостатков традиционных пьезокерамических датчиков: большая масса, восприимчивость к внешним электрическим полям, необходимость внешнего электропитания. Кроме того возможность мультиплексирования большого числа ЧЭ на одном оптическом волокне позволяет создавать антенны из 64 и более датчиков используя один блок обработки сигнала [5, 6].

Наряду с описанными выше преимуществами ВОД, для успешного решения измерительных задач следует учитывать взаимосвязь параметров элементов входящих в состав системы обработки. Флуктуации частоты и интенсивности излучения лазера приводят к росту собственных шумов ВОД [3]. Также влияние на эти параметры ВОД оказывают другие активные компоненты: амплитудные и фазовые модуляторы, фотоприемник. Параметры пассивных компонентов оптической схемы мультиплексирования ВОД определяют распределение оптической мощности между сигналами от

отдельных ВОД, что непосредственно влияет на характеристики отдельных датчиков и системы в целом. В литературе в основном приводятся соотношения для связи отдельных параметров элементов ВОД [7 - 11]. Однако при создании систем мультиплексированных ВОД требуется оценивать не только влияние параметров отдельных элементов, но и особенности преобразования шумовых характеристик при формировании и приеме оптического сигнала. Поэтому разработка методов оценки параметров и выбора компонентов измерительной системы на основе ВОД с мультиплексированными ЧЭ является актуальной задачей.

## 1 Постановка задачи

### 1.1 Интерференционный сигнал

Явление интерференции лежит в основе принципа работы ЧЭ на основе волоконно-оптического интерферометра. Рассмотрим случай, когда возникает интерференция при наложении двух плоских монохроматических световых волн. В этом случае суммарную интенсивность световой волны можно записать в виде [12]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cdot \cos(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (1.1)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – фазы интерферирующих волн. В зависимости от значений фаз интерферирующих волн суммарная интенсивность будет претерпевать колебания. Важным параметром, характеризующим глубину модуляции интенсивности при наложении двух оптических волн, является контраст (видность) интерференции:

$$V = \frac{2\sqrt{I_1 \cdot I_2}}{I_1 + I_2}. \quad (1.2)$$

Этот параметр в простейшем случае зависит только от соотношения интенсивностей. Однако, на контраст также влияет степень когерентности двух монохроматических волн и согласованность состояния поляризации. Если при наложении двух волн состояния поляризации будут ортогональны, то будет происходить только сложение интенсивностей без интерференции. Для согласования состояния поляризации в волоконных интерферометрах применяют волокна с сохранением поляризации, используют фарадеевские ротаторы, снижают продольные и поперечные деформации в оптических волокнах [3].

Когерентность оптического излучения вносит ограничение не только на контраст оптического излучения, но и на геометрическую разность хода интерферирующих лучей  $\Delta L$ . Одним из количественных параметров когерентности является длина когерентности:

$$l_k = \frac{c}{n} \cdot \tau_k, \quad (1.3)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме,  $n$  – показатель преломления оптического волокна,  $\tau_k$  – время когерентности связанное с шириной спектра оптического излучения  $\Delta\nu$  ( $\tau_k \approx 1/\Delta\nu$ ). Интерференция двух оптических волн будет происходить только при условии  $\Delta L > l_k$ .

Для регистрации интенсивности световой волны (1.1) используется фотоприемник. Сигнал на выходе фотоприемника будет иметь вид:

$$U = U_0 + U_m \cos(\Delta\varphi + \varphi_0), \quad (1.4)$$

где  $U_0$  – постоянная составляющая,  $U_m$  – амплитуда,  $\Delta\varphi$  – разность фаз интерферирующих лучей,  $\varphi_0$  – постоянная фаза. Сигнал вида (1.4) будем называть интерференционным сигналом.

## 1.2 Основные схемы волоконных интерферометров

Для наблюдения интерференции и выполнения измерений на основе интерференционных явлений используются интерферометры. Основные оптические схемы представлены на Рисунок 1.1.

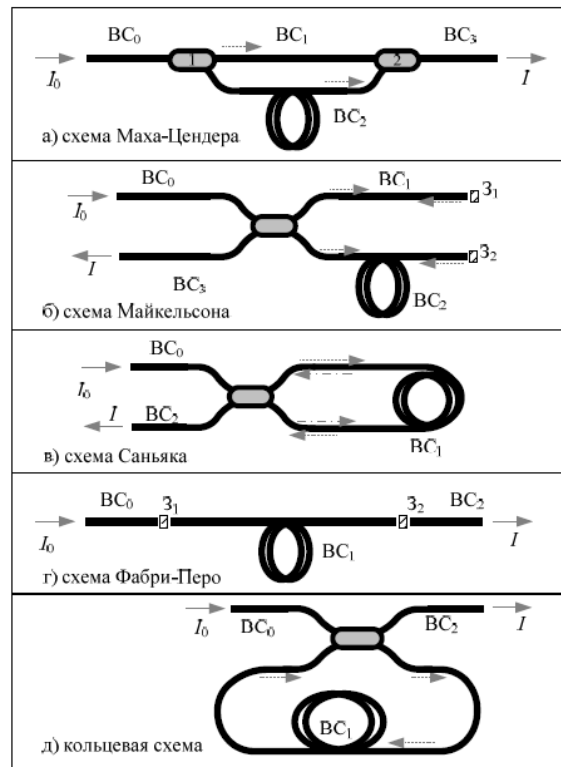


Рисунок 1.1 Схемы волоконных интерферометров

Интерферометры Маха-Цендера и Майкельсона относятся к двухплечевым интерферометрам. В них падающая световая волна делится оптическим разветвителем на две части, распространяясь по двум плечам. Изменяя геометрическую длину этих плеч можно задавать различные значения  $\Delta L$ . Внешние воздействия (растяжение, сжатие, изменение температуры и др.) приводят к изменению  $\Delta L$  и  $n$ . Это приводит к приращению фазовой задержки света в одном или обоих плечах интерферометра. В результате происходит изменение интенсивности света на выходе интерферометра. Такое свойство волоконных интерферометров Маха-Цендера и Майкельсона используется для создания волоконно-оптических датчиков (ВОД): гидрофонов, акселерометров, виброметров [13]. Возможность задействовать оба плеча интерферометра позволяет создавать двухтактные (push-pull) конструкции чувствительных элементов (ЧЭ) для увеличения чувствительности ВОД [2]. На основе этих интерферометров возможно создание схем с мультиплексированными ЧЭ.

Интерферометр Саньяка в основном применяется для создания волоконно-оптических гироскопов. В интерферометрах Фабри-Перо и кольцевом интерферометре происходит интерференция не между двумя, а бесконечным множеством оптических сигналов, что усложняет рассмотрение интерференционного сигнала. Однако используя оптическую схему интерферометра Фабри-Перо, где в качестве оптических зеркал используются волоконно-оптические брегговские решетки (ВОБР) возможно создание схем с мультиплексированными ЧЭ. Строго говоря, эту схему уже некорректно называть мультиплексированными интерферометрами Фабри-Перо, поскольку формирование интерференционного сигнала будет аналогично двулучевому интерферометру. Рассмотрение оптических схем и технологий мультиплексирования приведено в следующем разделе.

### 1.3 Технологии мультиплексирования ЧЭ

Под мультиплексированием понимается объединение нескольких ЧЭ ВОД в одной оптической схеме и использование одного блока обработки сигнала. Мультиплексирование ЧЭ позволяет существенно повысить конкурентоспособность ВОД по сравнению с другими типами датчиков. Повышение числа ЧЭ элементов опрашиваемых одним блоком обработки позволяет снизить стоимость и габариты измерительной системы. Под опросом ЧЭ понимается запуск и прием оптического сигнала, преобразование оптического сигнала в электрический, оцифровка электрического сигнала с последующей обработкой, в результате которой получается сигнал пропорциональный измеряемому воздействию.

К настоящему моменту разработано несколько технологий мультиплексирования с разделением сигналов от ЧЭ:

- по времени (time division multiplexing – TDM) [7];
- по длине волны (wavelength division multiplexing – WDM) [8];
- в пространстве (space division multiplexing – SDM) [9];
- по частоте несущих амплитудно или частотно модулированных сигналов (frequency division multiplexing – FDM) [10];
- с кодовым разделением каналов (code division multiplexing – CDM) [11, 13].

Однако, не смотря на столь большое число технологий мультиплексирования, наиболее популярной является технология TDM. Это связано с относительной простотой технической реализации и большим числом мультиплексируемых ЧЭ на одном оптическом волокне. Использование технологии TDM совместно с технологией WDM для мультиплексирования массивов ЧЭ позволяет одновременно опрашивать до 192 ЧЭ на одном оптическом волокне [5].

Для опроса ЧЭ по технологии TDM от лазерного источника формируется оптический импульс с длительностью  $\tau$  и частотой  $f$ . Далее возможно два варианта: оптический импульс поступает на вход оптической

схемы массива ЧЭ или на вход компенсационного интерферометра. Оптическая схема компенсационного интерферометра содержит оптическую линию задержки и фазовый модулятор, используемый для формирования сигнала вспомогательной фазовой модуляции. Вместо фазового модулятора в компенсационном интерферометре может использоваться акустооптический модулятор [7]. Задержка между импульсами на выходе компенсационного интерферометра должна быть равна задержке формируемой между импульсами в оптической схеме мультиплексирования ЧЭ.

#### 1.4 Формирование интерференционного сигнала в волоконно-оптических датчиках с мультиплексированием ЧЭ

Оптический сигнал от нескольких мультиплексированных ВОД на входе фотоприемника представляет собой последовательность импульсов, повторяющейся с периодом опроса  $T$ . Во избежание наложения оптических сигналов от отдельных ВОД фотоприемник должен иметь достаточную ширину полосы пропускания. Требование к полосе фотоприемника  $\Delta f_p$  задается длительностью оптического импульса  $\tau$  и определяется условием:

$$\Delta f_p \geq \frac{0,35}{\tau}. \quad (1.5)$$

С каждого оптического импульса снимается один или несколько отсчетов интерференционного сигнала:

$$u_i = u_0 + u_m \cos(\varphi + \psi_i), \quad (1.6)$$

где  $u_0$  – постоянная составляющая,  $u_m$  – амплитуда интерференционного сигнала,  $\varphi$  – разность фаз несущая информацию об измеряемом воздействии на ВОД,  $\psi_i$  – значение сигнала вспомогательной фазовой модуляции. Снятие отсчетов  $u_i$  (дмультиплексирование) по сути является децимацией в результате чего происходит переход от полосы сигнала фотоприемника  $\Delta f_p$  к полосе интерференционного сигнала  $\Delta f_s = 1/(2 \cdot T)$ . в более низкочастотную область спектра. В реальном интерференционном сигнале всегда



присутствуют шумы от различных источников. Запишем отсчет интерференционного сигнала (1.6) с учетом шумовых составляющих:

$$u_i = u_{0i} + u_{шi} + u_{mi} \cos(\varphi_i + \varphi_{шi} + \psi), \quad (1.7)$$

где  $u_{ш}$  – аддитивный шум,  $\varphi_{ш}$  – фазовый шум вызванный флуктуациями частоты лазера,  $\psi$  – шум сигнала вспомогательной фазовой модуляции. Условно можно разделить шумы в интерференционном сигнале на шум фазы и аддитивный шум. В основном имеется два источника аддитивного шума: амплитудный шум лазера и шумы фотоприемника (тепловой и дробовый). Использование в схеме оптического усилителя также будет вносить вклад в аддитивный шум интерференционного сигнала.

Важно отметить, что в процессе демультимплексирования и демодуляции происходит не только уменьшение полосы сигнала, но и перенос спектра шумов в область низких частот. В этом состоит важное отличие вклада шумов в интерференционный сигнал ВОД на основе одиночного интерферометра (1.1) от интерференционного сигнала ВОД с мультимплексированием ЧЭ. Если в первом случае аддитивный и фазовый шум непосредственно преобразуются в спектр шума интерференционного сигнала, то во втором случае преобразование носит более сложный характер – происходит наложение спектров шумов. Фазовые шумы лазера в основном имеют быстро спадающий спектр обычно не имеющий дискретных компонент за пределами полосы и влияния на высокочастотную область не оказывают. Спектр аддитивных шумов напротив не убывает с ростом частоты и может содержать дискретные компоненты за пределами полосы  $\Delta f_s$ , которые после демультимплексирования переместятся в спектр шума интерференционного сигнала.

Другой особенностью обработки оптического сигнала от ВОД с мультимплексированными ЧЭ является требование к равномерности амплитуды интерференционного сигнала, которая зависит мощности интерферирующих оптических импульсов. Значительная неравномерность импульсов приведет к неполному использованию динамического диапазона

фотоприемника заметному различию между шумами от ЧЭ. Амплитуды оптических сигналов определяются параметрами элементов в оптической схеме мультиплексирования ЧЭ. Поэтому для улучшения характеристик измерительной системы на основе ВОД с мультиплексированными ЧЭ требуется иметь методику расчета и оптимизации мощности оптических сигналов от отдельных ЧЭ, а также иметь возможность оценить вклад шумов элементов схемы формирования и обработки оптического сигнала.

Заметный вклад в шум интерференционного сигнала вносят флуктуации частоты лазера. Для лабораторных лазерных источников для большинства моделей приведен спектр частотных шумов. Однако для распространенных телекоммуникационных лазерных источников, применяемых в ВОД, спектр частотных шумов обычно не приводится. Поэтому необходимо иметь методику измерения частотных шумов лазера.

## 2 Методика расчета и оптимизации параметров элементов оптических схем мультиплексирования

В этом разделе представлен расчет мощности оптических импульсов пришедших от схемы мультиплексирования ВОД, а также методика оптимизации энергетических параметров элементов оптической схемы для достижения равенства амплитуды интерференционных сигналов от всех ЧЭ. Ниже приведено описание методики изложенной в статье «Анализ выходной мощности в оптоволоконных интерферометрических схемах с мультиплексированными чувствительными элементами» [14], которая написана мной совместно с соавторами.

«Мультиплексирование по времени подразумевает, что от лазерного источника на вход оптической схемы с массивом из  $N$  чувствительных элементов поступают короткие оптические импульсы с высокой скважностью и оптической мощностью  $P_{in}$ . Оптоволоконная схема содержит светоделительные элементы (разветвители или полупрозрачные отражатели) и должна быть построена так, чтобы каждый входной импульс проходил

разные пути и через разные комбинации ЧЭ, формируя последовательность из  $N + 1$  выходных импульсов мощностью  $p_n$  ( $n$  – номер выходного импульса, меняющийся от 0 до  $N$ ), задержанных во времени друг относительно друга. Для формирования интерферометрического сигнала на выходе схемы используется так называемый компенсирующий интерферометр (КИ) с оптической разностью хода, также равной  $\Delta L$ . Когда выходные импульсы проходят КИ, они разделяются и попарно совмещаются со смещением на один импульс. В результате на выходе компенсирующего интерферометра формируется и далее поступает на фотоприемное устройство новая последовательность из  $N + 2$  импульсов с мощностями  $P_m$  (их удобно нумеровать от 0 до  $N + 1$ ), в которой каждый исходный выходной импульс совмещен с предыдущим. Каждый импульс  $P_m$  представляет собой результат интерференции импульсов  $p_n$  и  $p_{n-1}$ . Исключение составляют только первый и последний импульсы:  $P_{r0}$  и  $P_{r(N+1)}$ , которые при прохождении КИ не совмещаются с предыдущим и с последующим ввиду отсутствия у них предыдущих и последующих импульсов. Воздействия на  $n$ -й волоконный ЧЭ меняют фазовую задержку  $\Delta\varphi_n$  оптического излучения, проходящего через данный ЧЭ. Поэтому интерференция импульсов  $p_n$  и  $p_{n-1}$  связана с  $\Delta\varphi_n$ , поскольку импульс  $p_{n-1}$  прошел через ЧЭ от первого до  $(n - 1)$ -го, а импульс  $p_n$  – через чувствительные элементы с первого по  $n$ -й. С учетом того, что  $P_m$  определяется интерференцией двух выходных импульсов, то они имеют вид

$$P_m(t) = C\{P_{0n} + P_{mn} \cdot \cos[\Delta\varphi_n(t)]\}, \quad (2.1)$$

где  $P_{0n} = p_n + p_{n-1}$  – постоянная составляющая;  $P_{mn} = 2(p_n p_{n-1})^{1/2}$  – амплитуда интерференционной составляющей.

Аргумент интерференционного сигнала  $\Delta\varphi_n$  содержит целевые осцилляции фазовой задержки  $n$ -го ЧЭ, связанные с измеряемым воздействием, и может быть определен в ходе последующей обработки. Коэффициент  $C$  связан с потерями при прохождении КИ, и в идеальном случае  $C = 1/2$ . Следует отметить, что КИ может быть расположен и на входе

оптоволоконной схемы. При этом детали прохождения импульсов через схему будут отличаться, но в результате также будут формироваться интерференционные сигналы вида (2.1).

При комплексном анализе оптоволоконных интерференционных схем с мультиплексированных ЧЭ, необходимо рассматривать различные системы соотношений, включающие различные типы параметров элементов оптической схемы, характеристики других элементов системы и опрашивающих импульсов. В контексте энергетических соотношений одна из ключевых проблем – выбор элементов, обеспечивающих оптимальные значения параметров интерференционных сигналов  $P_{0n}$  и  $P_{mn}$ . Набор значений  $P_{0n}$  и  $P_{mn}$  играет ключевую роль для организации корректной регистрации сигналов, оценки достигаемого отношения сигнал/шум и, как следствие, разрешающей способности системы.

С точки зрения проектирования схемы важный результат энергетического расчета – это определение требуемых коэффициентов деления светового потока в делительных элементах оптоволоконной схемы. В зависимости от используемых в схеме элементов, к таковым параметрам относятся коэффициенты деления волоконных разветвителей либо коэффициент отражения полупрозрачных отражателей.

Если использовать одинаковые делительные элементы, то неизбежно значения  $p_n$  и  $P_m$  будут существенно зависеть от  $n$  и вопрос об оптимальном выборе коэффициентов деления требует сложного анализа критериев оптимальности. Более привлекательный вариант в отношении достигаемого эффекта и одновременно более простой в отношении критерия оптимальности, предусматривает выбор делительных элементов, исходящий из требования выполнения условия равенства всех  $p_n$

$$p_0 = p_1 = \dots = p_n = \dots = p_N = P_0. \quad (2.2)$$

В этом случае  $P_{0n} = P_{mn} = 2P_0$ , контраст всех интерференционных сигналов равен единице (если обеспечено согласование по состоянию поляризации).

В данной работе рассматривается построение схемы, отвечающей именно такому требованию. При этом важным показателем выступает нормированный уровень мощности импульсов

$$p_{norm} = P_0/P_{in}; \quad (2.3)$$

по нему удобно сравнивать «энергетическую эффективность», достигаемую в разных схемах или при разных значениях  $N$ . При выполнении условия (2.2), в общем случае очевидно, что чем больше  $p_{norm}$ , тем меньше влияние различных шумов и флуктуаций на результирующие выходные сигналы измерительной системы.

Методика энергетического расчета и анализа оптоволоконных элементов схемы предполагает получение и применение двух систем соотношений:

во-первых, формул мультипликативной структуры для расчета значений  $p_n$  с учетом всех ключевых параметров элементов оптоволоконной схемы;

во-вторых, рекуррентных соотношений, связывающих выбираемые параметры делительных элементов соседних звеньев схемы и позволяющих рассчитать коэффициенты деления всех делительных элементов с учетом определенных условий на граничные элементы.

Для вывода первой системы соотношений нужно рассмотреть прохождение светового импульса, связанного  $n$ -м делительным элементом, от входа на выход. Вторая система соотношений требует рассмотрения условия баланса мощности  $p_{n-1} = p_n = P_0$  и решения уравнения баланса относительно параметра элемента деления.

Рассмотрим типовую схему отражательного типа (рис. 2.1). Схема включает  $N$  катушек чувствительных элементов (SE) с номерами  $n = 1, 2, \dots, N$ , а также  $(N + 1)$  Y-разветвителей (Y) и зеркал (M) с номерами  $n = 0, 1, 2, \dots, N$ .

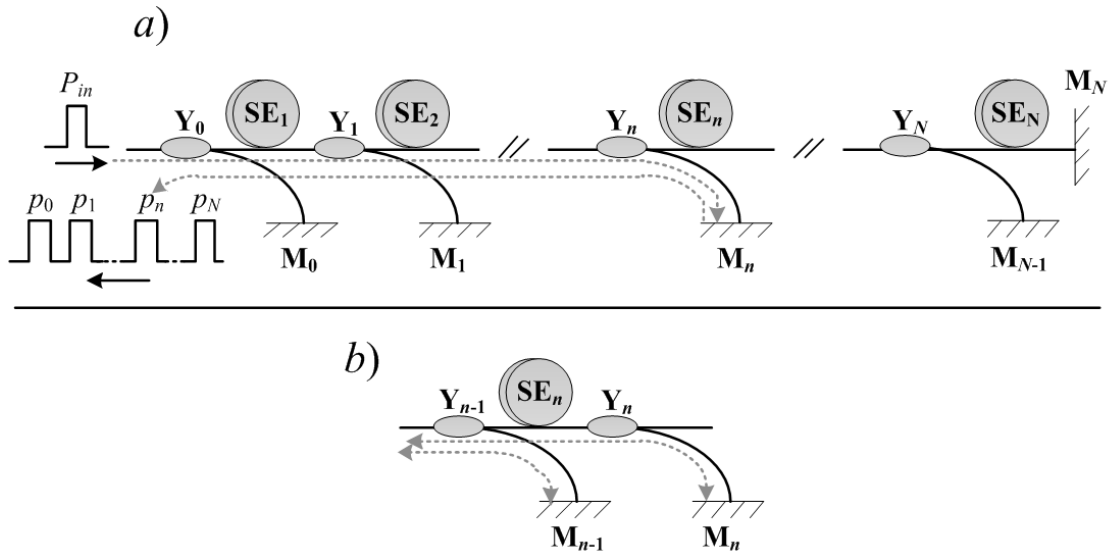


Рисунок 2.1 Схема отражательного типа и формирование выходных импульсов (а), а также  $n$ -е звено данной схемы (б):  
 $SE_i$  – чувствительные элементы;  $M_i$  – зеркала;  $Y_i$  – разветвители;  $P_{in}$  – входной импульс;  $p_i$  – выходные импульсы

В качестве ключевых параметров схемы целесообразно ввести в рассмотрение прямой ( $K_d$ ) и перекрестный ( $K_c$ ) коэффициенты передачи разветвителя, коэффициент передачи  $K_{sf}$  отрезка волокна с чувствительным элементом, коэффициент передачи  $K_f$  технологического отрезка между разветвителем и зеркалом, коэффициент отражения зеркала  $R$  (в идеальном случае  $R = 1$ , однако реальный коэффициент отражения может быть меньше единицы). При наличии в схеме соединений, потери в соединениях следует учесть в коэффициентах передачи волоконных отрезков  $K_f$  и  $K_{sf}$ . Коэффициенты  $K_d$  и  $K_c$  жестко связаны с коэффициентом деления  $D$  и параметром внутренних потерь разветвителя  $\alpha$ , как описано в Приложении 1.

Если рассмотреть путь прохождения входного импульса до  $n$ -го зеркала и обратно (см. рис. 2.1), то нетрудно сформировать мультипликативные формулы для  $p_n$ , которые имеют вид

$$p_n = P_{in} K_{fn}^2 K_{cn}^2 R_n \cdot \prod_{q=1}^n (K_{d(q-1)}^2 K_{sfq}^2). \quad (2.4)$$

В формуле (2.4) подразумевается, что если верхний предел произведения меньше нижнего, что имеет место при  $n = 0$ , то произведение

равно единице. Так же нужно учесть отличие случая  $n = N$ , связанное с отличием конечного звена схемы от остальных, поскольку для последнего  $N$ -го ЧЭ нет надобности направлять оптическую мощность далее и нецелесообразно использовать разветвитель между  $N$ -м ЧЭ и  $N$ -м зеркалом. Однако выражение (2.4) будет актуально для всех  $n$ , если по определению принять наличие формальных коэффициентов  $K_{cN} = K_{fN} = 1$ . На практике часто можно полагать, что все ЧЭ эквивалентны и  $K_{sf}$  не зависит от  $n$ . Тогда в выражении (2.4) этот параметр можно исключить из произведения и использовать множитель  $(K_{sf})^{2n}$ .

Из анализа одного звена схемы и сравнения разности путей  $(n - 1)$ -го и  $n$ -го импульса (см. рис. 2.1, *b*) можно получить уравнение, соответствующее балансу  $p_{n-1} = p_n$ . В рассматриваемой схеме (при сохранении определения  $K_{cN} = K_{fN} = 1$ ) это уравнение имеет вид

$$K_{c(n-1)}^2 K_{f(n-1)}^2 R_{n-1} = K_{d(n-1)}^2 K_{cn}^2 K_{sfn}^2 K_{fn}^2 R_{n-1}. \quad (2.5)$$

Для получения рекуррентного соотношения на параметры разветвителей необходимо учесть связь между  $K_d$  и  $K_c$ . Если использовать модель параметров разветвителя в виде

$$K_d = (1 - \alpha_{el}) \cdot D / (1 + D) \text{ и } K_c = (1 - \alpha_{el}) / (1 + D), \quad (2.6)$$

то уравнение (2.6) непосредственно преобразуются к рекуррентному виду

$$D_{n-1} = A_n (1 + D_n), \quad (2.7)$$

где использовано допущение, что параметр избыточных потерь разветвителя  $\alpha_{el}$  не зависит от  $D$  и одинаков для любых  $n$ , а также введена константа

$$A_n = K_{f(n-1)} \sqrt{R_{n-1}} / [(1 - \alpha_{el}) K_{sfn} K_{fn} \sqrt{R_n}]. \quad (2.8)$$

При расчетах практических схем часто допустимо полагать коэффициенты  $K_{sf}$ ,  $K_f$  и  $R$  одинаковыми для всех  $n$ . В этом случае расчет оптимальных значений  $D_n$  не зависит от значений  $K_f$  и  $R$ , а константа  $A_n$  не будет зависеть от  $n$  и становится более простой:

$$A = 1 / [(1 - \alpha_{el}) K_{sf}], \quad (2.9)$$

(при этом на расчет оптимальных значений  $D_n$  влияют избыточные потери в разветвителях и потери в ЧЭ).

Для использования выражения (2.7) необходимо определить начальное условие для рекуррентного расчета оптимальных значений  $D_n$ . Для данной схемы это условие непосредственно связано с отсутствием разветвителя с номером  $N$ . Другое включение последнего ЧЭ однозначно ухудшит полученные значения  $p_0$  и  $P_{norm}$ . При этом рассмотрение конечного звена, содержащего последний ЧЭ, дает условие баланса мощности (2.5) при подстановке  $K_{cN} = K_{sfN} = 1$  в правой части. Тогда учет соотношений (2.6) для  $(N - 1)$ -го разветвителя приводит к простому соотношению:

$$D_{(N-1)} = \frac{K_{f(N-1)}}{K_{sfN}} \sqrt{\frac{R_{N-1}}{R_N}}, \quad (2.10)$$

которое соответствует (2.7) при исключении из выражения (2.8) для определения константы  $A_n$  параметров  $K_{cn}$ ,  $K_{fn}$  и  $\alpha_{el}$ .

Нетрудно видеть, что для малых потерь в элементах, когда коэффициенты  $K_{f(n-1)}$ ,  $K_{sfN}$ ,  $R_{N-1}$  и  $R_N$  близки к единице, выражение (2.9) даст  $D_{N-1} \approx 1$ , т. е. логичный для баланса такого звена результат с разветвлением, близким к разветвителю 50 : 50 независимо от потерь в разветвителе.

Далее по рекуррентному выражению (2.7) можно поочередно получить значения для остальных разветвителей с номерами от  $n = N - 2$  до  $n = 0$ , сформировав набор значений  $\{D\}$ , а затем на основе (2.6) и заданного  $\alpha_{el}$ , пересчитать значения  $\{D\}$  в наборы значений  $\{K_d\}$  и  $\{K_c\}$  всех разветвителей.

Если подставить полученные наборы значений  $\{K_d\}$  и  $\{K_c\}$  в выражения (2.4), то, в силу метода получения этих наборов, для любого  $n$  будет получено одно и тоже значение  $p_0$ , причем максимально возможное при заданных параметрах, использованных в расчете.

Однако важным результатом такого вычисления является непосредственно значение уровня  $p_{norm}$ , а также возможность анализа его зависимости от  $N$  и других параметров, задействованных в расчетах.



В таблице 1 приведены рассчитанные наборы значений  $\{D\}$ ,  $\{K_d\}$  и  $\{K_c\}$  разветвителей для  $N = 8$  и  $\alpha_{el[\text{дБ}]} = \alpha_{sf[\text{дБ}]} = 0,1$  дБ,  $\alpha_{f[\text{дБ}]} = 0,05$  дБ и  $R = 0,99$ , где подразумевается  $\alpha_{sf[\text{дБ}]} = -10\lg(K_{sf})$ ,  $\alpha_{f[\text{дБ}]} = -10\lg(K_f)$ ,  $\alpha_{el[\text{дБ}]} = -10\lg(1-\alpha_{el})$ .

Таблица 1. Результаты расчета значений параметров  $\{D\}$ ,  $\{K_c\}$  и  $\{K_d\}$  для случая  $N=8$  при заданных значениях потерь оптической мощности в элементах схемы.

$n$	$D$	$K_d$	$K_c$
0	9,848	0,887	0,09
1	8,405	0,873	0,104
2	7,026	0,855	0,122
3	5,71	0,832	0,146
4	4,453	0,798	0,179
5	3,253	0,747	0,23
6	2,106	0,663	0,315
7	1,012	0,491	0,486

Эти значения коэффициентов деления важны при практической реализации данной схемы, поскольку их нужно знать для установки соответствующих разветвителей. Однако, для анализа энергетической эффективности схемы более актуальны показанные на рис. 2.2 примеры зависимостей  $p_{norm}$  от  $N$  для этого же набора параметров, а также для случаев, когда отличается значение параметра  $\alpha_{sf}$  или  $\alpha_{el}$ .

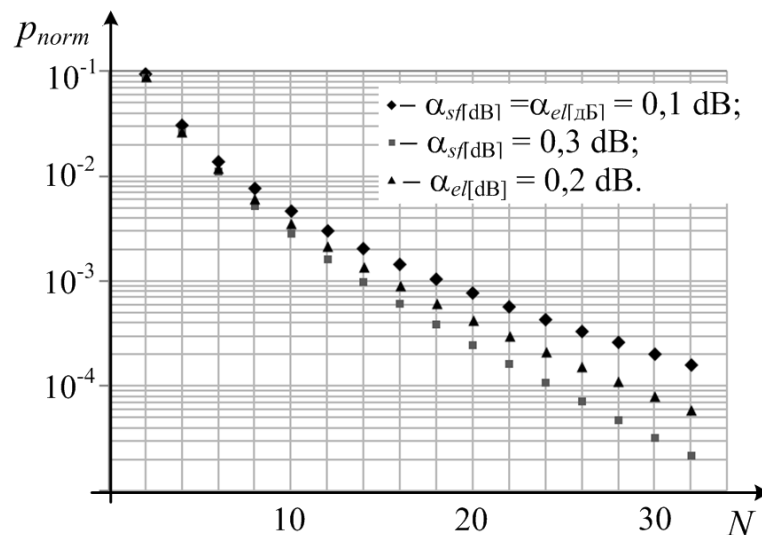


Рисунок 2.2 Случай схемы отражательного типа. Зависимости нормированного уровня мощности импульсов от количества чувствительных элементов (ЧЭ) для различающихся значений потерь ( $\alpha_{sf}$  и  $\alpha_{el}$ )

Пример зависимостей на рис. 2.2 показывает достигаемые уровни относительной мощности для схем с указанными параметрами при оптимальном выборе коэффициентов деления разветвителей, степенной вид зависимости  $p_{norm}(N)$ , а также демонстрируют возможность изучения влияния других параметров элементов схемы на достигаемый уровень  $p_{norm}$ .

Важно отметить, что приведенные системы выражений позволяют не только анализировать влияние параметров элементов схемы на достигаемый уровень  $p_{norm}$ , но и учитывать и изучать влияние отклонений реальных параметров от идеальных значений на значения  $p_n$ . Если при изготовлении реальных разветвителей коэффициенты  $D$  задаются в формате  $(1-\delta)/\delta$  с точностью выбора  $\delta$ , например до 1 или до 2 %, то можно применить соответствующие округления к набору оптимальных значений  $\{D\}$ , полученных после рекуррентной процедуры. Далее в выражения (3.4) можно подставить округленные значения и, посчитав  $p_{0n}$ , оценить разброс этих значений и отклонения от результатов расчетов без округления.»

### 3 Измерение частотного шума лазера с формированием сигнала интерферометрических колебаний на поднесущей частоте

Лазеры с узкой шириной линии широко используются в интерферометрических волоконно-оптических датчиках [3, 7]. Параметры таких датчиков во многом зависят от уровня частотных шумов лазера и алгоритма обработки сигнала. В современных интерферометрических датчиках достигается уровень собственных шумов близкий к единицам мкрад/ $\sqrt{\text{Гц}}$  [7] и получение такого низкого шума существенно зависит от шума интенсивности (RIN) и шума частоты используемого лазерного источника. Вклад частотного шума в отличие от RIN зависит от разности хода интерферирующих лучей  $\Delta L$  и увеличиваются с ростом  $\Delta L$  [3].

Большинство методик измерения частотных шумов лазера использует разбалансированный интерферометр, в котором флуктуации частоты

приводят к флуктуациям фазы интерферирующих лучей  $\delta\varphi(t)$  и колебаниям интенсивности света на выходе. Определить величину  $\delta\varphi(t)$  можно двумя способами. Первый способ основан на прямом детектировании [15]. Прямое детектирование требует поддержания рабочей точки интерферометра на линейном участке передаточной характеристики интерферометра и дополнительных калибровок уровня сигнала на выходе интерферометра. Кроме того, в этом способе измерений в области низких частот существенный вклад вносит собственный шум фотоприемника, который существенно возрастает в низкочастотном диапазоне.

Во втором способе используется вспомогательная модуляция аргумента интерференционного сигнала и специальные алгоритмы обработки сигнала [16] – т.н. демодуляции интерференционного сигнала. Использование вспомогательной модуляции позволяет исключить контроль рабочей точки интерферометра и регистрировать интерференционный сигнал в области более высоких частот, задаваемых модуляцией, что позволяет снизить влияние фликкер-шума фотоприемника. В этом случае для определения флуктуаций  $\delta\varphi(t)$  необходима специализированная аппаратура, выполняющая операцию демодуляции интерференционного сигнала. Причем от параметров этой аппаратуры зависят ограничения диапазона определения  $\delta\varphi(t)$  по частоте и амплитуде.

Для решения задачи определения спектра частотного шума лазера, возможен альтернативный вариант с формированием сигнала поднесущей частоты и использованием стандартных радиоизмерительных приборов. Далее приведено описание методики изложенной в статье «Метод измерения частотных шумов лазеров» [17], написанной мною совместно с соавторами.

«В представлении частоты лазерного источника как суммы постоянной составляющей  $\nu_0$  и шумовой компоненты  $\nu(t)$ , для интерферометрии более значимым и важным является знание о характере флуктуаций  $\nu(t)$  или, что более удобно, о спектральной плотности этих флуктуаций, которая может

быть представлена в «мощностной» шкале  $S_v^2(f)$  (спектральная плотность мощности в единицах  $[\text{Гц}^2/\text{Гц}]$ ) или в «амплитудной» шкале  $S_v(f)$  (корень из спектральной плотности мощности в единицах  $[\text{Гц}/\sqrt{\text{Гц}}]$ ). Эти характеристики позволяют обоснованно выбирать лазерный источник для интерферометрического измерителя и оценивать возможные параметры такого измерителя, а результаты измерений  $S_v(f)$ , становятся ключевыми для сравнения лучших разрабатываемых источников для интерферометрии и др. измерений [1 - 4].

Сигнал на выходе двухлучевого интерферометра имеет вид:

$$u(t) = U_0 + U_m \cdot \cos[\varphi_0 + \varphi_S(t) + \Psi_M(t) + \delta\varphi_v(t)], \quad (3.1)$$

где  $U_0$  – постоянная составляющая,  $U_m$  – амплитуда интерференционного сигнала,  $\varphi_0$  – постоянная составляющая аргумента интерференционного сигнала медленно меняющаяся со временем,  $\varphi_S(t)$  – внешнее воздействие на интерферометр,  $\Psi_M(t)$  – сигнал вспомогательной модуляции,  $\delta\varphi_v(t)$  – флуктуации фазы, вызванные частотным шумом лазера.

Величина  $\delta\varphi_v(t)$  связана с флуктуациями частоты лазера  $\delta\nu$  следующим соотношением:

$$\delta\varphi_v(t) = (2\pi \cdot \Delta L \cdot n/c) \cdot \delta\nu(t), \quad (3.2)$$

где  $n$  – эффективный коэффициент преломления оптического волокна интерферометра,  $c$  – скорость света в вакууме. Соотношение (2) является приближенным и справедливо только при условии  $\Delta L \ll c/(n \cdot \Delta F)$ , где  $\Delta F$  – характерный частотный диапазон колебаний частоты лазера [19]. Измерения частотных шумов узкополосных лазеров, как правило, выполняется в частотном диапазоне до 100 кГц и с разностью хода  $\Delta L$  не превышающей сотен метров. Поэтому соотношение (2) можно считать справедливым для оценки частотных шумов лазера и определения  $\delta\nu(t)$  по величине флуктуаций аргумента  $\delta\varphi(t)$  интерференционного сигнала (3.1). Флуктуация частоты лазера  $\delta\nu$  может быть задана в спектральной плотности мощности,

измеряемой в  $\Gamma\text{ц}^2/\Gamma\text{ц}$ , или в шкале спектральной плотности  $S_v(f)$  (корень из спектральной плотности мощности) измеряемой в  $\Gamma\text{ц}/\sqrt{\Gamma\text{ц}}$ .

Для формирования сигнала поднесущей частоты используется периодическая вспомогательная модуляция  $\Psi_M(t)$  пилообразной формы с частотой  $f_0$  и амплитудой  $\psi_m$ . Линейный участок этого сигнала, начинающийся в момент  $t_0$ , может быть записан в виде

$$\Psi_M(t) = \psi_m(t - t_0):f_0. \quad (3.3)$$

При условии  $f_0 > \Delta F$  значение  $\delta\phi_v$  за один период сигнала (3.3) может считаться постоянным на участке линейного изменения  $\Psi_M(t)$ . На этом интервале сигнал (1) будет квазигармоническим и только при разрывах пилообразного сигнала в интерференционном сигнале будут наблюдаться скачки. В случае  $\psi_m = 2\pi$  скачек аргумента не меняет значение косинуса, поэтому интерференционный сигнал (3.1) будет эквивалентен квазигармоническому сигналу с поднесущей частотой  $f_0$

$$u(t) = U_0 + U_m \cdot \cos[2\pi f_0 t + \phi_0 + \delta\phi_v(t)]. \quad (3.4)$$

Полученный сигнал поднесущей частоты соответствует разложению в ряд Фурье гармонического колебания с пилообразной модуляцией аргумента и обращением в ноль всех гармоник за исключением первой. В результате сигнал (3.4) эквивалентен оптическому гетеродинированию, которое реализуется с использованием вспомогательной пилообразной модуляции. В данной работе предлагается использовать формирование сигнала поднесущей частоты (3.4) для нахождения спектральной плотности частотных шумов лазера  $S_v(f)$ .

В случае малости флуктуаций аргумента сигнала (3.4) ( $\delta\phi_v < \pi$ ) спектр интерференционного сигнала (3.4)  $S_u(f)$  может быть представлен в виде дискретной составляющей с амплитудой  $U_m$  и непрерывной части спектра  $S'_u(f)$ , которая в области несущей частоты  $f_0$  задается выражением

$$S'_u(f) = U_m/2 \cdot [S_\phi(f - f_0) + S_\phi(f_0 - f)]. \quad (3.5)$$

Переменная  $f \geq 0$ , поскольку подразумевается односторонний спектр. Согласно (3.5) спектральная плотность  $S_\varphi(f)$  оценивается выражением

$$S_\varphi(f) = 2/U_m \cdot [S'_u(f \pm f_0)], \quad (3.6)$$

где использование разного знака обусловлено симметричностью спектра шума относительно несущей частоты.

Если измерять спектр сигнала (3.4) при помощи анализатора спектра, то получим спектральную зависимость  $S''_u(f)$  из которой можно определить искомую спектральную плотность частотных шумов

$$S_v(f) = \frac{c}{2\pi n} \cdot S'_\varphi(f) = \frac{c}{2\pi n} \cdot \frac{G}{\Delta L} \cdot \frac{S''_u(f_0 \pm f)}{S''_u(f_0)}. \quad (3.7)$$

Здесь параметр  $G$  определяется спектральным разрешением анализатора спектра  $\delta f$  и равняется  $G = (\delta f/2)^{-1/2}$ . Фактически выражение (3.7) показывает, что для данного подхода для регистрации сигнала (3.4) и оценки частотных шумов лазера, достаточно использовать типовые приборы: генератор пилообразной модуляции и анализатор спектра.

Следует отметить, что при измерениях частотных шумов лазера необходимо исключить влияние внешних воздействий (вибрации, звука) на разбалансированный интерферометр, т.е. достаточную малость флуктуаций  $\varphi_s(t)$ . Также надо убедиться в соблюдении линейной связи (3.2). Не соответствие линейной связи между уровнем флуктуаций  $\delta\varphi_v$  и величиной  $\Delta L$  может свидетельствовать о недостаточной величине  $\Delta L$ , а также влиянии RIN и других факторов на результаты измерений. Поэтому при измерении частотных шумов лазера интерферометр изолирован от акустических и вибрационных воздействий, посредством размещения в специальном боксе, а также проверялась линейность зависимости  $\delta\varphi_v(\Delta L)$ .

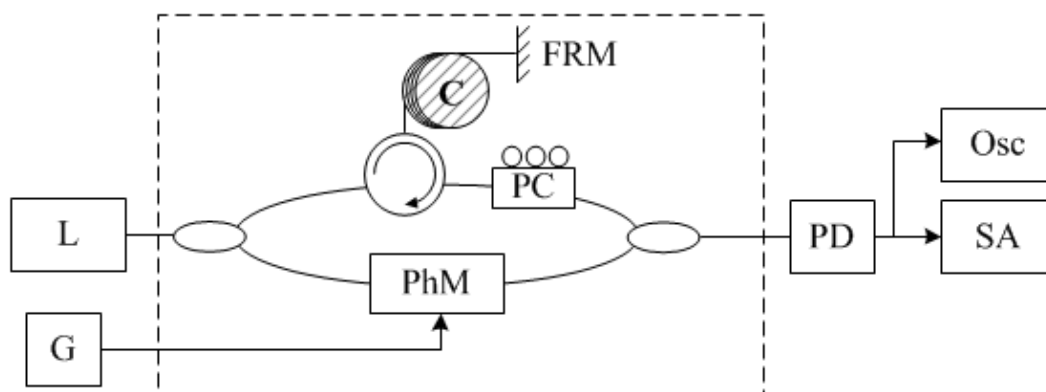


Рисунок 3.1 Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 3.1. Излучение лазера (L) поступает на вход разбалансированного интерферометра. В оптической схеме используется интегрально-оптический фазовый модулятор (PhM) на основе ниобата лития. Поэтому на входе интерферометра и в плече с модулятором используются разветвитель и оптические волокна с сохранением поляризации. Второе плечо интерферометра состоит из циркулятора, катушки с оптическим волокном (C) длиной  $l$  с фарадеевским зеркалом (FRM), которые выполнены на основе стандартного одномодового волокна. В основном режиме измерений использовался вариант с  $l = 80$  м ( $\Delta L \approx 160$  м). Для поддержания высокого контраста интерференционного сигнала в схему включен контроллер поляризации (PC). Использование фарадеевского зеркала в оптической схеме позволяет снизить влияние флуктуаций состояния поляризации в протяженной катушке с оптическим волокном на контраст интерференционного сигнала. Сигнал вспомогательной модуляции пилообразной формы подается с генератора (G). Выходной оптический сигнал интерферометра регистрировался фотоприемником (PD) и поступал на вход анализатора спектра (SA). Осциллограф (Osc) использовался для предварительной настройки схемы и контроля параметров сигнала.

Для получения корректных результатов измерений необходимо, чтобы спектр  $S_u(f)$  зарегистрированный в полосе  $\delta f$ , не имел искажений соотношения уровней дискретной составляющей непрерывной части спектра  $S'_u(f)$ . Так же

важно использовать правильные значения полосы анализа  $\delta f$ , а также выбирать эту величину так, чтобы не возникало упомянутых выше искажений.

Для тестирования предложенной методики измерения частотных шумов был выбран лазерный модуль RIO Orion<sup>TM</sup> класса Grade 1. Это узкополосный лазерный источник с длиной волны 1550 нм и низким уровнем частотных шумов. Кроме того, производителем лазерного модуля приводится спектр частотного шума, что позволяет верифицировать предложенный метод измерений.

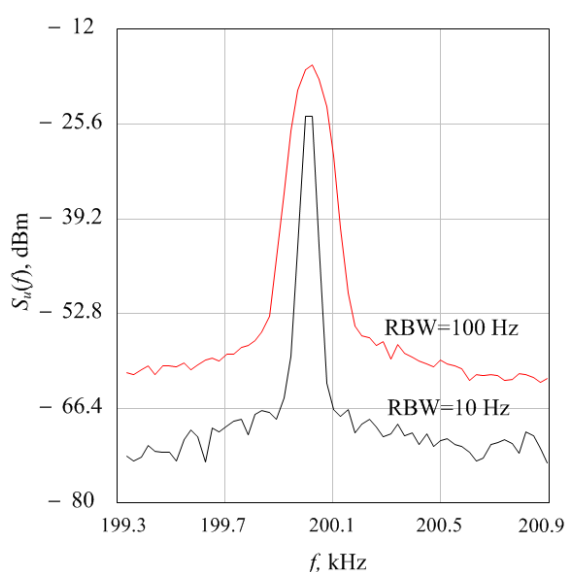


Рисунок 3.2 Спектр интерференционного сигнала

Для минимизации влияния собственных шумов анализатора спектра, был установлено минимальное ослабление входного аттенюатора, не приводящее к перегрузке смесителя. В качестве детектора в настройках анализатора спектра был выбран RMS детектор и выполнено усреднение спектра по 100 реализациям. С генератора подавался модулирующий сигнал с частотой  $f_0 = 200$  кГц. Анализатором спектра были зафиксированы спектры интерференционного сигнала для двух значений  $RBW$  (рис. 3.2).

Следовало ожидать, что при уменьшении полосы в десять раз спектр шума уменьшится на 10 дБ, а уровень дискретной компоненты останется постоянным. Так и происходит при уменьшении  $RBW$  с 1 кГц до 100 Гц. В



случае уменьшения RBW до 10 Гц спектр шума также уменьшается на 10 дБ, а уровень дискретной компоненты также уменьшается, что приводит к некорректной оценке частотных шумов лазера. Для использованного в эксперименте оборудования минимальное значение RBW обеспечивающее отсутствие искажений спектра сигнала (3.4) равно 100 Гц. Соответственно нижняя граница, для которой возможно определить значение  $S_v(f)$  равна  $2 \cdot \text{RBW}$  или 200 Гц ».

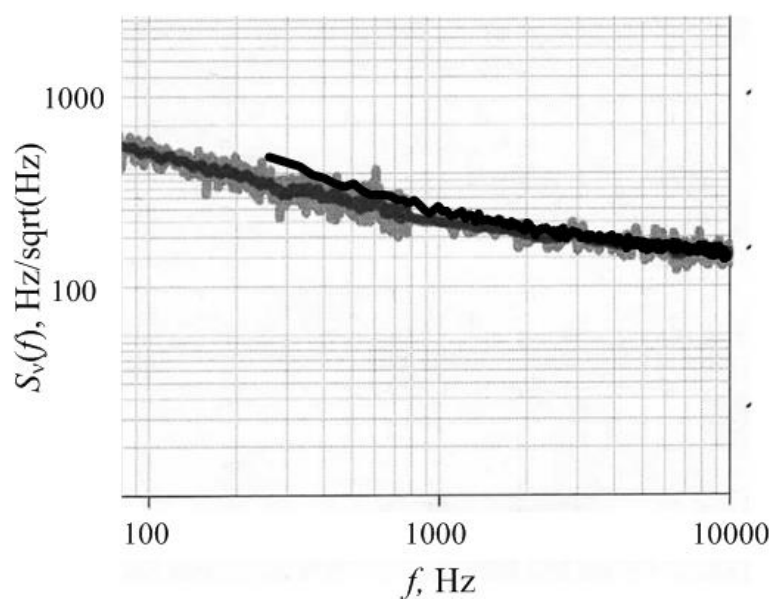


Рисунок 3.3 Результат экспериментального определения  $S_v(f)$  (черный график) и спектр частотного шума приведенный производителем лазера (серый график)

Сравнение экспериментальных результатов определения спектра частотного шума  $S_v(f)$  со спектром частотного шума приведенного производителем лазера (рис. 3.3) показал практически полное совпадение значений. Незначительное различие спектра частотных шумов в области от 250 Гц до 1 кГц связано с влиянием внешних акустических шумов.

## Заключение

В работе предложен метод расчета параметров сигналов в измерительных системах на основе интерферометрических волоконно-оптических датчиков учитывающий параметры элементов, в частности потери оптической мощности. Приведен пример процедуры получения выражений для расчета параметров элементов и мощности оптических сигналов для схемы мультиплексирования чувствительных элементов на основе разветвителей и оптических зеркал (схема отражательного типа). Метод расчета, предложенный в данной работе, позволяет не только выполнять оптимизацию мощности интерференционных сигналов за счет вычисления оптимальных коэффициентов деления светоделительных элементов (волоконно-оптических разветвителей или брегговских решеток) но и оценить влияние отклонение параметров элементов оптической схемы на выходные параметры измерительной системы на основе интерферометрических волоконно-оптических датчиков.

Для измерения частотных шумов лазера предложена метод с формированием и обработкой сигнала интерферометрических колебаний на поднесущей частоте. В этом методе реализован традиционный подход с использованием разбалансированного двухплечевого интерферометра. Однако, для реализации предложенного метода не нужны специализированные приборы и использование специализированных алгоритмов демодуляции фазы интерференционного сигнала. В измерительной схеме используются стандартные волоконно-оптические комплектующие и приборы (генератор сигналов специальной формы, фотоприемное устройство, радиочастотный анализатор спектра). Экспериментальная апробация предложенного метода на примере лазера RIO Orion<sup>TM</sup> показала хорошую сходимость экспериментальных результатов и спектра частотного шума приведенным производителем.

## Список литературы

1. Jones J. D. C. 30 Years of the OFS Conference: the origins and directions of our subject //23rd International Conference on Optical Fibre Sensors. – International Society for Optics and Photonics, 2014. – Т. 9157. – С. 9157C2.
2. Гармаш В. Б. и др. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении //Фотон-экспресс. – 2005. – №. 6. – С. 128-140.
3. Udd E., Spillman Jr W. B. (ed.). Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists. – John Wiley & Sons, 2011.
4. Culshaw B. 18 Future Perspectives for Fiber-Optic Sensing //Optical Fiber Sensors. – 2015. – С. 521.;
5. Cranch G. A., Nash P. J. Large-scale multiplexing of interferometric fiber-optic sensors using TDM and DWDM //Journal of lightwave technology. – 2001. – Т. 19. – №. 5. – С. 687-699.
6. Cranch G. A., Nash P. J., Kirkendall C. K. Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications //IEEE Sensors Journal. – 2003. – Т. 3. – №. 1. – С. 19-30.
7. Ren Z. et al. Efficient and Compact Inline Interferometric Fiber Sensor Array Based on Fiber Bragg Grating and Rectangular-Pulse Binary Phase Modulation //IEEE Sensors Journal. – 2018. – Т. 18. – №. 23. – С. 9556-9561.
8. Kersey A. D. et al. Multiplexed interferometric fiber sensors //7th Optical Fibre Sensors Conference. – The Institution of Radio and Electronics Engineers Australia, 1990. – С. 313.
9. Zhang Y. et al. A novel fiber Bragg grating based seismic geophone for oil/gas prospecting //Smart Structures and Materials 2005: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems. – International Society for Optics and Photonics, 2005. – Т. 5765. – С. 1112-1120.

10. Dandridge A. D., Kersey A. D. Multiplexed interferometric fiber sensor arrays // Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors. – International Society for Optics and Photonics, 1992. – Т. 1586. – С. 176-183.
11. Kersey A. D., Dandridge A., Davis M. A. Low-crosstalk code-division multiplexed interferometric array // Electronics letters. – 1992. – Т. 28. – №. 4. – С. 351-352.
12. Лиокумович Л.Б. Волоконно-оптические интерферометрические измерения. Часть 1. Волоконно-оптические интерферометры. – СПб.: изд. СПбГПУ, 2007. – 110 с.
13. Triana A., Pastor D., Varón M. Code Division Multiplexing Applied to FBG Sensing Networks: FBG Sensors Designed as Discrete Prolate Spheroidal Sequences (DPSS-FBG Sensors) // Journal of Lightwave Technology. – 2017. – Т. 35. – №. 14. – С. 2880-2886.
14. Костромитин, А.О., Лиокумович, Л. Б., Скляр Ф.В., Котов, О. И., Анализ выходной мощности в оптоволоконных интерферометрических схемах с мультиплексированными чувствительными элементами // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2020. – Т. 13. – №. 2. – С. 126-141.
15. R. Slavik, Y. Liao, E. Austin, P. Petropoulos, D. J. Richardson. Proc. SPIE, 8789 (2011) 87890R
16. А. О. Костромитин, А. В. Кудряшов, Л. Б. Лиокумович. Измерение и анализ модуляции и шумов частоты излучения одночастотных полупроводниковых лазерных диодов. Журнал прикладной спектроскопии Т. 82, № 4, 2015.
17. Лиокумович, Л. Б., Костромитин, А. О., Ушаков, Н. А., Кудряшов, А. В. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ШУМОВ ЛАЗЕРОВ // Журнал прикладной спектроскопии. – 2019. – Т. 86. – №. 6. – С. 1000-1006.
18. Kotov, O., Liokumovich, L., Medvedev, A., Nikolaev, V., Bouabid, Z. Remote fiber optic interferometer sensors. Proceedings of SPIE, Volume 3345, 1997, Pages 33-36

**Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной  
работы (диссертации)**

**Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК**

1. Костромитин А.О., Кудряшов А.В., Лиокумович Л.Б., Измерение и анализ модуляции и шумов частоты излучения одночастотных полупроводниковых лазерных диодов, Журнал прикладной спектроскопии. 2015. Т. 82. №4. С. 622-627.
2. Лиокумович, Л. Б., Костромитин, А. О., Ушаков, Н. А., Кудряшов, А. В. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ШУМОВ ЛАЗЕРОВ //Журнал прикладной спектроскопии. – 2019. – Т. 86. – №. 6. – С. 1000-1006.
3. Kostromitin, A. O., Skliarov, P. V., Liokumovich, L. B., & Ushakov, N. A. Laser Frequency Noise Measurement by Forming an Interference Signal with Subcarrier Frequency //2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). – IEEE, 2019. – С. 336-338.
4. Костромитин, А.О., Лиокумович, Л. Б., Скляров Ф.В., Котов, О. И., Анализ выходной мощности в оптоволоконных интерферометрических схемах с мультиплексированными чувствительными элементами // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2020. – Т. 13. – №. 2. – С. 126-141.

Аспирант \_\_\_\_\_ **Костромитин А.О.**