

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики

Направление подготовки стандартизация и метрология

Кафедра компьютерных измерительных систем и метрологии

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Обработка результатов измерения с целью повышения пространственного и температурного разрешения в распределенных сенсорных линиях

УДК 681.586.7:621.391.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ41	Е. Ю. Кузнецова		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. кафедрой КИСМ ИК, профессор	О. В. Стукач	Доктор техн. наук		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. менедж. ИСГТ	В. Ю. Конотопский	Канд. эконом. наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭБЖ ИНК	М. И. Пустовойтова	Канд. хим. наук		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор каф. КИСМ ИК	О. В. Стукач	Доктор техн. наук		

Томск – 2016 г.

**Планируемые результаты обучения в магистратуре по направлению
27.04.01 «Стандартизация и метрология»**

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО 3+, критериев и/или заинтересованных сторон
	<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	применять современные базовые и специальные естественнонаучные, математические и инженерные знания для решения инновационных задач метрологического обеспечения, контроля качества, технического регулирования и проверки соответствия с использованием современных технологий, и учитывать в своей деятельности экономические, экологические аспекты и вопросы энергосбережения.	Требования ФГОС 3+ (ОК-1, 8, 9, 10; ПК- 17, 23, 24, 28). Критерий 5 АИОР (п.1.1, 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	выполнять работы по метрологическому обеспечению и техническому контролю, проводить анализ состояния и динамики метрологического и нормативного обеспечения производства, производить оценку качества измерений, контроля и испытаний, проводить работы по автоматизации измерений и контроля в производстве и научных исследованиях.	Требования ФГОС 3+(ОК - 13, ПК - 3, 7, 8, 9, 13, 14). Критерий 5 АИОР (п.1.3, 1.4, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	выполнять работы в области стандартизации и сертификации: выполнять разработку и экспертизу новых технических регламентов и другой нормативной документации, разрабатывать процедуры оценки соответствия, поддерживать единое информационное пространство планирования и управления предприятием на всех этапах жизненного цикла изделий.	Требования ФГОС3+ (ПК-1, 2, 5, 6, 19, 21, 29). Критерий 5 АИОР (п. 1.3, 1.4, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	выполнять работы в области контроля и управления качеством: исследовать причины появления некачественной продукции, разрабатывать предложения по предупреждению и устранению причин брака, осуществлять приемочный и выходной контроль продукции, а также контроль производства на основе современных технических средств.	Требования ФГОС3+ (ПК-4, 12, 14, 15, 21). Критерий 5 АИОР (п. 1.3, 1.4, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	использовать базовые знания в области экономики, проектного менеджмента и практики ведения бизнеса, в том числе менеджмента рисков и изменений, для ведения инновационной инженерной деятельности; организовывать работы по защите объектов интеллектуальной собственности и коммерциализации прав на них, проводить технико-экономический анализ по проектам связанным с метрологическим обеспечением производства.	Требования ФГОС3+ (ОК-5, ПК-11, 14, 16, 17, 18, 20, 27, 30). Критерий 5 АИОР (п.2.1, 1.3, 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
	<i>Универсальные компетенции</i>	
P6	понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности, заниматься научно-педагогической деятельностью в области метрологии, технического регулирования и управления качеством	Требования ФГОС3+ (ОК-1, 3, 4, 5, ПК-32, 33, 34). Критерий 5 АИОР (п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО 3+, критериев и/или заинтересованных сторон
P7	эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, а также руководить командой, принимать исполнительские решения в условиях спектра мнений, определять порядок работ, демонстрировать ответственность за результаты работы	Требования ФГОС3+ (ОК-11, 12, ПК-20, 22, 32). Критерий 5 АИОР (п.2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P8	владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инженерной деятельности	Требования ФГОС3+ (ОК-14, ПК-26) Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	ориентироваться в вопросах безопасности и здравоохранения, юридических и исторических аспектах, а так же различных влияниях инженерных решений на социальную и окружающую среду	Требования ФГОС ВПО 3+ (ОК-7, ПК-10, 14, 20,). Критерий 5 АИОР (п.2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам инженерной деятельности, проявлять гражданскую позицию, направленную на его совершенствование.	Требования ФГОС ВПО 3+(ОК-6). Критерий 5 АИОР (п.1.6, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики
Направление подготовки стандартизация и метрология
Кафедра компьютерных измерительных систем и метрологии

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
8ГМ41	Кузнецовой Екатерине Юрьевне

Тема работы:

Обработка результатов измерения с целью повышения пространственного и температурного разрешения в распределенных сенсорных линиях

Утверждена приказом директора (дата, номер)

№ 957/с 11.02.16

Срок сдачи студентом выполненной работы:

01.06.2016

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

Наименование объекта исследования: распределенный оптоволоконный датчик измерения температуры.

Требования к объекту исследования: усовершенствовать или разработать методику (алгоритм) обработки результатов измерения с целью повышения пространственного и температурного разрешения в распределенных сенсорных линиях для мониторинга опасных техногенных объектов и снижения их аварийности.

Требования к особенностям функционирования (эксплуатации): методика должна быть универсальна для применения к любому устройству опроса распределенного оптоволоконного датчика измерения температуры.

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов (аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</p>	<p>Проведение аналитического обзора. Изучение возможных способов обработки результатов измерения сигнала, полученного с распределенного оптоволоконного датчика температуры. Выбор способа обработки результатов измерения. Выбор программного обеспечения для реализации способа обработки результатов измерения. Разработка алгоритма программы для реализации способа обработки результатов измерения. Разработка программы в среде графического программирования LabVIEW для обработки результатов измерения. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. Социальная ответственность. Выводы по результатам работы.</p>
<p>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	<p>Презентация</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>В. Ю. Конопотский</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>М. И. Пустовойтова</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>Обзор литературы, объект и методы исследования.</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	
--	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Зав. кафедрой КИСМ ИК</p>	<p>О. В. Стукач</p>	<p>Доктор техн. наук</p>		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>8ГМ41</p>	<p>Кузнецова Екатерина Юрьевна</p>		

Министерство образования и науки Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики

Направление подготовки стандартизация и метрология

Уровень образования магистратура

Кафедра компьютерных измерительных систем и метрологии

Период выполнения осенний / весенний семестр 2015/2016 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
 выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
10.11.15	Проведение аналитического обзора.	
24.01.16	Изучение возможных способов обработки результатов измерения сигнала полученного с устройства опроса распределенного оптоволоконного датчика температуры.	
28.02.16	Изучение способов кодирования оптического сигнала, выявление преимуществ данного подхода.	
20.03.16	Сравнение метода усреднение сигнала и метода кодирования.	
25.03.16	Обработка результатов измерения с помощью LabVIEW.	
03.04.16	Разработка алгоритма программы для реализации способа обработки результатов измерения.	
15.04.16	Разработка программы в среде графического программирования LabVIEW для обработки результатов измерения.	
02.05.16	Социальная ответственность.	
15.05.16	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	
23.05.16	Выводы по результатам работы.	
30.05.16	Оформление расчётно – пояснительной записки.	

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. кафедрой КИСМ ИК	О. В. Стукач	Доктор техн. наук		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
КИСМ	О. В. Стукач	Доктор техн. наук		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8ГМ41	Е. Ю. Кузнецова

Институт	Кафедра	КИСМ
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность
		Стандартизация и метрология

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов разработки системы навигации на базе акселерометра: материально-технических, энергетических, финансовых	
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив разработки системы навигации на базе акселерометра ресурсоэффективности и ресурсосбережения	
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности разработки системы навигации	

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. менедж. ИСГТ	В. Ю. Конотопский	Канд. эконом. наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ41	Е. Ю. Кузнецова		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8ГМ41	Е. Ю. Кузнецова

Институт		Кафедра	КИСМ
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	Стандартизация и метрология

ЗАДАНИЕ

<p>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</p>	<p>1. Выбор объекта раздела. Характеристика рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, оборудования);</p> <p>2. Техносферная безопасность <u>Вредные факторы:</u> источники вредных факторов на рабочем месте, нормирование их действия на работника, ссылка; технические решения и системы обеспечения требований нормативных документов</p> <p><u>Опасные факторы:</u> источники опасных факторов, нормативные требования по обеспечению безопасности работников, ссылка; организационные и технические решения и системы обеспечения требований безопасности</p> <p>3. Региональная безопасность</p> <ul style="list-style-type: none"> – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); <p>4. Правовые вопросы обеспечения охраны труда</p> <ul style="list-style-type: none"> – характерные для проектируемой рабочей зоны правовые нормы госконтроля охраны труда; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. <p>5. Пожарная безопасность (причины возгорания, категория помещения по ПБ, план эвакуации, средства первичного тушения)</p>
<p>Перечень графического материала</p>	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭБЖ ИНК	М. И. Пустовойтова	Канд. хим. наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ41	Кузнецова Екатерина Юрьевна		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 131 с., 34 рис., 15 табл., 67 источника, 1 прил.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик температуры, симплекс-коды, коды Адамара, моделирование в среде в LabVIEW, цифровая фильтрация, комбинационное рассеяние света.

Объектом исследования являются компоненты комбинационного рассеивания оптоволоконного датчика температуры.

Цель работы – повышение точностных характеристик распределенных оптоволоконных устройств измерения температуры путем фильтрации и кодирования с использованием матриц Адамара.

В процессе исследования проводился анализ существующих способов обработки результатов измерения, получаемых с оптоволоконных датчиков, был разработан алгоритм обработки данных с оптического датчика температуры, на основе симплекс-кодирования и программного обеспечения LabVIEW.

В результате исследования теоретически и экспериментально обосновано преимущество кодирования оптического сигнала, в сравнении с другими методами уменьшения шума в оптоволоконных линиях, написана программа в среде графического программирования LabVIEW, осуществляющая фильтрацию сигнала и расчёт статистических характеристик компонентов комбинационного рассеивания.

Область применения: опасные техногенные объекты с целью мониторинга и снижения их аварийности.

Экономическая эффективность/значимость работы: экономический эффект выражен через точность и надежность системы в сравнении с другими возможными методами обработки сигнала, получаемого с устройства опроса сенсорной оптической системы.

Определения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

оптоволокно: нить из оптически прозрачного материала, используемая для переноса света внутри себя посредством полного внутреннего отражения.

волоконно-оптический датчик: небольшое по размерам устройство, в котором оптическое волокно используется как в качестве линии передачи данных, так и в качестве чувствительного элемента, способного детектировать изменения различных величин.

Рамановское рассеяние (комбинационное рассеяния): неупругое рассеяние оптического излучения на молекулах вещества, сопровождающееся заметным изменением частоты излучения.

стоксовы компоненты Рамановского рассеяния: это компоненты с длиной волны большей, чем у используемого лазерного источника, при которых испускаются фотоны.

антистоксовы компоненты Рамановского рассеяния: это компоненты с меньшей длиной волны, по сравнению с Рэлеевским рассеянием, при которых фотоны поглощаются.

волоконная брэгговская решётка: распределённый брэгговский отражатель (разновидность дифракционной решетки), сформированный в светонесущей сердцевине оптического волокна.

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы нормативные ссылки на следующие документы:

ГОСТ Р 12.1.003-83 Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности

ГОСТ 12.1.019-79 Система стандартов безопасности труда.
Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты

ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда. Рабочее
место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования

Оглавление

	С.
Введение	14
1 Обзор литературы	16
2 Объект и методы исследования	20
2.1 Конструкция оптического волокна	20
2.2 Типы оптических волокон	21
2.3 Принцип работы оптического датчика	22
2.4 Типы оптоволоконные датчиков	24
2.4.1 Точечные оптоволоконные датчики	24
2.4.2 Распределенные оптоволоконные датчики	26
2.5 Волоконные брэгговские решетки	31
2.6 Датчик ВБР	33
2.7 Преимущества волоконно-оптических датчиков	36
3 Расчеты и аналитика	38
3.1 Анализ методов обработки оптического сигнала	38
3.1.1 Проблемы дискретизации при оптическом измерении	40
3.1.2 Метод оптической временной рефлектометрии	44
3.1.3 Многократное усреднение оптического сигнала	47
3.1.4 Кодирование оптических импульсов	49
3.1.5 Сравнение методов симплекс-кодирования и усреднения сигнала	54
3.2 Программная обработка сигнала	56
3.2.1 Цифровая обработка и статистическая обработка данных до кодирования	59
3.2.2 Цифровая обработка и статистическая обработка данных после кодирования	63
3.3 Экспериментальное подтверждение зависимости температурного и пространственного разрешения от уровня шума	67
4 Финансовый менеджмент, ресурс эффективность и ресурсосбережение	71

4.1	Определение себестоимости методики обработки результатов измерения в распределенных сенсорных линиях	71
4.1.1	Расчет материальных затрат	72
4.1.2	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	72
4.1.3	Затраты по дополнительной заработной плате	78
4.1.4	Отчисления во внебюджетные фонды	78
4.1.5	Расчет затрат на электроэнергию	79
4.1.6	Расчет амортизационных расходов	80
4.1.7	Накладные расходы	80
4.1.8	Полная смета затрат на выполнение разработки	81
4.2	Оценка экономического эффекта от внедрения разработки	82
5	Социальная ответственность	84
5.1	Техногенная безопасность	84
5.2	Региональная безопасность	91
5.3	Организационные мероприятия обеспечения безопасности	92
5.4	Особенности законодательного регулирования проектных решений	94
5.5	Пожарная безопасность	97
5.6	Влияние применения оптоволоконных сенсорных систем на экологию и охрану труда	100
	Заключение	102
	Список публикаций	104
	Список использованных источников	105
	Приложение А	112
	CD-диск	

Введение

Целый ряд современных методик мониторинга состояния различных объектов и материалов использует в качестве основного чувствительного элемента волоконный световод. Несмотря на относительно высокую стоимость измерительного оборудования, данные методы измерения получают все большее распространение благодаря ряду преимуществ перед электромеханическими сенсорами. Поэтому волоконно-оптические сенсоры, находят коммерческое применение. Но масштабы практического применения волоконных сенсорных систем ограничены достаточно высокой ценой оптоэлектронного устройства опроса волоконных датчиков. С этой точки зрения создание новых эффективных и недорогих устройств является актуальной и важной задачей.

При сравнении различных типов датчиков можно сделать вывод о том, что для отраслей, связанных с горючими и взрывоопасными материалами, например, угледобычи, нефтедобычи и газодобычи, для использования в системах пожарной сигнализации различных сооружений распределенные волоконные сенсоры незаменимы. Подобные датчики позволяют измерять различные параметры несколько параметров (температуру, давление, деформация) одновременно, используя при этом один чувствительный световод и один измерительный канал.

Целью работы заключается повышение точностных характеристик оптоволоконного устройства измерения температуры с помощью кодирования сигнала с применением матриц Адамара и фильтрации сигнала.

Объектом исследования в данной работе является распределенный оптоволоконный датчик измерения температуры.

В данной работе была применена компьютерная обработка данных в программной среде National Instruments LabVIEW для повышения точности измерения температуры путем фильтрации сигнала, и теоретическое

обоснование преимущества метода кодирования оптического сигнала с использованием матриц Адамара.

Предложенный способ обработки компонентов комбинационного рассеяния, характеризующим измеряемую оптоволоконным датчиком температуру, необходим для усовершенствования существующих методов и приборов контроля температуры в опасных техногенных объектах, повышения их эффективности и снижения риска возникновения аварийных ситуаций.

1 Обзор литературы

Оптические системы появились очень давно, около двух столетий назад. Первой подобной системой являлся «оптический телеграф», который был изобретён французским инженером Клодом Чаппом в 1790-е годы. Его система состояла из серии семафоров, установленных на башнях, расположенных от Парижа до Лилля, длинна цепочки составляла 230 км. Для того чтобы передать одно сообщение требовалось около 15 минут. Телеграф управлялся вручную, но к середине 19-го века был заменен на электрический.

Александр Грэхем Белл запатентовал оптическую телефонную систему, которую назвал фотофон, в 1880 году, но его раннее изобретение - телефон, оказалось гораздо более практичным. В последующие десятилетия, свет был использован для сообщения между судами. Моряки для того чтобы передать информацию, используя, коды Морзе и передавали их применяя сигнальные лампы.

Британский физик Джон Тиндалл в 1870 году на собрании Королевского общества продемонстрировал следующий опыт: вода падала из одного желоба по параболической траектории в другой. На дне первого желоба имелось прозрачное окно, через которое свет попадал в струю воды. При направлении света по касательной к струе, наблюдалось зигзагообразное распространение света внутри параболической части струи. Подобное распространение света происходит и в оптическом волокне [1].

В начале 19 века, ученые пришли к выводу о том, что изогнутые кварцевые стержни могут нести свет. В связи с этим открытием многие врачи к 1940 году стали использовали подсветку, основанную на кварцевых стержнях для освещения труднодоступных мест.

В 1920 году Джон Логи Бэрд в Англии и Кларенс В. Ханселл в Соединенных Штатах запатентовали идею использования массивов полых труб

или прозрачных стержней для передачи изображений для телевидения или факсимильных систем [2].

Все разрабатываемые волокна не имели какой-либо облицовки, что вызывало полное внутреннее отражение происходящее на границе раздела стекло-воздух. Абрахам ван Хееел первый кто покрыл волокна оболочкой с более низким показателем преломления. Подобная оболочка защищала поверхность волокна от отражения, от загрязнения и помогала значительно снизить перекрестные помехи между волокнами. На рисунке 1 представлено изображение оптического волокна [3].

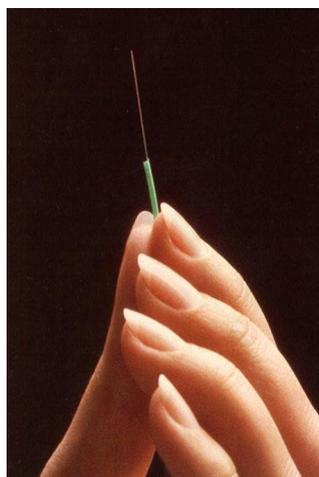


Рисунок 1 - Оптическое волокно из стекла

В 1960-х, с изобретением лазера, оптические системы приобрели большой интерес для передачи данных. Изобретение лазера мотивировало исследователей изучать потенциальные возможности волоконной оптики для передачи данных, создания датчиков, и других приложений. Лазерные системы могут передавать большее количество данных, чем системы, основанные на микроволновых излучениях или другие электрические системы. Исследователи также провели эксперименты по передаче лазерного луча через различные типы волноводов. Стекланные волокна стали предпочтительным средством для передачи света. Раньше волокна имели потери около 1000 дБ/км, что делало их непрактичными для использования в связи [4]. В 1969 году несколько ученых к выводу, что примеси в волоконном материале являются причиной потери

сигнала при передаче. Если удалить эти примеси, то станет возможным создание оптического волокна с малыми потерями В 1970 году Corning Glass Works создали многомодовое волокно с потерями до 20 дБ/км, а в 1972 году эта же компания создала многомодовое оптическое волокно с потерями до 4 дБ/км.

Последние достижения в волоконно-оптической области существенно изменили телекоммуникационную промышленность. Способность передавать гигабиты информации на скорости света повысила интерес к оптическим волокнам со стороны исследователей. Одновременное усовершенствование и сокращение затрат на оптоэлектронные компоненты привели к возникновению аналогичных новых видов продукции. Последняя революция в данной области заключалась в совмещении продуктов волоконно-оптической телекоммуникации с оптико-электронными приборами для создания волоконно-оптических датчиков [5].

Начало развития волоконно-оптических датчиков трудно зафиксировать. В 1973 г. начали появляться первые публикации об оптическом волокне, использовавшемся не только в линиях связи, а еще и в проектах и экспериментах с измерительной техникой, а во второй половине 1970-х годов их количество стало стремительно возрастать. С 1977 по 1979 г. в научном мире стали появляться множество статей обзорного характера и интерес к датчикам возрастал. Подобные датчики называли разные исследователи по-своему, например, «измеритель на основе оптических волокон», «оптический датчик на волокне». После первой международной конференции, состоявшейся в Лондоне (International conference on optical fiber sensor) в 1981 г. по волоконно-оптическим датчикам термин «волоконно-оптический датчик» окончательно утвердили [6].

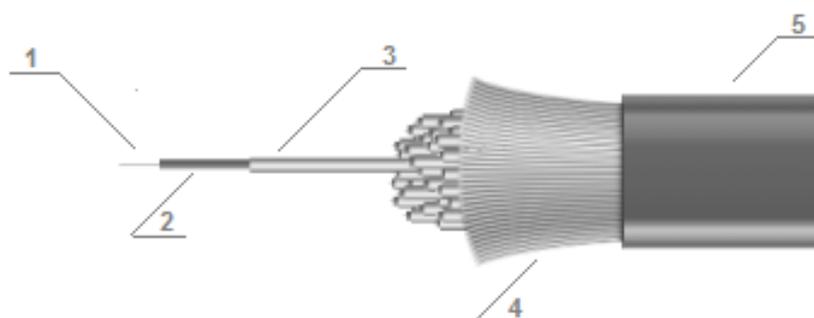
Оптоволоконные технологии измерения физических параметров являются одной из наиболее быстроразвивающихся областей прикладной оптики. Оптоволоконные датчики характеризуются малой массой и размером, отсутствием электричества в измерительном тракте, нечувствительностью к

электромагнитным помехам и воздействию агрессивных сред и достаточно просто интегрируются в распределённые измерительные системы. Благодаря этим уникальным свойствам они широко используются при решении различных научных и практических задач, в которых необходимо измерять температуру, деформации и другие параметры протяжённых объектов [7].

2 Объект и методы исследования

2.1 Конструкция оптического волокна

Оптическое волокно состоит из трех частей: сердцевина, оболочка и покрытие. Конструкция кабеля показана на рисунке 2. Сердцевина представляет собой цилиндрический стержень, изготовленный из диэлектрического материала, как правило, это стекло. Свет распространяется преимущественно по сердцевине волокна [4].



1-сердечник; 2- оболочка сердечника; 3-буферная оболочка; 4-уплотняющая оболочка; 5- наружная оболочка.

Рисунок 2 – Конструкция оптоволоконного кабеля

Слой оболочки сердечника выполнен из диэлектрического материала с показателем преломления меньше, чем у основного материала. Этот слой как правило, сделан из стекла или пластика и выполняет такие функции, как уменьшение потерь света, проходящего через сердечник, защита волокна от поверхностных загрязнений и механических повреждений [4].

Буферная оболочка представляет собой слой материала, используемого для защиты оптического волокна от физических повреждений. Материал, используемый для буферной оболочки, является одним из видов пластика. Данная оболочка является эластичной и предотвращает от царапин [4].

Основной принцип передачи сигнала по оптоволокну основан на явлении полного внутреннего отражения при переходе света из оптически

более плотной среды в оптически менее плотную. Угол, под которым происходит полное внутреннее отражение, называется критическим углом падения. Если угол падения, больше, чем критический угол, свет полностью отражается обратно в стеклянную среду (рисунок 3). Критический угол падения определяется с помощью Закон Снелла [4].

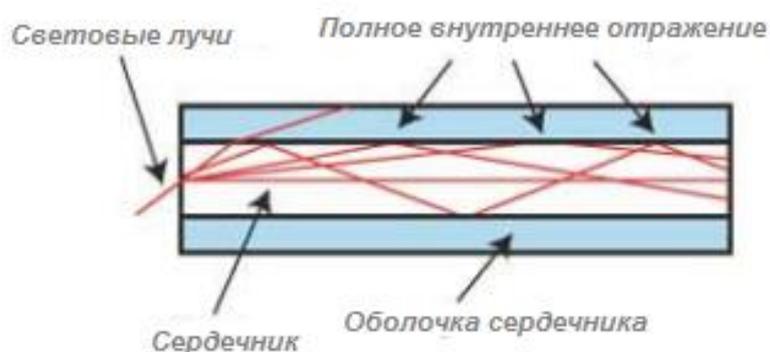
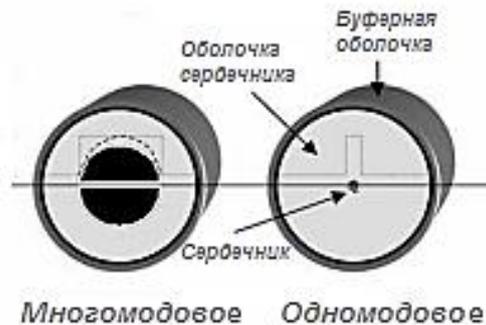


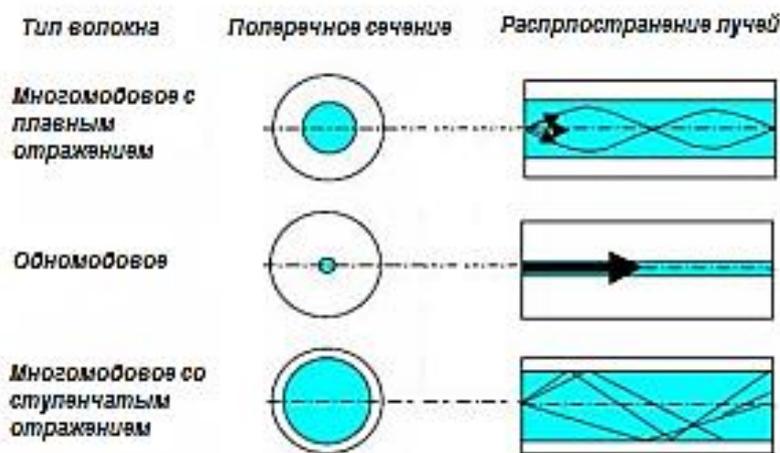
Рисунок 3 - Принцип передачи сигнала по оптоволокну

2.2 Типы оптических волокон

Оптические волокна можно разделить на две группы: одномодовые и многомодовые. Одномодовое волокно позволяет пропустить только прямолинейное световое излучение по центральной моде. В многомодовом свет может распространяться по нескольким модам, чем больше количество мод, тем выше пропускная способность кабеля. Различают два типа многомодовых кабелей: со ступенчатым и с плавным отражением сигнала. Кабель с плавным отражением сигнала имеет многослойную оболочку с различными коэффициентами отражения. Его характеристики значительно лучше по сравнению с характеристиками кабеля со ступенчатым отражением сигнала. [8]. Различные типы волокон показаны на рисунке 4 (а, б).



а) поперечное сечение многомодового и одномодового волокна



б) распределение лучей в зависимости от типа волокна

Рисунок 4 - Типы оптических волокон

2.3 Принцип работы оптического датчика

Общая структура волоконно-оптического датчика представлена на рисунке 5. Она состоит из оптического источника (лазер, лазерный диод и т.д.), оптического волокна, чувствительного элемента, который преобразовывает измеряемую величину в оптический сигнал, оптического детектора и прибора для обработки данных (осциллограф, оптический анализатор спектра и т.д.).



Рисунок 5 - Общая структура волоконно-оптического датчика

Волоконно-оптические датчики можно классифицировать по трем признакам: местоположению, принципу действия, сфере применения. Датчики, относящиеся к категории «по местоположению» в свою очередь еще делятся на внешние или внутренние (рисунок 6).

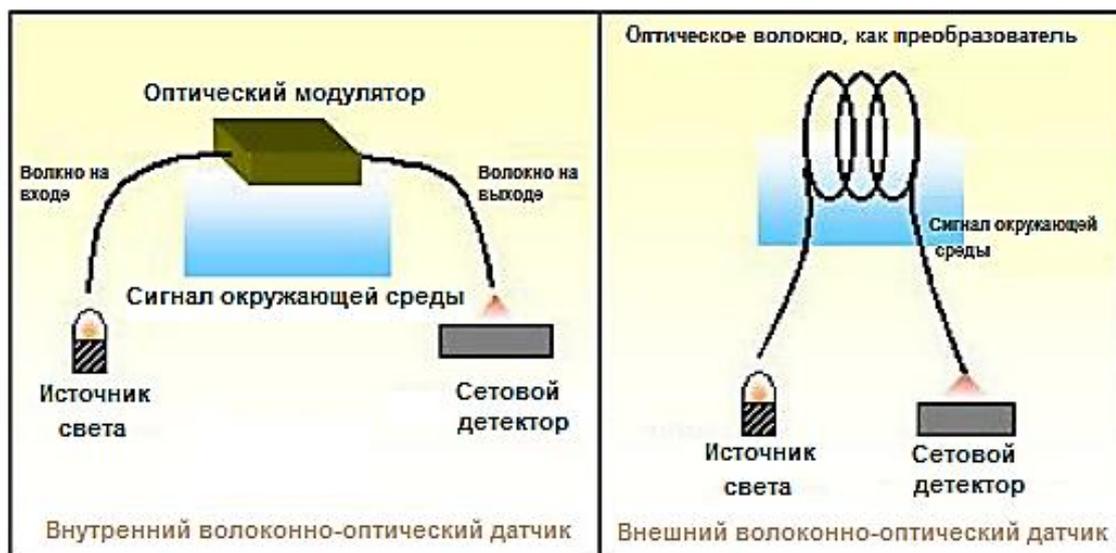


Рисунок 6 - Внешние и внутренний оптоволоконные датчики

Во внешних датчиках к волоконной оптической системе подсоединяется некоторое другое устройство, которое преобразовывает воздействие окружающей среды в изменения свойств светового пучка в волоконной оптической системе [9]. Во внутренних датчиках измеряется воздействие окружающей среды посредством изменений свойств оптического излучения,

например, таких как: интенсивность, фаза, частота и т.д. Все эти параметры могут подвергаться изменениям из-за внешних возмущений. Таким образом, путем обнаружения изменений этих параметров можно измерить внешнее возмущение.

Основываясь на вышесказанном, оптоволоконные датчики можно классифицировать следующим образом:

- физические датчики: используется для измерения физических свойств (температура, напряжение, и т.д.);
- химические датчики: используется для газового анализа, измерения рН, спектроскопических исследования, и т.д.;
- биомедицинские датчики: применяется в биомедицине для измерения кровотока, содержания глюкозы и т.д.

На сегодняшний день, волоконно-оптические датчики используются для контроля широкого спектра параметров окружающей среды, таких как: положение, вибрация, деформация, температура, влажность, вязкость, различные химические вещества, давление, ток, электрическое поле и некоторые другие факторы окружающей среды [10-15].

2.4 Типы оптоволоконных датчиков

Все волоконно-оптические датчики по локализации измеряемого параметра можно разделить на три типа: точечные, распределенные и квази-распределенные. Ниже приведено подробное описание каждого из типов оптоволоконных датчиков и области их применения.

2.4.1 Точечные оптоволоконные датчики

Точечные волоконно-оптические датчики имеют малый по размеру чувствительный элемент. Данный тип датчиков позволяет производить

контроль и измерения параметров в определенной точке объекта, что делает их схожими с не волоконными датчиками. Эти датчики могут быть использованы в качестве тензодатчиков, локальных термометров, датчиков давления, акселерометров и т.п. На рисунке 7 приведено схематичное изображение точечного оптоволоконного датчика. Как правило, такие датчики обладают малым размером и высокой точностью измерения.

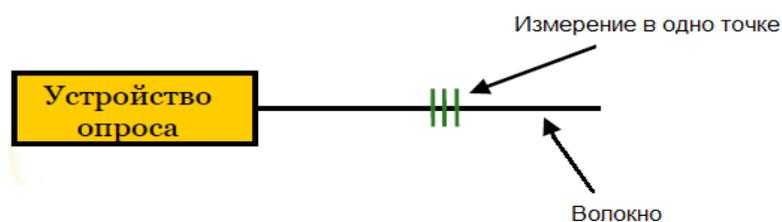
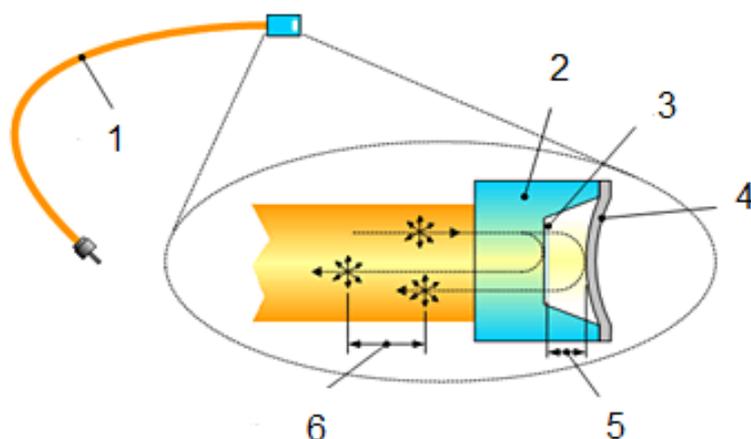


Рисунок 7 – Схематичное изображение точечного оптоволоконного датчика

В точечных оптоволоконных датчиках зачастую используется волоконная брэгговская решетка, которая содержит большое количество точек отражения, расположенных внутри волокна с определенным интервалом. (п.2.6).

Другим типом точечных волоконно-оптических сенсоров являются датчики на основе микрооптоэлектромеханического элемента (МОЭМС). Основу их конструкции составляет МОЭМС-пластина (рисунок 8). В МОЭМС-датчике оптическими методами с высокой точностью измеряется величина зазора между пластиной и торцом волоконного световода, подведенным к ней. Зазор при этом функционирует аналогично интерферометру Фабри-Перо. Когда пластина изгибается (например, под действием внешнего давления), изменяется и картина интерференции двух лучей – отраженного от торца световода и от МОЭМС-пластины.



1 – оптоволокно; 2 – основание; 3 - диэлектрическое зеркало; 4 – диафрагма; 5 – длина резонатора интерферометра Фабри-Перо; 6 - разность длин пути интерферометра.

Рисунок 8 - Схема устройства волоконно-оптического датчика на основе МОЭМС-чипа

Данный тип датчиков не подлежит спектральному мультиплексированию, т.е. опросу через один волоконный световод, как сенсорные элементы на основе ВБР. Тем не менее, они находят свое применение в некоторых отраслях современной промышленности, например, в медицинских исследованиях [16].

2.4.2 Распределенные оптоволоконные датчики

Распределенные оптоволоконные датчики (рисунок 9) позволяют осуществлять непрерывный контроль параметров (температура, давление) по всей длине (объему) контролируемого объекта в любой его точке, где установлен сенсорный световод. Основной принцип действия подобных сенсорных систем основан на нелинейных эффектах и на анализе изменения параметров по длине световода. Но при распределении измеряемого параметра по длине точность определения локализации возмущения (несколько метров по длине) и точность измерения контролируемого параметра относительно невысока, что является недостатком подобных датчиков.

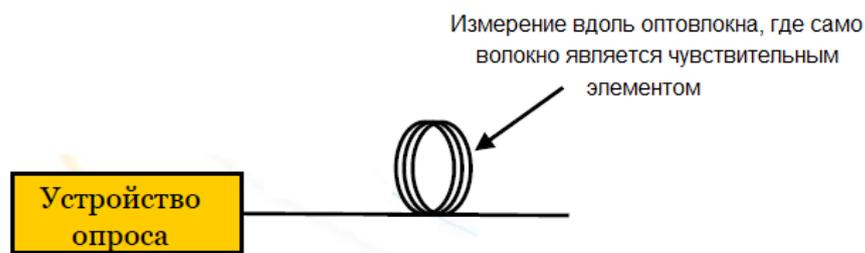


Рисунок 9 - Схематическое изображение распределенного оптоволоконного датчика

Основные принципы измерения распределенных волоконно-оптических датчиков основаны на обнаружении обратного рассеяния света, например, на основе Рэлеевского [17], Рамановского [18], и Бриллюэновского [19] рассеяний.

2.4.2.1 Рамановское рассеяние

Оптические волокна изготовлены из легированного кварцевого стекла. Кварцевое стекло представляет собой разновидность двуокиси кремния (SiO_2) с аморфной твердотельной структурой. Температурные воздействия инициируют вибрации в молекулярной решетке. Когда свет попадает на термически возбужденные молекулы, происходит взаимодействие между световыми частицами (фотонами) и электронами. Таким образом, в оптическом волокне происходит световое рассеяние, так же известное, как рамановское рассеяние. У рассеянного света есть спектральное изменение, эквивалентное частоте резонансных колебаний решетки [18], [19].

Обратное световое рассеяние состоит из нескольких спектральных составляющих:

- рэлеевское рассеяние, с длиной волны аналогичной, используемой в лазерном источнике;
- стоксовы компоненты Рамановского рассеяния с длиной волны большей, чем у используемого лазерного источника, при которых испускаются фотоны;

- антистоксовы компоненты Рамановского рассеяния с меньшей длиной волны, по сравнению с Рэлеевским рассеянием, при которых фотоны поглощаются.

Интенсивность рассеяния так называемого антистоксова диапазона зависит от температуры, в то время как, стоксов диапазон от температуры практически не зависит. Локальная температура оптического волокна выводится из отношения антистоксовой и стоксовой интенсивностей света. Это показано на рисунке 10, подход был разработан в 1980-х годах в Университете Саутгемптона, Великобритания [18]. На рисунке 10 изображено волоконно – оптическое измерение температуры на основе Рамановского рассеяния, полученное отношением антистоксовой и стоксовой интенсивностей света.

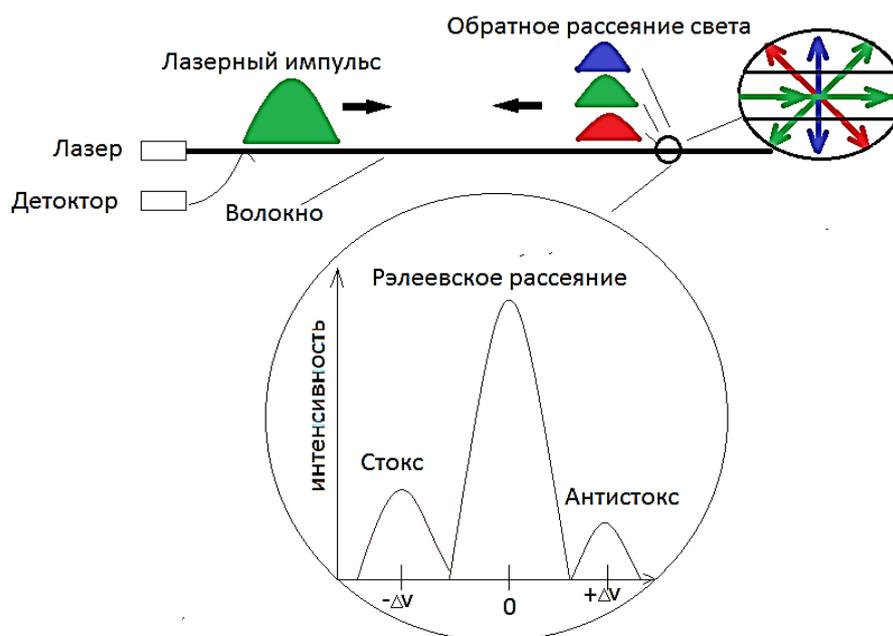


Рисунок 10 - Волоконно – оптическое измерение температуры на основе Рамановского рассеяния, полученное отношением антистоксовой и стоксовой интенсивностей света

Процесс комбинационного рассеяния порождает составляющие в широкой полосе длин волн вокруг длины возбуждения (накачки), включая стоксово (фотоны с энергией ниже λ_s) и антистоксово (фотоны с энергией выше λ_s) излучение. Максимумы интенсивности рамановского спектра, как

показано на рисунке 10, приходится на волновые числа, сдвинутые на 400 см^{-1} , при которых отношение интенсивности стоксова и антистоксова излучения в обратном рассеянии определяется формулой:

$$\frac{I_s(T)}{I_{as}(T)} = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_{as}} \right)^4 \exp\left(-\frac{h\nu}{k_B T} \right), \quad (1)$$

где T – температура;

I_{as} и I_s – относительные интенсивности сигналов антистокса и стокса;

λ_s и λ_{as} – длины волн стоксовой и антистоксовой линий, [нм];

k_B – постоянная Больцмана, [Дж/К];

h – постоянная Планка, [Дж·с];

ν – оптическая частота возбуждающего излучения, [Гц];

2.4.2.2 Бриллюэновское рассеяние

Бриллюэновские линии имеют спектральный сдвиг, вызванный акустическими колебаниями кристаллической решетки волокна и несущий в себе информацию о механических напряжениях и температурах, воздействующих на волокно. Бриллюэновское частотное смещение γ_B определяется частотой акустической волны ω_A по формуле:

$$\gamma_B = \frac{\omega_A}{2\pi} = \frac{2n\gamma_A}{\lambda_0}, \quad (2)$$

где n – показатель преломления;

γ_A – скорость звука;

λ_0 – длина волны в вакууме.

Методика Бриллюэна может быть использованы для измерения как температуры, так и для измерения деформации, но не одновременно.

Типичными случаями применения распределенных волоконно-оптических датчиков являются сферы, связанные с безопасностью. Например,

термический контроль силовых кабелей и воздушных линий передач для оптимизации производственных процессов; системы пожарного оповещения в автомобильных, железнодорожных или сервисных туннелях; повышение эффективности нефтяных и газовых скважин; обеспечение безопасного рабочего состояния промышленных индукционных плавильных печей; обнаружение утечек на плотинах и запрудах; контроль температуры при химических процессах; обнаружение утечек в трубопроводах; контроль герметичности контейнеров с сжиженным природным газом на судах в разгрузочных терминалах [21].

Но контроль параметров с помощью данных датчиков должен быть обоснован, т.к. они имеют высокую стоимость по сравнению с другими оптоволоконными датчиками.

2.4.2.3 Квази-распределённые оптоволоконные датчики

Квази-распределенный датчик состоит из массивов точечных чувствительных элементов (рисунок 11), обычно этими элементами являются внутриволоконные решетки, объединенные общим световодом. Каждая решетка имеет уникальные характеристики, позволяющие проанализировать свое состояние независимо от других элементов.

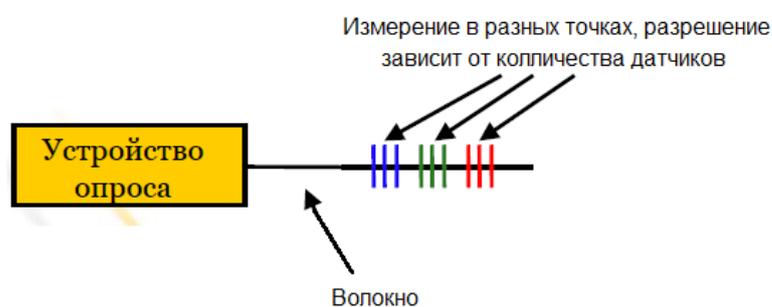


Рисунок 11 - Схематичное изображение квази-распределенного оптоволоконного датчика

Работа квази-распределенной оптической системы датчика осуществляется путем опроса серии точки расположенных вдоль одного оптического волокна. По сравнению с распределенными сенсорами, квази-распределенный датчик имеет более высокое пространственное разрешение. Преимущество квази-распределенного датчика заключается в том, что он может генерировать более сильный оптический сигнал и обеспечивать гораздо более лучшее отношение сигнал-шум, таким образом, датчик обеспечивает более высокую точность измерения и высокое разрешение, нежели распределенные датчики. Точность таких систем определяется точностью отдельных датчиков, а массив может объединять до 100 и более элементов. Существует два типа решеток для квази-распределенной системы, играющих роль чувствительного элемента: решетка Брэгга (п.2.6), интерферометр Фабри–Перо [22-27].

С помощью сенсорных массивов можно проводить мониторинг таких сложных объектов как: мосты, инженерные сооружения, корпуса кораблей и летательных аппаратов, тоннели, нефтяные скважины и т.п. Также возможен анализ градиента распределения температуры, нагрузок, давления и контроль до 100 и более точечных объектов. Причем для этого достаточно использовать только один волоконный световод и анализатор. Квази-распределенные системы обладают малым весом и размером, по сравнению с электрическими аналогами, подобное преимущество важно для космонавтики и авиации.

2.5 Волоконные брэгговские решетки

В 1978 году К.О. Хилл и его коллеги обнаружили, светочувствительность кварцевого волокна, легированного германием [28], [29]. Если кварцевые волокна легированное германием, подвергать освещению ультрафиолетовыми лучами, то показатель преломления увеличиваться по мере

возрастания времени облучения и мощности. Волоконные брэгговские решетки изготовлены на основе этого эффекта.

Брэгговская решетка (рисунок 12) представляет собой распределенный брэгговский отражатель (разновидность дифракционной решетки) встроенный в сердцевину оптического волокна.

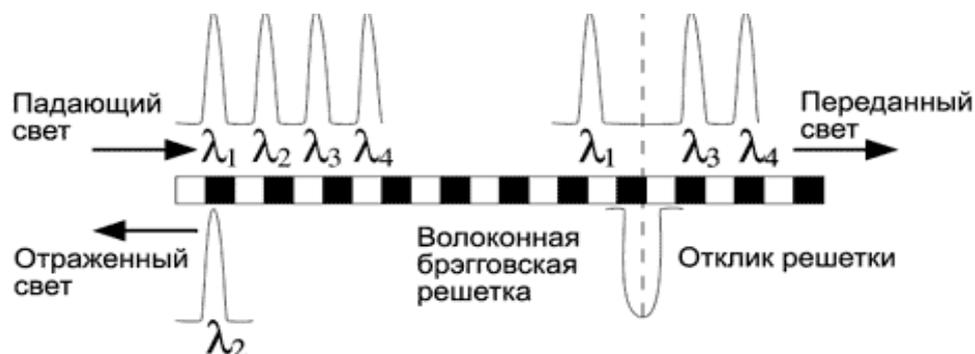


Рисунок 12 – Волоконная брэгговская решетка

Явление дифракции возникает при периодическом изменении показателя преломления материала из которого состоит сердцевина волокна. На рисунке 13 представлено схематичное изображение оптоволокна со встроенной брэгговской решёткой.

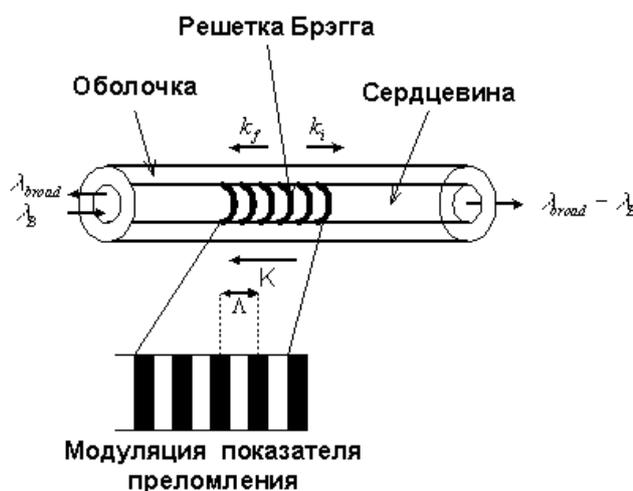


Рисунок 13 – оптоволокно со встроенной брэгговской решеткой

Когда лазерный луч проходит через волокно каждая ячейка брэгговской решетки отражает малую часть излучения на определенной длине

волны, пропускаемого через оптоволокно, именно этот пик отраженного излучения регистрируется измерительной аппаратурой. В результате воздействия многих физических параметров изменяется интервал между узлами решетки Брэгга, а также коэффициент преломления волокна. Соответственно, изменяется длина волны излучения, отраженного от решетки. По изменению длины волны можно определить точные характеристики изменений. Также стоит заметить, что при пропускании света, через сердцевину оптического волокна, свет рассеивается каждой плоскостью решетки. Явление дифракции на решетке может наблюдаться только, когда период решетки d сравним с длиной волны λ падающего излучения. Для длины волны, в 2 раза большей, чем период решетки, отраженные лучи складываются в фазе. В результате получается отраженный световой сигнал с узкой спектральной полосой. Отражаемая решеткой длина волны называется брэгговской. Брэгговская длина волны зависит от температуры и натяжения волокна [30].

Это возможно только в том случае, когда выполняется условия Брэгга:

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff}\Lambda, \quad (3)$$

где λ - длина волны отражения ВБР;

n - эффективный показатель преломления сердцевины волокна для центральной длины волны;

Λ - период решетки.

2.6 Датчик ВБР

Датчик ВБР – это оптоволоконные датчики основанные на ВБР, которые содержат большое количество точек отражения, расположенных внутри волокна с определенным интервалом. В оптоволоконных датчиках на основе Брэгговских решёток, (рисунок 14) измеряемая величина преобразуется в смещение брэгговской длины волны. Система регистрации преобразует

смещение длины волны, отражённой брэгговской решёткой, в электрический сигнал. Поскольку период решетки и эффективный показатель преломления могут быть изменены с помощью внешних параметров, таких как температура, давление, деформации и т.д., то их же можно использовать в качестве чувствительных элементов для измерения этих параметров путем определения изменения брэгговской длины волны. Таким образом, при нагружении оптоволокна (температура, давление и т.д.) показатель преломления и расстояние между ячейками решетки изменяются и от нее отражаются волны другой длины. По изменению отраженной длины волны определяется величина нагружения.

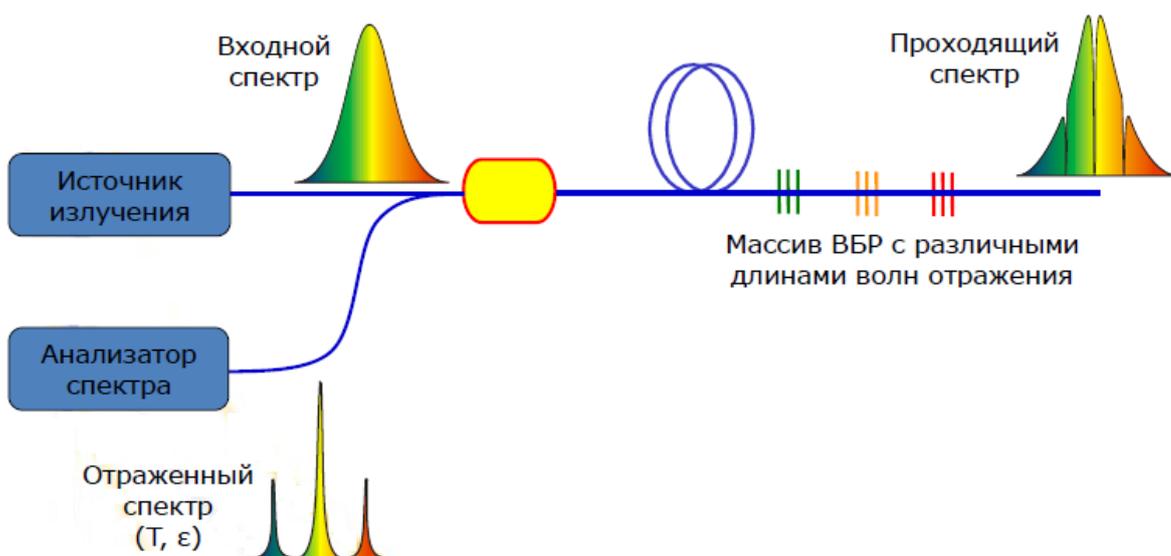


Рисунок 14 – Структура ВБР-датчика

Опрос элемента датчика ВБР основан на детектировании спектрального положения пика отражения решетки на фоне широкого спектра источника излучения. Несколько методов используются для измерения длины волны оптического сигнала, отраженного от брэгговской решетки, например, например метод с использованием оптического анализатора спектра или спектрометра, для получения оптического спектра сигнала ВБР [31-34], метод в котором определяется зависимость длины волн от оптической интенсивности

с использованием широкополосных фильтров [35], [36], также метод в котором происходит отслеживание волны с использованием перестраиваемого полосового фильтра [37-39], и метод основанный на интерферометрическом детектировании [40-42].

ВБР-датчики могут применяться для решения различных технических проблем. Так, для увеличения эффективности нефтедобычи требуется измерение распределения температуры по глубине скважины, которое может быть проведено с помощью оптоволоконных датчиков. Другой пример — необходимость мониторинга температуры роликов шахтных конвейеров или элементов электрических машин для повышения уровня безопасности. Все эти задачи не могут быть решены с помощью традиционных электрических датчиков по ряду причин: агрессивная среда, высокие интенсивности электромагнитного поля или запрет на использование электричества на некоторых объектах. Одной из потенциальных сфер применения ВБР-датчиков является мониторинг строительных объектов — измерение деформации и температуры мостов, дамб, высотных и уникальных зданий и их элементов. В то время как задачи нефтегазовой отрасли не требуют высокого пространственного разрешения, оно крайне важно для контроля элементов генераторов, конвейеров и зданий. При использовании ВБР-датчиков пространственное разрешение определяется длиной решётки и может составлять менее 1 см. При этом возможность простого мультиплексирования — размещения множества датчиков в одном волокне — позволяет производить с помощью ВБР распределённые измерения.

Одним из наиболее важных параметров ВБР-датчиков является их прочность. Контакт с агрессивными средами, а также деформации, возникающие из-за высокого термального расширения объекта, или другие эффекты могут повредить волокно. Как показал опыт оснащения промышленного турбогенератора, ВБР-датчики при правильном монтаже могут выдерживать достаточно жёсткие условия [43]. Решётки были закреплены на

медном стержне обмотки статора. Затем стержень покрывался несколькими слоями изоляции и пропитывался в эпоксидном компаунде при температуре 65°C и давлении 10 атм. После пропитки для затвердевания компаунда статор запекался 16 ч при температуре 165 °С. Во время затвердевания произошёл сдвиг калибровочных кривых датчиков, обусловленный сжатием решёток, однако практически все датчики остались невредимыми и исправно работали после перекалибровки. Это позволило впервые измерить распределение температуры стержней статора на работающем турбогенераторе.

Волоконные брэгговские решетки, в течение последних нескольких лет, широко используются в телекоммуникации для создания оптических частотных мультиплексоров. Кроме того, брэгговские решетки используются для измерения деформации в композиционных материалах, для мониторинга гражданских зданий и сооружений: дорог, мостов, зданий, плотин и т.д., смарт-производства и неразрушающего контроля, дистанционного мониторинга нефтяных скважин и силовых кабелей, трубопроводов и космических станций, контроля корпуса самолета и его крыльев, корпусов судов, спортивного оборудования и т.п.

2.7 Преимущества волоконно-оптических датчиков

Как уже было сказано выше волоконно-оптические датчики прекрасно подходят для мониторинга изменений в окружающей среде, и они имеют следующие преимуществ перед обычными электронными датчиками:

- состоят из электрически изолирующих материалов, что делает возможным их использование, например, в условиях высокого напряжения;
- могут быть безопасно использованы во взрывоопасных средах, потому что нет риска возникновения электрических искр, даже в случае дефектов;
- обладают устойчивостью к электромагнитным и радио частотным помехам, даже при ударах молнии;

- материалы из которых они состоят химически пассивны, то есть, не загрязняют окружающую среду и не подвержены коррозии;
- имеют очень широкий диапазон рабочих температур (намного шире, чем это возможно для многих электронных устройств);
- имеют возможность мультиплексирования: несколько датчиков объединяются в одну линию волокна и могут быть опрошены с помощью одного оптического источника;
- имеют малые массогабаритные параметры.

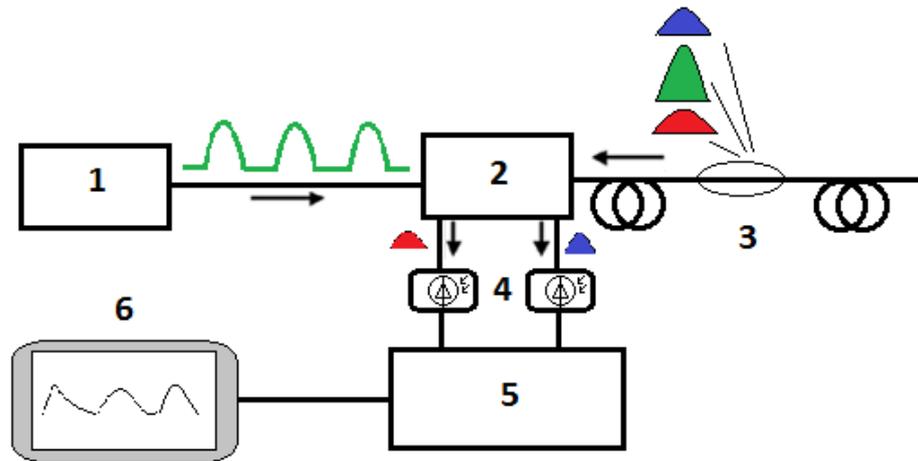
3 Расчеты и аналитика

3.1 Анализ методов обработки оптического сигнала

При распределенном волоконно-оптическом методе измерения кабель является датчиком, представляющим собой непрерывный распределенный чувствительный элемент на всем своем протяжении. Для определения места изменения температуры в оптоволоконном кабеле применяется полупроводниковый лазер и метод основывается на эффекте Рамана (комбинационное рассеяние).

Как было сказано выше, информация о температуре содержится в основном в антистоксовой компоненте, однако ее интенсивность настолько слабая, что эту линию рассеяния едва видно. Для достижения приемлемых характеристик датчика, требуется мощный импульсный источник опроса, высокочувствительная система регистрации и сложные методы обработки сигнала.

Ниже приведена упрощенная схема температурного датчика на основе комбинационного рассеяния. Лазерные импульсы с частотой несколько кГц заводятся в оптоволоконную линию длиной, состоящую из одномодового или многомодового волокна. В каждой точке оптоволоконного кабеля происходит комбинационное рассеяние света и, регистрируя время прибытия обратно-рассеянного излучения, можно определить место, где конкретно произошло рассеяние. Комбинационного рассеяния в обратном направлении, проходя через спектральный фильтр, разделяется на стоксовую и антистоксовую компоненты и перенаправляется на два высокочувствительных фотодиода, данные с которых поступают на АЦП и далее на компьютер, где эти сигналы обрабатываются и вычисляется температура.



1 - импульсный лазер, 2 - система фильтрации оптического сигнала, 3 - чувствительное волокно, 4 - фотодиоды, регистрирующие соответствующие компоненты рассеяния, 5-АЦП, 6 - блок обработки и индикации.

Рисунок 15 - Схема регистрации комбинационного рассеяния

Процесс регистрации оптического излучения предполагает преобразование оптической энергии в виде фотонов в электрический сигнал в виде электронов, который может быть обработан обычными электронными способами обработки сигнала.

Проблема шума в оптических приемниках связана с разрешением, точностью и динамическим диапазоном регистрируемого сигнала. Шум – это составляющая сигнала, которая меняется непредсказуемым образом и, следовательно, не пригоден для передачи информации. В твердотельных детекторах (фотодиоды) может присутствовать несколько видов шумов - дробовой шум, шум темнового тока и тепловой шум. Таким образом, на блок обработки и индикации поступает достаточно зашумленный сигнал, также шум может возникнуть из-за недостаточной разрядности АЦП (п.3.1.).

Зашумленность сигнала влияет на отношение сигнал-шум, определяемое по формуле:

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} = \left(\frac{A_{signal}}{A_{noise}} \right)^2, \quad (4)$$

где P_{signal} – средняя мощность сигнала;

P_{noise} – средняя мощность шума;

A_{signal} – среднеквадратическое значение амплитуды сигнала;

A_{noise} – среднеквадратическое значение амплитуды шума.

В свою очередь главный параметр, определяющий температурное и пространственное разрешение — это соотношение сигнал-шум. Следовательно, для повышения температурного и пространственного разрешения необходимо уменьшить уровень шума в оцифрованном сигнале. Так как уменьшить уровень шума до оцифровки сигнала не представляется возможным. Только после этого можно проводить дальнейшую обработку сигнала для нахождения значения измеренной температуры и дистанции, на которой происходит изменение температуры.

3.1.1 Проблемы дискретизации при оптическом измерении

Любой аналоговый сигнал можно оцифровать, для этого необходимо произвести его дискретизацию по времени и квантование по уровню. Известно, что для преобразования сигнала из аналоговой в цифровую форму без потерь необходимо, чтобы выполнялось условие теоремы Котельникова, т.е. частота дискретизации, как минимум в два раза должна превышать наибольшую частоту в спектре сигнала. В противном случае при восстановлении сигнала будут присутствовать наложение спектра, и форма сигнала будет значительно отличаться от первоначальной (рисунок 16).

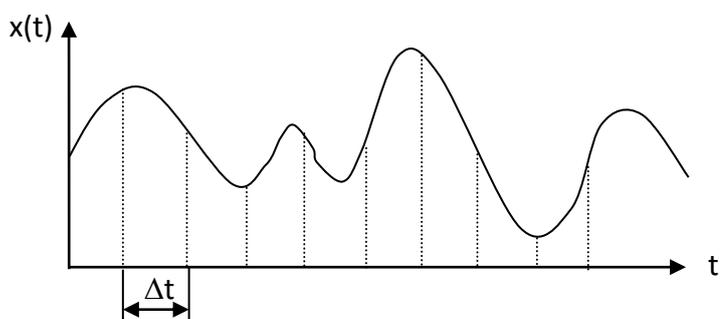


Рисунок 16 – Дискретизация непрерывного сигнала

При дискретизации сигналов всегда происходит потеря информации, искажение формы сигнала, как бы ни была высока частота дискретизации. Возникает так называемая погрешность дискретизации – специфическая разновидность погрешности, возникающая в цифровых приборах и дискретных преобразователях из-за необходимости измерения мгновенных значений сигнала в фиксированные моменты времени.

При выбранной частоте дискретизации искажение можно уменьшить, если обеспечить подавление спектральных составляющих аналогового сигнала (до дискретизации), лежащих выше частоты Найквиста, для чего требуется фильтр очень высокого порядка, чтобы избежать наложения «хвостов». Практическая реализация такого фильтра весьма сложна, так как амплитудно-частотные характеристики фильтров имеют не прямоугольную, а гладкую форму, и образуется некоторая переходная полоса частот между полосой пропускания и полосой подавления.

Современные конструкции цифровых преобразователей, как правило, предусматривают это, объединив это с большим объемом памяти. Подобные цифровые преобразователи способны минимизировать эту классическую проблему.

На рисунке 17 показано, как сигнал будет выглядеть, если пропускать его через цифровые преобразователи с различными разрешениями, такими как: 12-, 14- и 16-разрядные. Преобразователи 14- и 16-разрядные имеют достаточное разрешение, чтобы точно передать сигнал. 12-битный цифровой преобразователь с разрешением 100 мкВ не в состоянии достаточно хорошо передать форму сигнала. Ошибка при любом разрешении, будет возрастать с уменьшением амплитуды сигнала, и шум будет ограничивать точность и воспроизводимость сигнала. Обработка сигналов с помощью таких инструментов как фильтрация и усреднение может улучшить разрешение цифрового преобразователя, но по-прежнему важно учитывать требование

динамического диапазона любого измерения до выбора цифровой преобразователя.

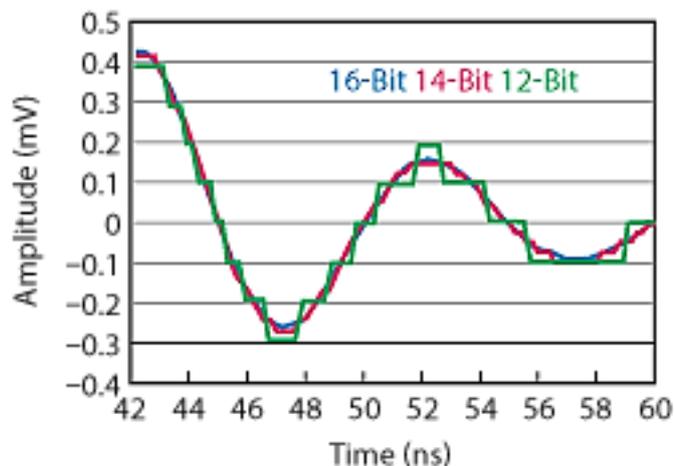


Рисунок 17 - Сравнение разрешающей способности цифрового преобразователя и влияние на точность измерения

Осциллографы преобразовывают аналоговые сигналы в цифровые с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Разрешение АЦП используется для оцифровки входных выборок. Для n -разрядного АЦП, число дискретных цифровых уровней, которые могут быть получены равно 2^n . Таким образом, 12-битный цифровой преобразователь может иметь 4096 уровней. Наименьший значащий бит (LSB), представляет собой наименьший интервал, который может быть обнаружен. В случае 12-битного цифрового преобразователя, младший значащий бит равен $1/4096$ или $2,4 \times 10^{-4}$. Для того чтобы преобразовать LSB в напряжение, входной диапазон делится на 2^n .

Разрешение определяет точность измерения. Чем больше разрешение цифрового преобразователя, тем более точные значения измерений. АЦП 8-разрядный делит диапазон входного усилителя на 256 дискретных уровней. При вертикальном диапазоне от 1 В, 8-разрядный АЦП не может идеально устранить разность напряжений меньше, чем 3,91 мВ, в то время как 16-разрядный АЦП с 65536 дискретными уровнями может устранить разность напряжений порядка 15,2 мкВ.

Именно по этой причине разумно использовать цифровой преобразователь с высоким разрешением для измерения малых сигналов. Тем

не менее, многие сигналы содержат компоненты большого и малого сигнала. Таким образом, для сигналов большими и малыми составляющим напряжением, высокое разрешение АЦП и большой динамический диапазон позволит измерять малые сигналы и большие сигналы одновременно.

Современные и качественные цифровые преобразователи предлагают широкий выбор диапазонов входных напряжений для различных вариантов измерений. Общее правило, которому необходимо следовать при выборе диапазона входных значений, заключается в том, что амплитуда входного сигнала должна охватывать наибольшую часть от всей шкалы диапазона. Если это возможно, то необходимо стремиться к использованию 90 – 95% от доступного диапазона. Это обеспечит максимальный доступный динамический диапазон и улучшит соотношение сигнал-шум [44].

При оптическом измерении проблемы дискретизации и потери информации остаются актуальными. Для преобразования из аналоговой формы сигнала в цифровую используется электрооптическое преобразование, которое осуществляется с помощью оптического анализатора спектра. Оптический анализатор спектра представляет собой устройство для измерения оптической мощности (рисунок 18). Данное устройство имеет оптический выход, что позволяет выделить спектральный канал для проведения цифрового анализа, а также возможен обмен информацией между персональным компьютером и анализатором. С помощью данного устройства определяются частота и амплитуда спектральных составляющих сигнала. Одна из основных характеристик анализатора — это разрешающая способность, представляющая собой минимальный частотный интервал между двумя спектральными линиями, которые разделяются анализатором. При анализе на выходе получаем не истинный спектр, а его оценку. В действительности невозможно применить сколь угодно разрядный АЦП для того, чтобы получить истинный спектр сигнала. Разрядность всегда конечна, следовательно, мы можем с ростом

разрядности только приближаться к истинным значениям спектра, по средствам получения его оценок [45].



Рисунок 18 – Внешний вид оптического анализатора спектра Yokogawa AQ6370C

Специфика оптического измерения заключается в том, что оптические методы позволяют передавать огромное количество информации, что может дать возможность производить оптический анализ в реальном времени или в приближении к нему. Но получаемые данные необходимо обработать, т.е. произвести цифровую обработку, усреднение, а для этого необходимы дополнительные ресурсы, в том числе и временные [46].

3.1.2 Метод оптической временной рефлектометрии

В волоконном световоде, обратно рассеянный свет, в отличии от света, исходящего от источника, содержит как компоненту с начальной длиной волны (рэлеевское рассеянием), так и компоненты, подвергшиеся спектральному сдвигу на частоту, соответствующую резонансной частоте колебаний рассеивающих узлов (комбинационное рамановское рассеяние). Преобразование первичного светового потока сопровождается переходом рассеивающих молекул на другие колебательные и вращательные уровни энергии, причём частоты новых линий в спектре рассеяния являются

комбинациями частоты падающего света и частот колебательно-вращательных переходов рассеивающих молекул. Если молекула вещества перешла из основного состояния в возбуждённое, в спектре комбинационного рассеяния появляется так называемая стоксова компонента, имеющая большую длину волны по сравнению с источником света. Если молекула в результате комбинационного рассеяния переходит из возбуждённого в основное состояние, появляется так называемая антистоксова компонента, Амплитуда анти-стоксовой компоненты зависит от локальной температуры. [47]. На рисунке 19 представлено графическое изображение Рэлеевское и Рамановское рассеяние света.

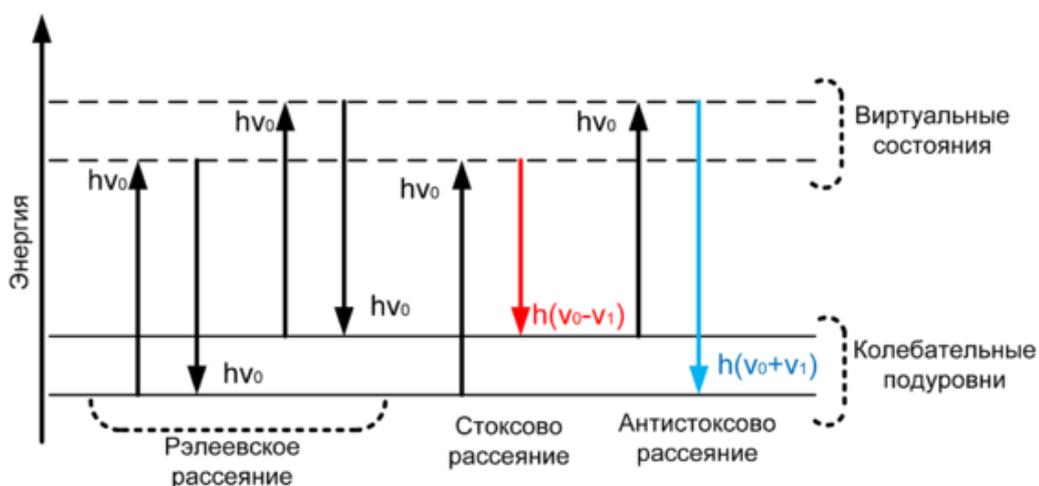


Рисунок 19 – Рэлеевское и Рамановское рассеяние света

В распределенных системах измерения температуры оптический импульс посылается по оптическому волокну, и комбинационное рассеяние (эффект Рамана), представляющее собой неупругое рассеяние оптического излучения на молекулах вещества, которое сопровождающееся изменением частоты излучения измеряется с использованием методов оптической временной рефлектометрии. [48]-[49]

Метод оптической временной рефлектометрии (OTDR, Optical Time Domain Reflectometry) представляет собой технику, основанную на определении разности между моментами времени передачи светового импульса и приёма обратно-рассеянного света, а также зависимости интенсивности

рассеянного света от времени (т.е. от расстояния вдоль кабеля). Для применения техники оптической временной рефлектометрии можно использовать специализированный прибор – оптический рефлектометр, внешний вид подобного прибора изображен на рисунке 20.



Рисунок 20 – Внешний вид оптического рефлектометра Yokogawa AQ7275 PM

Заселенность возбуждённого уровня напрямую зависит от температуры вещества, поэтому интенсивность антистоксовой компоненты зависит от температуры. Таким образом, регистрируя интенсивность антистоксовой компоненты комбинационного рассеяния, можно проводить измерения температуры на всём протяжении волоконного датчика.

Схематическая структура волоконно-оптической системы измерения температуры состоит из блока формирования сигнала с частотным генератором, лазера, оптического модуля, приёмного блока и блока микропроцессора, а также световодного кабеля (кварцевое стеклянное волокно) в качестве температурного датчика.

В соответствии с методом OFDR интенсивность лазера в течение интервала времени измерения модулируется синусообразно, а частота — линейно. Причиной для срабатывания рефлектометра является отклонение частоты. Частотно модулированный свет лазера направляется в световод. В любой точке вдоль волокна возникает сигнал комбинационного рассеяния, излучаемый во всех направлениях. Часть данного сигнала движется в обратном

направлении к блоку формирования сигнала. Затем выполняется спектральная фильтрация обратно рассеянного света, его преобразование в измерительных каналах в электрические сигналы, усиление и электронная обработка. Микропроцессор проводит расчет преобразования Фурье. В качестве промежуточного результата получают кривые комбинационного обратного рассеяния как функцию расстояния от начала кабеля. Амплитуда кривых обратного рассеяния пропорциональна интенсивности соответствующего комбинационного рассеяния. Из отношения кривых обратного рассеяния (анти-стоксовой и стоксовой) получают температуру волокна вдоль световодного кабеля. Технические спецификации системы рамановского измерения температуры могут быть оптимизированы посредством настройки параметров прибора (дальность действия, пространственное разрешение, точность температуры, время измерения).

Существует проблема в нахождении амплитуд кривых обратного рассеяния, заключающаяся в том, что интенсивность обратного рассеяния намного ниже пиковой мощности. Низкая мощность рассеяния отражённых сигналов требует выполнения большого количества измерений в целях повышения соотношения сигнал-шум. Это значительно ограничивает температурное разрешение из-за большой дисперсии отражённых сигналов. В настоящее время эта проблема решается применением кодирования оптических импульсов с последующим накоплением оцифрованного сигнала [50].

3.1.3 Многократное усреднение оптического сигнала

Одним из самых простых и доступных способов уменьшения шума, является многократное усреднение полученных сигналов. По данным выборки – ряда значений, принимаемых случайной величиной в процессе n независимых измерений производится оценка истинного значения измеряемой

величины, в данном случае амплитуды оптического сигнала, а точнее амплитуд двух составляющих – антистокс и стокс.

Многokратное усреднение приводит к тому, что сенсорная система становится достаточно инерционной – т.е. для получения хорошего сигнала требуется достаточно долгое накопление сигнала. При этом сенсорная система будет неспособна регистрировать быстрые температурные флуктуации, так как они будут усредняться по времени. Пусть на вход сенсорной линии подается один прямоугольный импульс длительностью τ (рисунок 21) и описывается уравнением (5):

$$P(t \geq 0) = \begin{cases} 1, t < \tau \\ 0, t \geq \tau \end{cases} \quad (5)$$

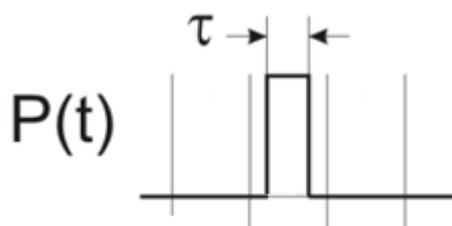


Рисунок 21 - Прямоугольный импульс длительностью τ

После прохождения импульса по сенсорной волоконной линии измеряется отклик – сигнал отражения, который зависит также от времени. Но стоит учесть, что также в измеряемом сигнале появляются шумы.

$$P(t) \xrightarrow{\text{fiber}} \tilde{R}(t) = R(t) + e(t) \quad (65)$$

где $P(t)$ – единичный импульс, подаваемый на вход;

$\tilde{R}(t)$ - сигнал отражения;

$R(t)$ – единичный импульс, прошедший волокно;

$e(t)$ – шум, возникающий в процессе прохождения сигнала через волокно.

Шумом называется любое возмущение электрического или оптического характера, отличное от полезного сигнала.

При этом стоит задача уменьшения уровня шума $e(t)$. Как было уже сказано выше, это можно сделать с помощью многократного усреднения. Для

этого в линию необходимо послать N одинаковых импульсов и померить отклики от них.

Усредненный сигнал после прохождения через волокно тогда будет равен:

$$\tilde{R}_{cp}(t) = \frac{\sum_i^N (\tilde{R}_i + e_i)}{N} = R + \frac{\sum_i^N e_i}{N} \quad (7)$$

3.1.4 Кодирование оптических импульсов

Другой подход в уменьшении шума измеряемого сигнала заключается в кодировании посылаемого в волоконную линию сигнала с последующим декодированием сигналов отражения.

Недавно была предложена технология импульсного кодирования [51] для увеличения уровня пиковой мощности Рамановского рассеивания, не вызывает нелинейных эффектов в волокне, но развитие технологий мощных импульсных лазеров, которые используются в некоторых схемах для зондирования систем дальнего действия с высоким пространственным разрешением [52], может негативно повлиять на широкое применение импульсных кодовых слов.

Более эффективная техника кодирования на основе циклических симплекс кодов, недавно получившая экспериментальное подтверждение описана в [53] заключается в запуске оптических импульсов в волокно с низкой скоростью повторения, «заполняя» всю чувствительную часть волокна большим количеством бит.

Главное преимущество циклических кодов для задач распределенного температурного датчика использующего лазеры высокой мощности, по отношению к другим схемам кодирования - это их совместимость с лазерами с низкой частотой импульсов.

Существует множество различных техник кодирования, но наиболее

распространена, так называемая, техника симплекс-кодирования [54]-[57].

3.1.4.1 Симплекс-кодирование с использованием кодов Адамара

Симплекс-кодирование основано на кодах Адамара, которые относятся к локально декодируемым кодам (коды исправляющие ошибки). Суть кодирования с помощью кодов Адамара заключается в равномерном «размазывании» закодированной информации по всем кодовым словам. Таким образом, слово, закодированное локально декодируемым кодом, можно восстановить при потере значительной части закодированных данных.

Матрицей Адамара является квадратная матрица N порядка n с элементами $+1$ и -1 если выполняется условие:

$$NN^T = nE_n, \quad (8)$$

где N – матрица, состоящая из элементов $+1$ и -1 ;

N^T – транспонированная матрица;

n – порядок матрицы;

E_n – единичная матрица размером n .

Единичной матрицей называется квадратная матрица, элементы главной диагонали которой равны единице, а остальные элементы равны нулю.

Теперь рассмотрим вариант с кодированием входного сигнала на примере кода Адамара длины 4. На рисунке 22 представлены одиночные импульсы. Пусть теперь на вход в линию подается не один импульс, а четыре различных последовательности из трех единичных импульсов, представленных на рисунке 23. При этом расстояние между импульсами на временной оси кратно длительности единичного бита $t_{bit} \geq \tau$:

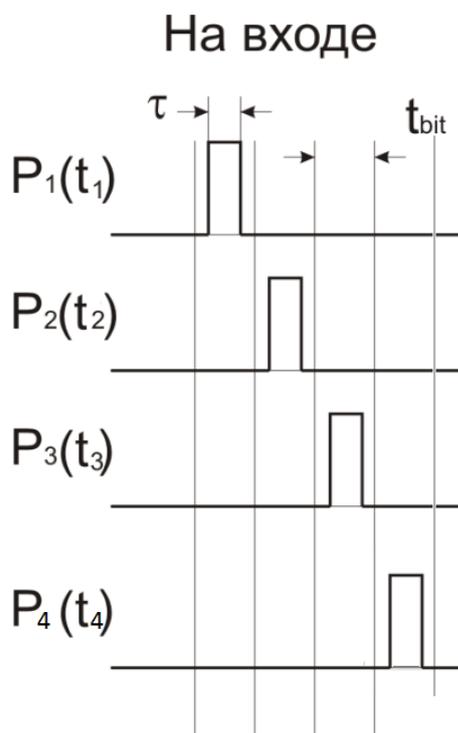


Рисунок 22 – Четыре одиночных импульса

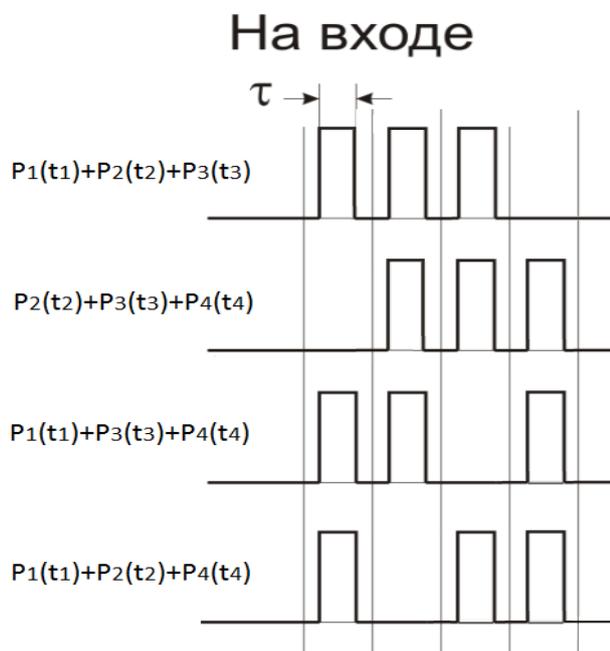


Рисунок 23 - Четыре различных последовательности из трех единичных импульсов

Соответствующие отклики от этих импульсов будут также сдвинуты относительно друг друга:

$$R_4(t) = R_3(t - t_{bit}) = R_2(t - 2t_{bit}) = R_1(t - 3t_{bit}) \quad (9)$$

Первая последовательность описывается выражением:

$$P_1(t_1) + P_2(t_2) + P_3(t_3) \xrightarrow{fiber} \tilde{R}_1(t_1) = R_1(t_1) + R_2(t_2) + R_3(t_3) + e_1(t) + e_2(t) + e_3(t) \quad (10)$$

Вторая последовательность:

$$P_2(t_2) + P_3(t_3) + P_4(t_4) \xrightarrow{fiber} \tilde{R}_2(t_2) = R_2(t_2) + R_3(t_3) + R_4(t_4) + e_2(t) + e_3(t) + e_4(t) \quad (11)$$

Третья последовательность:

$$P_1(t_1) + P_3(t_3) + P_4(t_4) \xrightarrow{fiber} \tilde{R}_3(t_3) = R_1(t_1) + R_3(t_3) + R_4(t_4) + e_1(t) + e_3(t) + e_4(t) \quad (12)$$

Четвертая последовательность:

$$P_1(t_1) + P_2(t_2) + P_4(t_4) \xrightarrow{fiber} \tilde{R}_4(t_4) = R_1(t_1) + R_2(t_2) + R_4(t_4) + e_1(t) + e_2(t) + e_4(t) \quad (13)$$

Перепишем в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} \tilde{R}_1(t) \\ \tilde{R}_2(t) \\ \tilde{R}_3(t) \\ \tilde{R}_4(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_1(t) \\ R_2(t) \\ R_3(t) \\ R_4(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \\ e_3(t) \\ e_4(t) \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} R_1(t) \\ R_2(t) \\ R_3(t) \\ R_4(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \\ e_3(t) \\ e_4(t) \end{pmatrix}, \quad (14)$$

где $S = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ - матрица Адамара четвертого порядка.

Произведем действительно ли полученная матрица является матрицей Адамара.

Заменим нули матрицы на (-1), получим матрицу: $S = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \end{pmatrix}$.

Транспонированная матрица: $S^T = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$, тогда по формуле

(8) получаем: $SS^T = \begin{pmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 \end{pmatrix}$. Следовательно, матрица полученная по

формуле (14) действительно является матрицей Адамара четвертого порядка (n=4).

Таким образом, на выходе регистрируется три отклика от трех последовательностей импульсов. Теперь найдем отражение от одного единичного импульса, другими словами раскодируем входной сигнал. Для этого необходимо обратить матрицу Адамара по формуле (15).

$$S^{-1} = \frac{1}{|S|} \cdot \tilde{S}^T, \quad (15)$$

где $|S|$ – определитель матрицы;

\tilde{S}^T – транспонированная матрица алгебраических дополнений соответствующих элементов матрицы S .

Получаем раскодированную матрицу в следующем виде:

$$\begin{pmatrix} \hat{R}_1(t) \\ \hat{R}_2(t) \\ \hat{R}_3(t) \\ \hat{R}_4(t) \end{pmatrix} = S^{-1} \begin{pmatrix} \tilde{R}_1(t) \\ \tilde{R}_2(t) \\ \tilde{R}_3(t) \\ \tilde{R}_4(t) \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & -2 \\ -2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{R}_1(t) \\ \tilde{R}_2(t) \\ \tilde{R}_3(t) \\ \tilde{R}_4(t) \end{pmatrix} \quad (16)$$

Получаем выражение для каждого отклика с учетом шума:

$$\hat{R}_1(t) = R_1(t) + \frac{e_1(t) + e_2(t) + e_3(t) - 2e_4(t)}{3}; \quad (17)$$

$$\hat{R}_2(t) = R_2(t) + \frac{-2e_1(t) + e_2(t) + e_3(t) + e_4(t)}{3}; \quad (18)$$

$$\hat{R}_3(t) = R_3(t) + \frac{e_1(t) - 2e_2(t) + e_3(t) + e_4(t)}{3}; \quad (19)$$

$$\hat{R}_4(t) = R_4(t) + \frac{e_1(t) + e_2(t) - 2e_3(t) + e_4(t)}{3}; \quad (20)$$

Найдем средние этих четырех откликов, для этого просуммируем все значения откликов и разделим на их количество:

$$\hat{R}_{cp} = \frac{\sum_i^N (R_i + e_i)}{N}, \quad (21)$$

где N – количество импульсов;

\hat{R}_i – раскодированный импульс с учетом ошибок.

Таким образом, по формуле (21) получаем: $\hat{R}_{cp} = R + \frac{\sum_i^N e_i}{(N-1)N}$.

3.1.5 Сравнение методов симплекс-кодирования и усреднения сигнала

Для того, чтобы сравнить два метода, сравним их средние арифметические значения для четырех импульсов.

Среднее значение при усреднении полученное по формуле (7)

$\tilde{R}_{cp} = R + \frac{\sum_i^N e_i}{N}$ и среднее значение при кодировании с использованием матриц

Адамара по формуле (20) $\hat{R}_{cp} = R + \frac{\sum_i^N e_i}{(N-1)N}$.

Видим, что в (7) сумма шумов от каждого импульса делится только на количество импульсов, что является прямым следствием нахождения среднего значения, а при кодировании в формуле (20) сумма шумов делится не только на количество импульсов, но и на значение $(N-1)$, что уменьшает количество шума

в конечном значении при использовании метода симплекс-кодирования, основанного на кодах Адамара.

Также можно сказать, что дисперсия, являющаяся мерой рассеяния и описывающая сравнительное отклонение между значениями данных и средней величиной тоже будет меньше в случае кодирования, т.к. среднее арифметическое и дисперсия прямо пропорциональные величины, что подтверждает формула:

$$\sigma^2 = \frac{\sqrt{\sum_i^N (R_i - R_{cp})^2}}{N}, \quad (21)$$

где R_i – текущее значение импульса;

R_{cp} – среднее арифметическое значения;

N – количество импульсов.

На рисунке 24-25 представлены графики зависимости уменьшения шума при усреднении и кодировании сигнала соответственно относительно длины последовательности в коде. Длина последовательности в коде находится как количество импульсов минус единица.

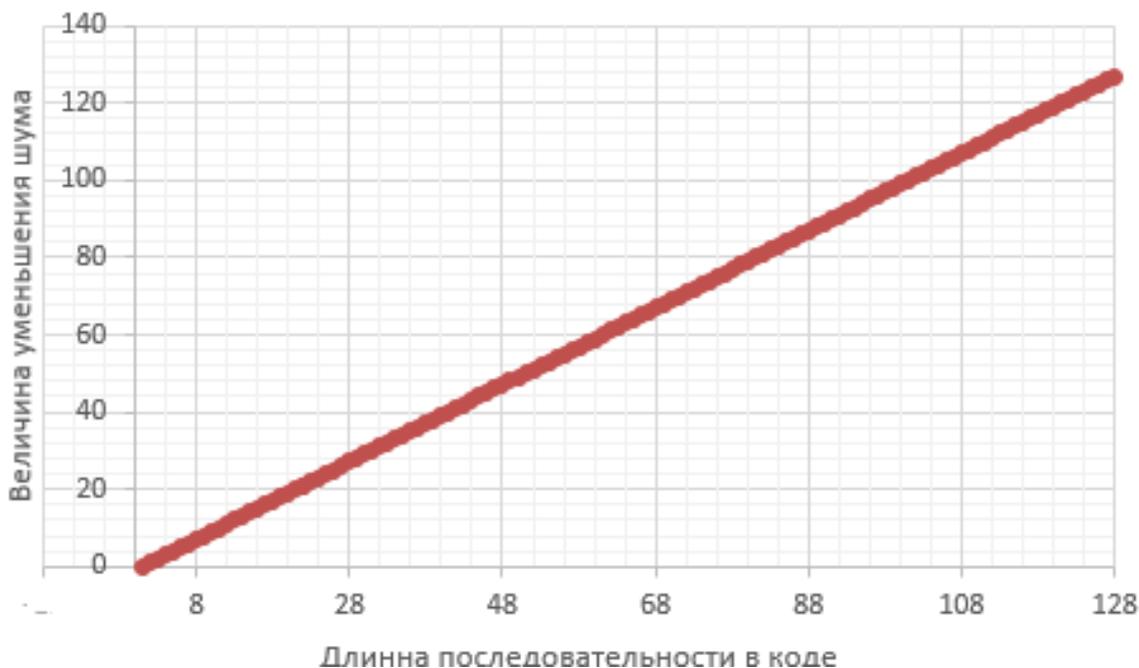


Рисунок 24 – Уменьшение шума при усреднении относительно длины последовательности в коде

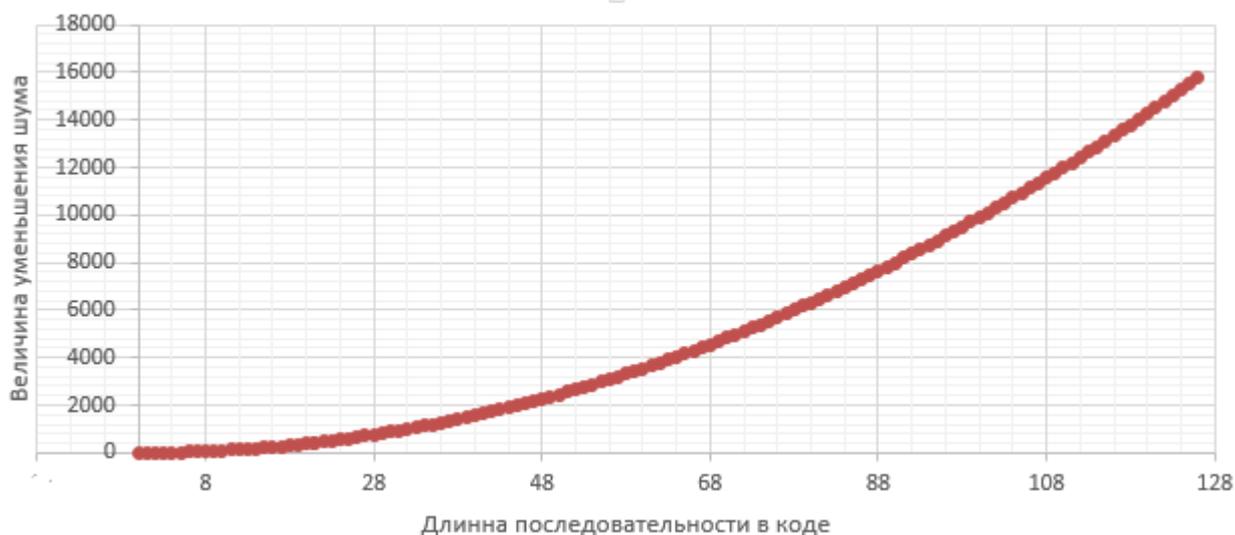


Рисунок 25 – Уменьшение шума при кодировании относительно длины последовательности в коде

Видно, что при длине последовательности 128 бит при симплекс-кодировании шум уменьшается в 16000 раз, а при усреднении всего лишь в 128 раз. Это означает, что при одном и том же времени затраченное на прохождение импульсов по волоконной сенсорной линии сигнал, восстановленный после симплекс-кодирования будет иметь на порядок меньший шум, чем после обычного усреднения. Или же при одном и том же уровне шума симплекс-кодирование займет на порядок меньше времени.

Следовательно, пространственное разрешение при использовании кодирования будет больше. С ростом времени прохождения и распространением света на большее расстояние по волокну уровень шума будет оставаться небольшим.

3.2 Программная обработка сигнала

Далее описан процесс реализации программной обработки сигнала, который прошел процесс кодирования и декодирования и сигнал, который не был закодирован. Для этого была написана программа в среде программирования LabVIEW. Алгоритм программы приведен на рисунке 26.

Код программы приведён на рисунке 27. Сравним полученные результаты и основываясь на практических результатах сделаем выводы.

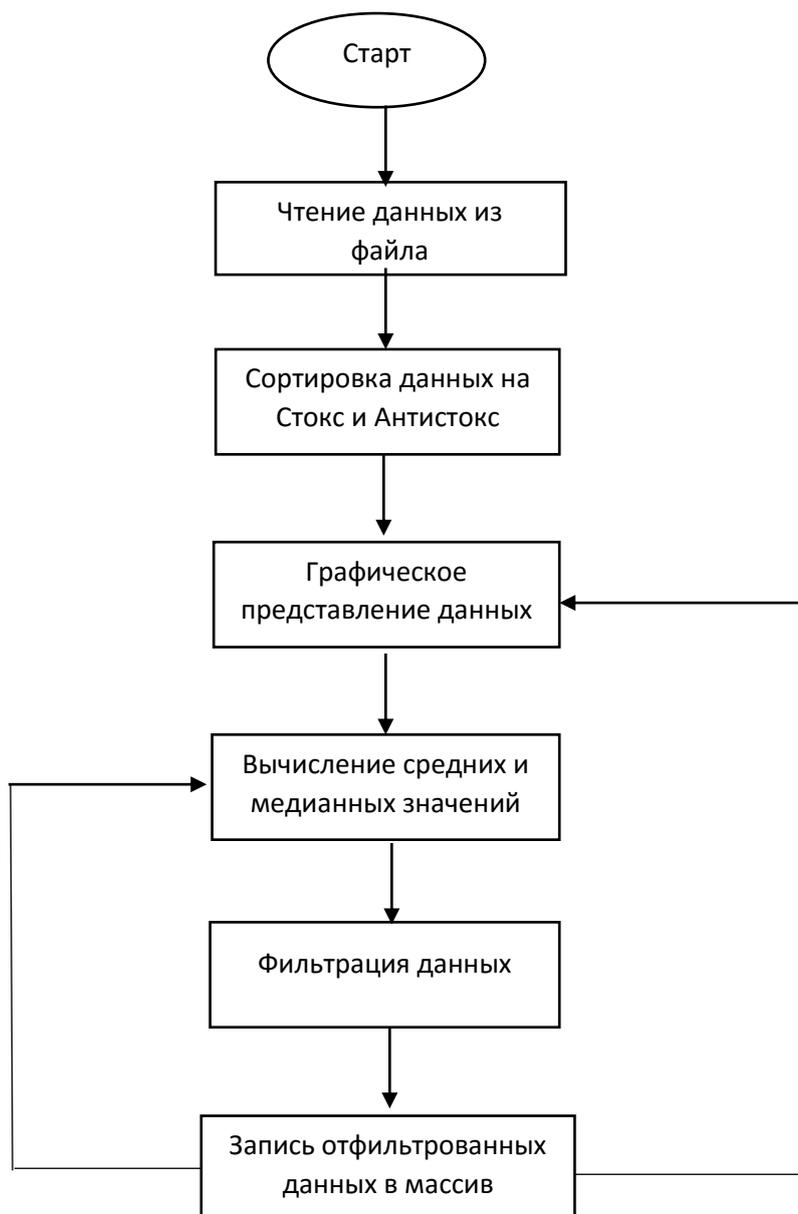


Рисунок 26 – Алгоритм программы в Labview

Для реализации необходимой программы в среде графического программирования LabVIEW были использованы следующие основные блоки:

- блок чтение из файла (Read From Text File) – позволяет считывать данные из файла и обрабатывать их;

- медианные фильтр (Median Filter) -один из видов цифровых фильтров, широко используемый в цифровой обработке сигналов для уменьшения уровня шума. Медианный фильтр является нелинейным КИХ-фильтром.

Значения отсчётов внутри окна фильтра сортируются в порядке возрастания (убывания); и значение, находящееся в середине упорядоченного списка, поступает на выход фильтра. В случае четного числа отсчетов в окне выходное значение фильтра равно среднему значению двух отсчетов в середине упорядоченного списка. Окно перемещается вдоль фильтруемого сигнала и вычисления повторяют;

- вычисление среднего (Mean) – блок, вычисляющий сумму всех зафиксированных значений, делённую на их количество;

- вычисление медианы (Median) – блок, вычисляющий значение медианы, путем сортировки значений в порядке возрастания (убывания) и значение, находящееся в середине упорядоченного списка, поступает на выход. В случае четного числа значений на выход поступает значение равное среднему значению двух в середине упорядоченного списка;

- графическое представление данных (Waveform graphs) - отображает данные в виде графика.

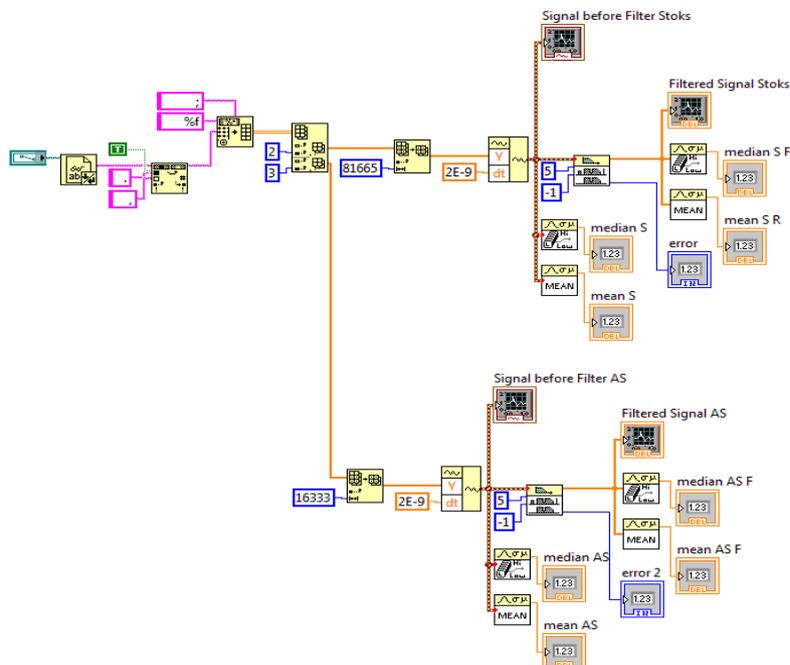


Рисунок 27 – Блок диаграмма программы, реализующей фильтрацию и вычисление статистических характеристик

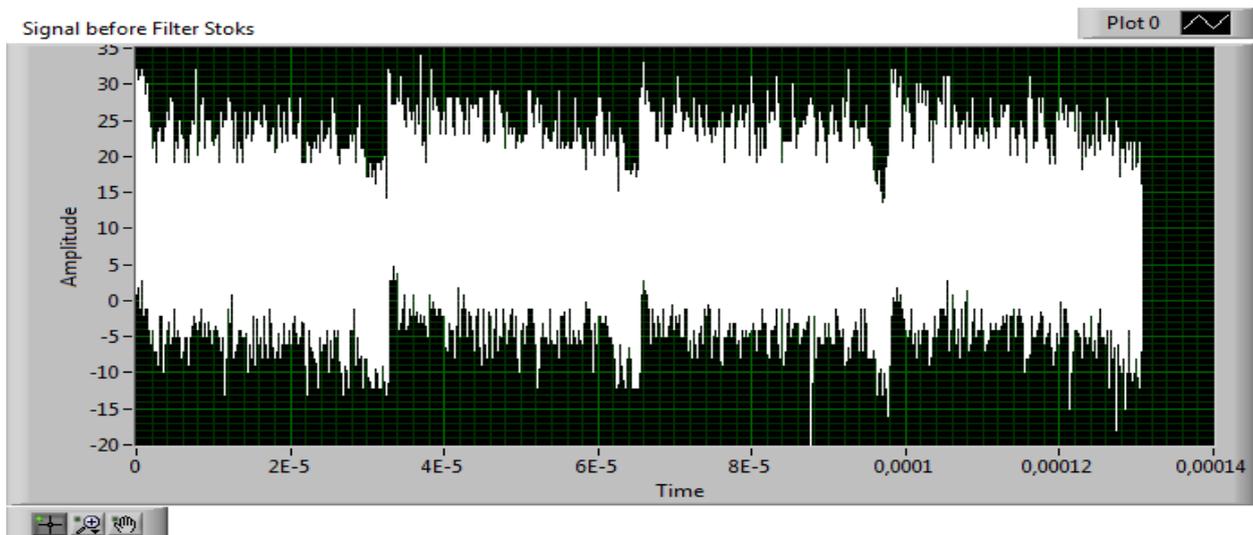
3.2.1 Цифровая обработка сигнала до кодирования

С помощью источника света (лазера) в волокно посылается четыре одинаковых импульса и измеряется отклик системы, при этом волокно нагревается до определенной температуры. Таким образом, были получены отклики с устройства опроса оптоволоконного измерителя температуры. Отклики представляют собой данные, в виде четырех импульсов по 16333 значений в каждом, интервал времени между каждым откликом 2 нс. Каждый импульс представлен значениями стокса и антистокса, снятых с устройства опроса и записанных в файл.

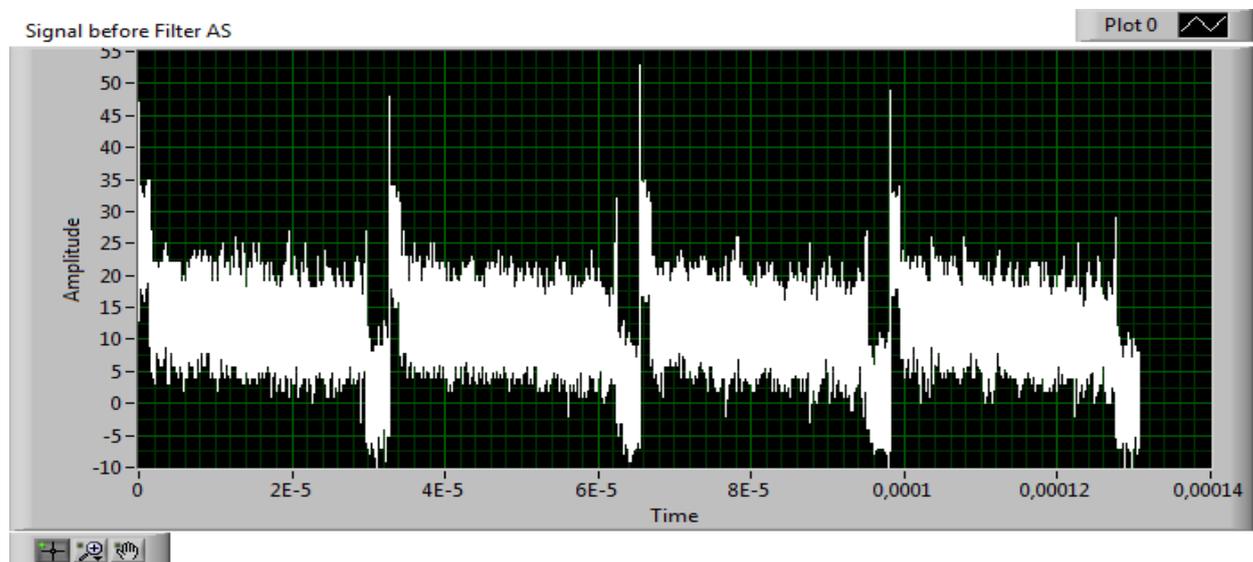
В программе реализованы визуализация импульсов, различные способы усреднения сигнала и расчет этих средних для каждого импульса отдельно и для суммы импульсов. Все это производится до фильтрации и после для того, чтобы провести сравнение полученных результатов и убедиться экспериментально в необходимости использования фильтрации сигнала, получаемого с оптоволоконного датчика измерения температуры.

3.2.1.1 Визуализация и расчет статистических характеристик сигнала до кодирования и перед фильтрацией

Графическое изображение импульсов стокса и антистокса до цифровой фильтрации представлены на рисунке 28 а-б. Их статистические характеристики (среднее арифметическое и медиана) для каждого импульса и суммы представлены в таблице 1.



а) четыре импульса стоксовых компонент Рамановского рассеивания



б) четыре импульса антистоксовых компонент Рамановского рассеивания

Рисунок 28 – Графическое представление сигнала до кодирования и перед фильтрацией

Таблица 1 - Значения статистических характеристик сигнала до кодирования и перед фильтрацией

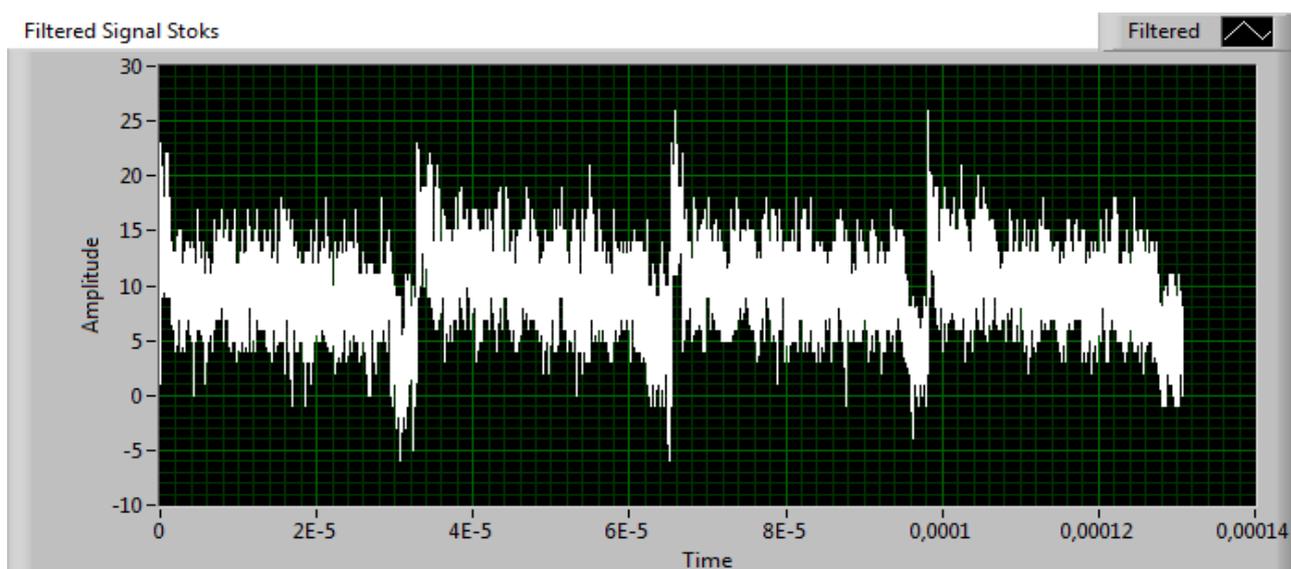
Номер импульса	Стоксова компонента Рамановского рассеивания		Антистоксова компонента Рамановского рассеивания		Отношение стокс-антистокс	
	Среднее арифметическое	Медиана	Среднее арифметическое	Медиана	Среднее арифметическое	Медиана
1	8,77	8,00	12,25	12,00	0,72	0,66
2	10,24	10,20	12,09	12,00	0,85	0,85
3	9,91	9,50	11,74	11,50	0,84	0,83
4	9,76	9,50	11,62	11,50	0,84	0,83
Сумма	9,67	9,50	11,92	11,75	0,81	0,81

Сигнал не подвергшийся кодированию и фильтрации представленный на рисунке 28 достаточно зашумлен и вычисление среднего значения по таким данным приведет к искажению конечного результата измерения, уменьшению точности измерения и достаточно низкому пространственному и температурному разрешению.

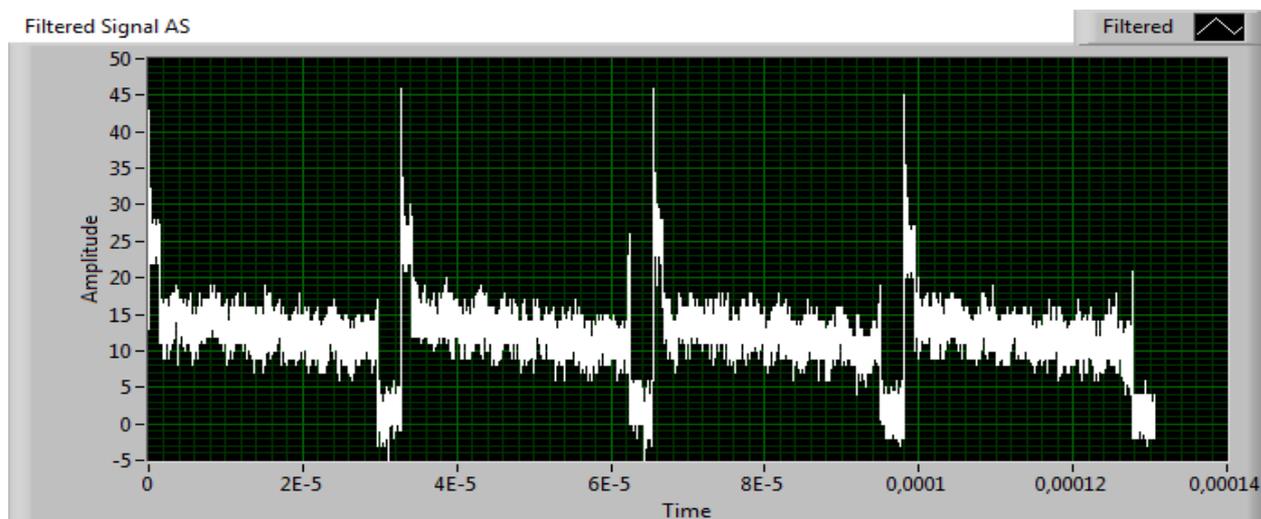
Кроме среднего арифметического было рассчитано медианное значение, которое более правильно позволяет оценить среднее значение импульсов, т.к. более устойчиво к выбросам, но при большом уровне зашумленности данная оценка, хоть и более точна, чем среднее арифметическое, но все же дает не корректное представление об измеряемом параметре.

3.2.1.2 Визуализация и расчет статистических характеристик сигнала до кодирования и после фильтрации

Графическое изображение импульсов стока и антистока после цифровой фильтрации представлены на рисунке 29 а-б. Их статистические характеристики (среднее арифметическое и медиана) для каждого импульса и для суммы представлены в таблице 2.



а) четыре импульса стоксовых компонент Рамановского рассеивания



б) четыре импульса антистоксовых компонент Рамановского рассеивания
 Рисунок 29 – Графическое представление сигнала до кодирования и после фильтрации

Таблица 2 - Значения статистических характеристик сигнала до кодирования и после фильтрации

Номер импульса	Стоксова компонента Рамановского рассеивания		Антистоксова компонента Рамановского рассеивания		Отношение стокс-антистокс	
	Среднее арифметическое	Медиана	Среднее арифметическое	Медиана	Среднее арифметическое	Медиана
1	8,25	8,00	11,25	11,00	0,73	0,73
2	10,12	10,10	12,00	12,00	0,84	0,84
3	9,50	9,30	11,45	11,00	0,83	0,85
4	9,67	9,40	11,22	11,00	0,86	0,85
Сумма	9,39	9,35	11,48	11,50	0,82	0,81

Сравнивая рисунки 28 и 29, видим, что после фильтрации импульсы стокса и антистокса более четкие, шумовая дорожка уменьшилась, т.к. медианный фильтр позволяет устранить резкие всплески. Следовательно, значения медианы и среднего арифметического до фильтрации и после должны отличаться. Это подтверждается данными приведенными в таблицах 1 и 2.

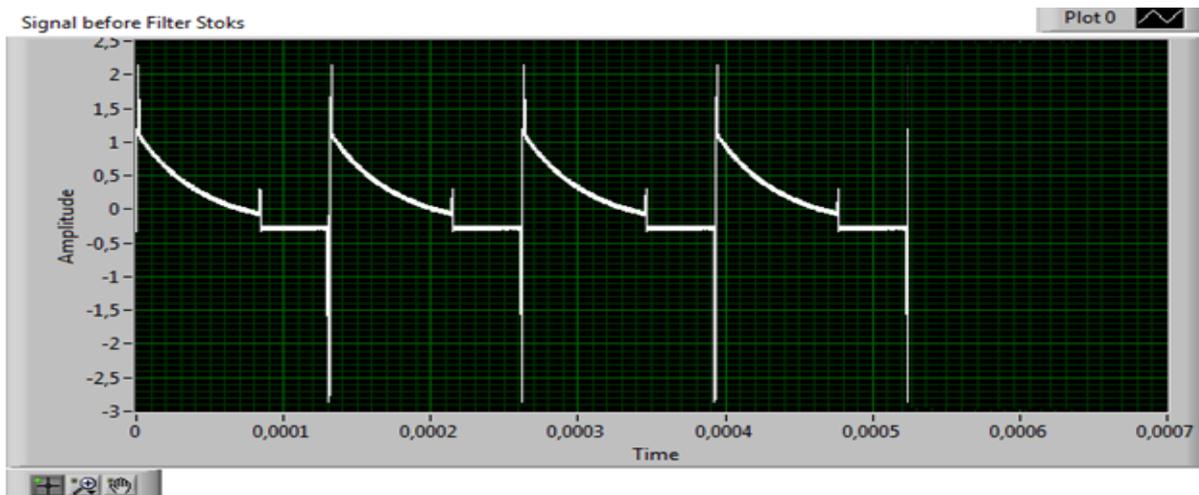
3.2.2 Цифровая обработка сигнала после кодирования

С помощью источника света (лазера) в волокно посылается четыре последовательности из суммы трех импульсов, для которых применяются симплекс-кодирование, основанное на кодах Адамара (п.3.1.4) интервал времени между каждым откликом 2 нс. Отклики представляют собой данные, в виде четырех импульсов по 16333 значений в каждом, интервал времени между каждым откликом 2 нс. Каждый импульс представлен значениями стока и антистока, снятых с устройства опроса и записанных в файл.

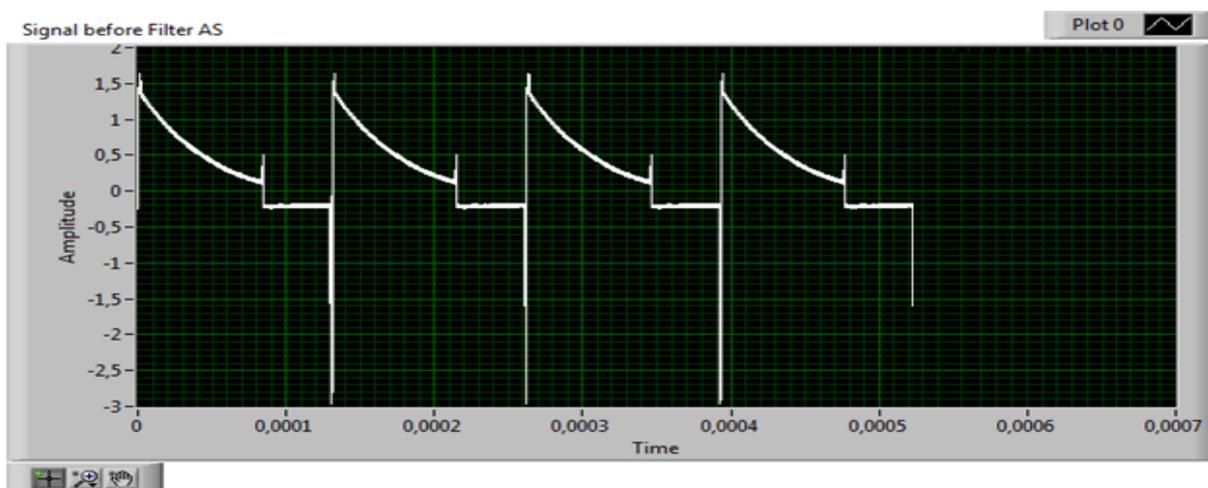
В программе реализованы визуализация импульсов, различные способы усреднения сигнала и расчет этих средних для каждого импульса отдельно и для суммы импульсов. Все это производится до фильтрации и после для того, чтобы провести сравнение полученных результатов и убедиться экспериментально в необходимости использования фильтрации сигнала после кодирования, получаемого с оптоволоконного датчика измерения температуры.

3.2.2.1 Визуализация и расчет статистических характеристик сигнала после кодирования и до фильтрации

Графическое изображение импульсов стока и антистока до цифровой фильтрации представлены на рисунке 30 а-б. Их статистические характеристики (среднее арифметическое и медиана) для каждой последовательности и для суммы четырех последовательностей представлены в таблице 3.



а) четыре последовательности импульсов стоксовых компонент Рамановского рассеивания



б) четыре последовательности импульсов антистоксовых компонент Рамановского рассеивания

Рисунок 30 - Графическое представление сигнала после кодирования и перед фильтрацией

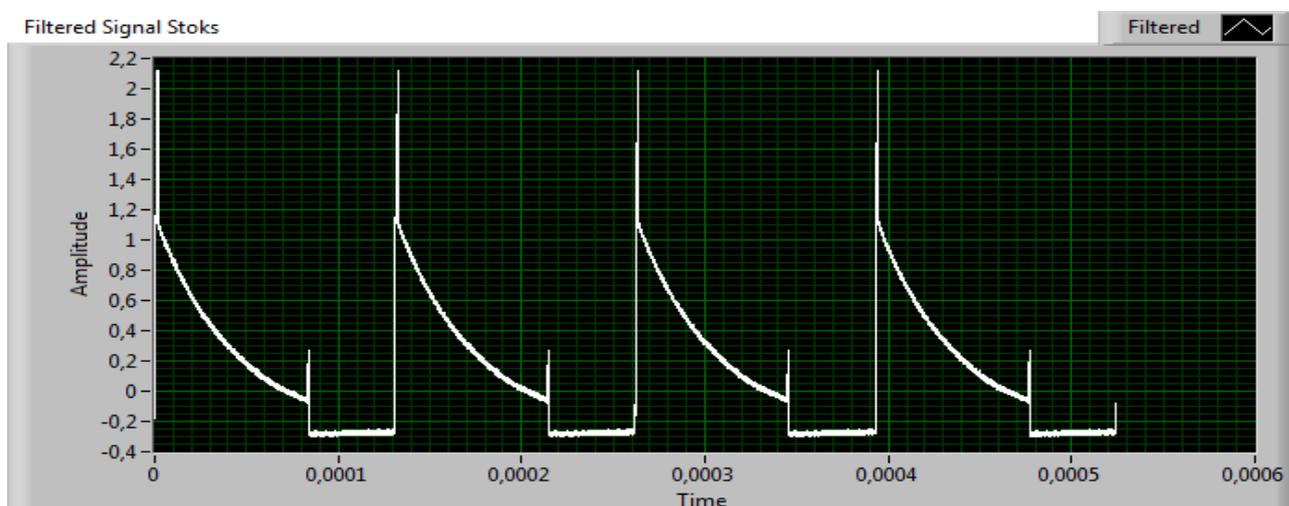
Таблица 3 - Значения статистических характеристик сигнала после кодирования и перед фильтрацией

Номер импульса	Стоксова компонента Рамановского рассеивания		Антистоксова компонента Рамановского рассеивания		Отношение стокс-антистокс	
	Среднее арифметическое	Медиана	Среднее арифметическое	Медиана	Среднее арифметическое	Медиана
1	0,22	0,22	0,31	0,31	0,71	0,71
2	0,18	0,18	0,29	0,29	0,62	0,62
3	0,19	0,19	0,33	0,33	0,57	0,57
4	0,21	0,21	0,35	0,35	0,6	0,6
Сумма	0,20	0,20	0,32	0,32	0,62	0,62

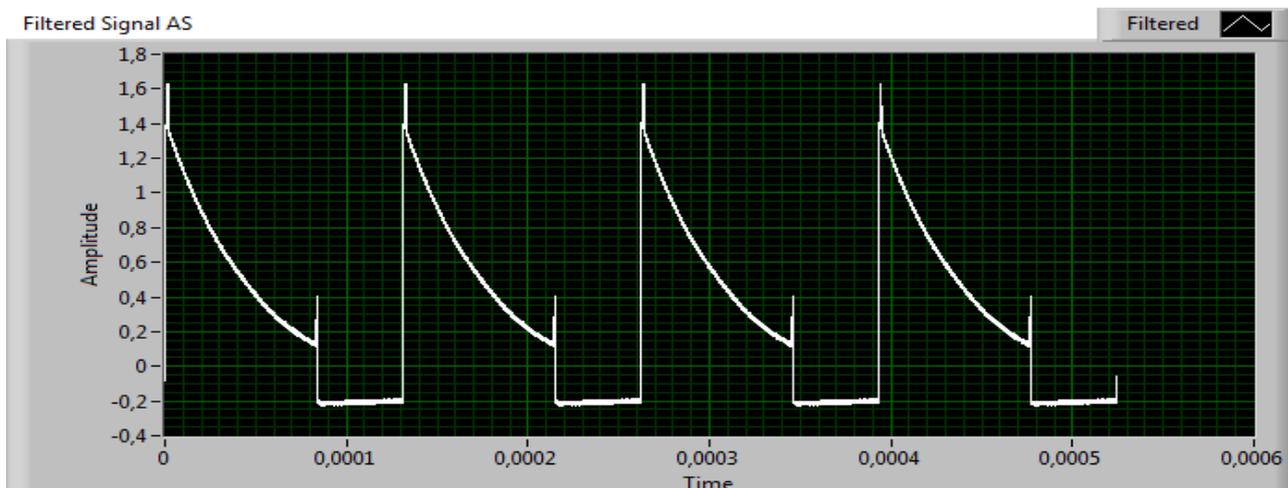
Сравнивая сигналы до и после кодирования явно заметно отличие, как в графиках, так и в числовых значениях среднего арифметического и медианы, это объясняется, тем, что кодирование в сравнении с простым усреднением позволяет уменьшить уровень шума в несколько раз, что подтверждается теоретически (п.3.1.5). Выделяется полезная составляющая сигнала, за счет уменьшения уровня шума тем самым повышается соотношение сигнал-шум. Далее произведем фильтрацию сигналов, для исключения резких выбросов.

3.2.2.2 Визуализация и расчет статистических характеристик сигнала после кодирования и фильтрации

Графическое изображение импульсов стока и антистока после цифровой фильтрации представлены на рисунке 31 а-б. Их статистические характеристики (среднее арифметическое и медиана) для каждой последовательности и для суммы четырех последовательностей представлены в таблице 4.



а) четыре импульса стоксовых компонент Рамановского рассеивания



б) четыре импульса антистоксовых компонент Рамановского рассеивания

Рисунок 31 - Графическое представление закодированных данных после фильтрации

Таблица 4 - Значения статистических характеристик сигнала после кодирования и фильтрации

Номер импульса	Стоксова компонента Рамановского рассеивания		Антистоксова компонента Рамановского рассеивания		Отношение стокс-антистокс	
	Среднее арифметическое	Медиана	Среднее арифметическое	Медиана	Среднее арифметическое	Медиана
1	0,20	0,20	0,30	0,30	0,67	0,67
2	0,18	0,18	0,28	0,28	0,64	0,64
3	0,17	0,17	0,30	0,30	0,57	0,57
4	0,20	0,20	0,33	0,33	0,60	0,60
Сумма	0,19	0,19	0,30	0,30	0,63	0,63

Комбинация двух способов избавления от шума в сигнале (кодирование с помощью матриц Адамара и фильтрацию с помощью медианного фильтра), дает более четкий сигнал, шумовая дорожка стала намного уже, при этом сохраняя его форму, т.е. выделяя полезную составляющую сигнала, по значениям, которой можно определить измеренную температуру распределенным оптоволоконным датчиком.

Сигнал до кодирования имеет различные значения среднего арифметического и медианы, но т.к. для расчета температуры необходимо брать отношения стокс-антистокс, то данные виды оценок не сильно различаются, следовательно, отдать предпочтение одному из вариантов

усреднения стоит только после того, как будет произведен окончательный пересчет в значение температуры.

При использовании кодирования среднее арифметическое и медиана не отличаются это объясняется тем, что после кодирования сигнал не имеет выбросов, значит при выборе усреднения можно воспользоваться любым видом усреднения.

3.3 Экспериментальное подтверждение зависимости температурного и пространственного разрешения от уровня шума

Проведем измерение комнатной температуры 23 °С с помощью распределенного оптоволоконного датчика, длина волокна составляет 4 км. Произведем измерения сначала при запуске в волокно импульсов и не подвергая их кодированию, затем закодируем импульсы и пошлем с помощью лазера закодированную последовательность импульсов в волокно. Кодирование произведем с помощью 256 бит, т.е. в волокно будет посылаться 256 импульсов. На рисунке 32 представлена зависимость изменение отношения стокс-антистокс от расстояния.

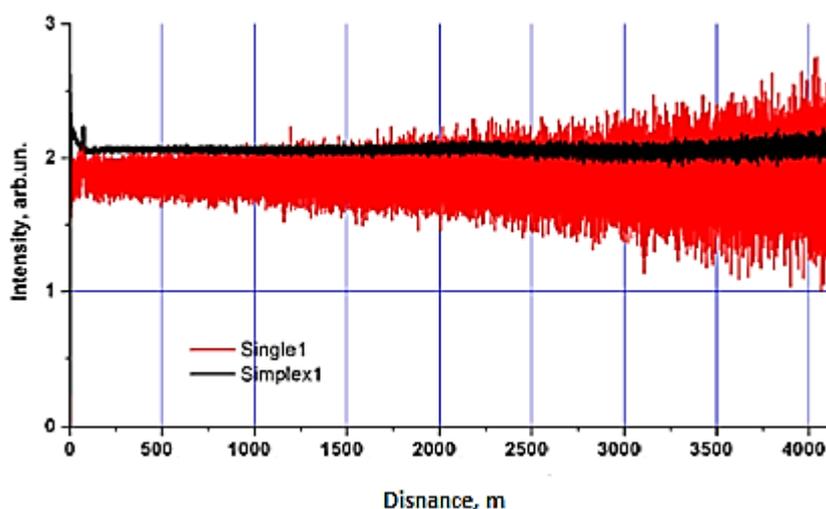


Рисунок 32 – Отношение сигналов перед кодирование и после при измерении комнатной температуры

Конкретное значение температуры измерить на данном этапе работы не представляется возможным в связи с не проведенной калибровкой распределенного оптоволоконного устройства измерения температуры. Поэтому вместо значения температуры берем отношением стокс-антисток, которое характеризует измеряемое значение температуры.

При посылке в волокно не кодированных данных с увеличением расстояния шум увеличивается. Это объясняется тем, что шум в сигнале накапливается и чем больше времени занимает прохождение сигнала через оптоволокно, тем зашумленнее сигнал и сложнее измерить температуру в волокне на большом расстоянии. Но если в волокно посылать предварительно закодированные данные, то уровень шума значительно снижается, даже с увеличением расстояния шум увеличивается не значительно, что может благоприятно повлиять на точность измерения и на пространственное и температурное разрешение. Следовательно, измерять температуру на дальних расстояниях рекомендуется при выполнении кодирования посылаемых в волокно импульсов.

Произведём измерения при изменении температуры на 10 °С. Также посылая в волокно сигналы без кодирования и сигналы, закодированные с помощью матриц Адамара. На рисунке 33 представлена зависимость изменения отношения стокс-антисток от расстояния.

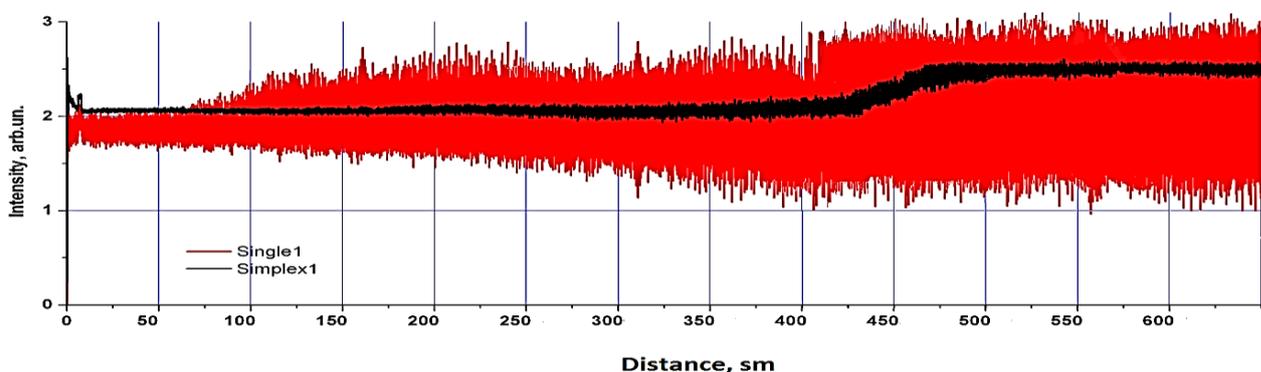


Рисунок 33 - Отношение сигналов перед кодирование и после при изменении температуры на 10 °С

Данный рисунок показывает, что при изменении температуры, сигнал, который был закодирован реагирует на это изменение, а сигнал не закодированный из-за большого уровня шума, не реагирует на это изменение, следовательно, разрешение, которое показывает наименьшее изменение измеряемой величины, которое является причиной заметного изменения соответствующего показания повысилось при применении кодирования к посылаемому сигналу.

На расстоянии 4 м от начала волокна изменяется температура, из-за высокого уровня шума сигнал без кодирования не отражает это изменение и невозможно определить на каком расстоянии происходит изменение температуры, а при кодировании данных, видим, что сигнал изменяется на протяжении от 4 м до 4,5 м, следовательно, пространственное разрешение с применением метода кодирования посылаемых импульсов в волокно позволяет повысить как температурное разрешение и пространственное разрешение, как минимум на 0,5 м.

Произведём измерения при изменении температуры еще на 10 °С. Также посылая в волокно сигналы без кодирования и сигналы, закодированные с помощью матриц Адамара. На рисунке 34 представлена зависимость изменения отношения стокс-антистокс от расстояния.

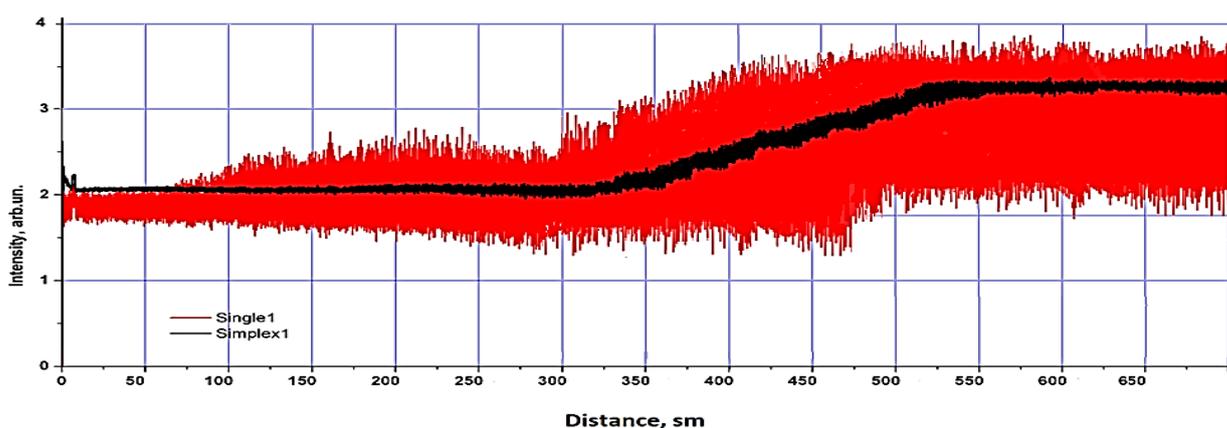


Рисунок 34 - Отношение сигналов перед кодирование и после при изменении температуры 10 °С

На данном рисунке показывает, также, как и на предыдущем заметно изменение кодированного сигнала при увеличении температуры, но и заметно изменение не кодированного сигнала, несмотря на его высокий уровень шума. Но среднее значения сигналов при этих двух методах отличаются друг от друга, так черный сигнал имеет среднее значение отношения стокс-антистокс 3,25, а среднее значение красного сигнала 3. Это объясняется тем, что сигнал зашумленный без кодирования смещает среднее значение.

Кодированный и не кодированный сигнал при данном изменении температуры позволяет измерить на каком расстоянии происходит рост температуры, что говорит о примерно одинаковом пространственном разрешении, но о температурном разрешении такого сказать нельзя по данному графику, т.к. значение средних двух сигналов отличаются друг от друга.

4 Финансовый менеджмент, ресурс эффективность и ресурсосбережение

В данном разделе рассчитываются технико-экономические показатели разработанного метода обработки результатов измерения в распределенных сенсорных линиях.

Данная тема является актуальной, т.к. подобные распределённые сенсорные линии измерения температуры являются одними из самых востребованных систем в различных областях техники, где необходимо провести измерения в условиях агрессивных сред или повышенных температур.

В отличие от других подобных систем к разработанной системе была применена программная обработка результатов измерения, что позволяет сократить затраты на приобретение аппаратной части для получения тех же результатов.

Для расчета экономической эффективности данной системы необходимо вычислить его себестоимость, рассчитать цену, наценку и выявить чистую прибыль.

4.1 Определение себестоимости разработки методики обработки результатов измерения в распределенных сенсорных линиях

Цена разработки данного алгоритма обработки результатов измерения системы включает в себя:

- основные материалы;
- электроэнергию на технологические цели;
- оплату труда;
- отчисления на социальные нужды;
- амортизационные отчисления;
- прочие расходы.

4.1.1 Расчет материальных затрат

Стоимость материалов определяется методом сметного калькулирования, основанном на прямом определении затрат по отдельным статьям по формуле (21).

$$Z_m = (1 + k_T) \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расxi} , \quad (21)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расxi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Таблица 5 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Кол - во	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
Заправка картриджа	шт.	1	300	300
Бумага	пачка	1	250	250
Итого			550	550

4.1.2 Затраты по основной заработной плате исполнителей темы

4.1.2.1 Определение трудоемкости выполнения работ основными исполнителями темы

Для расчета затрат на оплату труда на этапе проектирования необходимо сначала определить продолжительность каждой работы (начиная с составления технического задания (ТЗ) и до оформления документации включительно). Продолжительность работ ($t_{ож}$) определяется либо по нормативам (с использованием специальных справочников) для каждого исполнителя в отдельности, либо расчетом с помощью экспертных оценок по формуле (22).

$$t_{ож} = \frac{3t_{\min} + 2t_{\max}}{5}, \quad (22)$$

где t_{\min} - минимальная трудоемкость работ, ч.-дн.;

t_{\max} - максимальная трудоемкость работ, ч.-дн.

Для выполнения перечисленных в таблице 2 работ требуются специалисты:

- инженер;
- научный руководитель.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести в календарные дни. Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях ведется по формуле (23).

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} \cdot K_{Д}, \quad (23)$$

где $t_{ож}$ – трудоемкость работы, чел/дн.;

$K_{ВН}$ – коэффициент выполнения работ, равный единице;

$K_{Д}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсации и согласование работ ($K_{Д} = 1.2$).

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле (24).

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot T_{К} \quad (24)$$

где $T_{РД}$ – продолжительность выполнения этапа в рабочих днях;

$T_{КД}$ – продолжительность выполнения этапа в календарных днях;

$T_{К}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле (25).

$$T_{К} = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}}, \quad (25)$$

где $T_{КАЛ}$ – календарные дни ($T_{КАЛ} = 366$);

$T_{ВД}$ – выходные дни ($T_{ВД} = 52$);

$T_{ПД}$ – праздничные дни ($T_{ПД} = 12$).

Таким образом, по формуле (5) $T_k=1,212$.

В таблице 6 приведены длительность этапов работ и число исполнителей, занятых на каждом этапе.

Таблица 6 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Постановка задачи	НР	НР – 100%
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	НР, И	НР – 100% И – 10%
Разработка календарного плана	НР, И	НР – 30% И – 100%
Обсуждение литературы	НР, И	НР – 50% И – 100%
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	НР – 30% И – 100%
Изучение возможных методов обработки результатов измерения сигнала полученного с устройства опроса распределенной сенсорной линии	НР, И	НР – 30% И – 100%
Выбор метода обработки результатов измерения	НР, И	НР – 20% И – 100%
Выбор программного обеспечения для реализации метода обработки результатов измерения	НР, И	НР – 50% ИП – 100%
Разработка алгоритма программы для реализации метода обработки результатов измерения	НР, И	НР – 70% И – 100%
Разработка программы в среде графического программирования LabVIEW для обработки результатов измерения	НР, И	НР – 30% И – 100%
Отладка программы	И	НР – 30% И – 100%
Проведение испытаний на функционирование	И	И – 100%
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	И – 100%
Оформление презентационного материала	И	И – 100%

В таблице 7 определим трудозатраты на выполнение проекта.

Таблица 7 – Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Длительность работ, чел/дн.			
					$T_{РД}$		$T_{КД}$	
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	НР	И	НР	И
Постановка задачи	НР	2	4	2,8	3,36	-	4,07	0,00
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	НР, И	2	3	2,4	2,88	0,29	3,49	0,35

Продолжение таблицы 7

Разработка календарного плана	НР, И	2	4	2,8	1,01	3,36	1,22	4,07
Обсуждение литературы	НР, И	3	6	4,2	2,52	5,04	3,05	6,11
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	30	45	36	12,96	43,20	15,71	52,36
Изучение возможных методов обработки результатов измерения	НР, И	7	14	9,8	3,53	11,76	4,28	14,25
Выбор метода обработки результатов измерения	НР, И	6	9	7,2	1,73	8,64	2,09	10,47
Выбор программного обеспечения для реализации метода обработки результатов измерения	НР, И	4	7	5,2	3,12	6,24	3,78	7,56
Разработка алгоритма программы для реализации метода обработки результатов измерения	НР, И	4	6	4,8	4,03	5,76	4,89	6,98
Разработка программы в среде графического программирования LabVIEW для обработки результатов измерения	НР, И	21	25	22,6	8,14	27,12	9,86	32,87
Отладка программы	И	7	14	9,8	3,53	11,76	4,28	14,25
Проведение испытаний на функционирование	И	2	4	2,8	-	3,36	0,00	4,07
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	6	9	7,2	-	8,64	0,00	10,47
Оформление презентационного материала	И	5	6	5,4	-	6,48	0,00	7,85
Подведение итогов	НР, И	5	8	6,2	4,46	7,44	5,41	9,02
Итого:				129,2	51,264	149,09	51,26	149,09

Таблица 8 иллюстрирует получившийся линейный график работ на основе рассчитанного для инженера и научного руководителя времени $T_{кд}$.

Таблица 8 –Линейный график работ

Вид работ	Т _{кд}		Продолжительность выполнения работ																							
			нояб			дек			январь			февр			март			апрель			май			июнь		
	НР	И	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2		
Постановка задачи	4,07	0,00	█																							
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	3,49	0,35	█																							
Разработка календарного плана	1,22	4,07		█																						
Обсуждение литературы	3,05	6,11			█																					
Подбор и изучение материалов по тематике	15,7 1	52,3 6			█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	
Изучение возможных методов сорной линии	4,28	14,2 5								█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	
Выбор метода обработки результатов измерения	2,09	10,4 7												█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	
Выбор программного обеспечения	3,78	7,56																								
Разработка алгоритма программы	4,89	6,98																								
Разработка программы в LabVIEW	9,86	32,8 7																								
Отладка программы	4,28	14,2 5																								
Проведение испытаний на функционирование	0,00	4,07																								
Оформление расчетно-пояснительной записки	0,00	10,4 7																								
Оформление презентационного материала	0,00	7,85																								

4.1.2.2 Расчет заработной платы основных исполнителей проекта

Размер основной заработной платы устанавливается, исходя из численности исполнителей, трудоемкости и средней заработной платы за один рабочий день и рассчитывается по формуле (26).

$$ЗП_{\text{осн}} = \sum_{i=1}^n T_i \cdot СЗП \quad (26)$$

где n - количество участников в i -ой работе;

T_i - затраты труда (трудоемкость), необходимые для выполнения i -го вида работ, (дни);

СЗП - среднедневная заработная плата исполнителя, выполняющего i -ый вид работ, (руб/дней).

Среднедневная заработная плата рассчитывается как отношение месячного оклада к количеству рабочих дней в месяце.

Произведение трудоемкости на сумму дневной заработной платы определяет затраты по зарплате для каждого работника на все время разработки. Пример расчета основной заработной платы приведен в таблице 9.

Таблица 9 – Затраты на основную заработную плату

Исполнитель	Оклад (руб.)	Среднедневная заработная плата (руб./дн.)	Трудоемкость, раб. дн.	Основная заработная плата (руб.)
Руководитель	34 595,56	1572,5	52	81 770
Инженер	7 454,13	338,8	130	44 040
Итого				125 814

4.1.3 Затраты по дополнительной заработной плате

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле (27):

$$З_{доп} = K_{доп} \cdot ЗП_{осн}, \quad (27)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Таким образом, по формуле (12) $З_{доп} = 12\,265$ руб. – для руководителя и $З_{доп} = 6\,606$ руб. – для инженера.

Итого, 18 871 руб.

4.1.4 Отчисления во внебюджетные фонды

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления органам государственного социального страхования (ФСС), Пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (федеральным (ФФОМС) и территориальным (ТФОМС)) от затрат на оплату труда работников, объединенные в форме единого социального платежа.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы (28):

$$З_{отч} = (ЗП_{осн} + ЗП_{доп}) \cdot 0,3, \quad (28)$$

где $k_{соц}$ – коэффициент, учитывающий социальные выплаты организации. В настоящее время $k_{соц} = 0,3$.

Итого, суммарные отчисления составят 43 405 руб.

4.1.5 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию при работе оборудования. Затраты на электроэнергию при работе оборудования для технологических целей рассчитываются по формуле (29):

$$\mathcal{E}_{\text{ОБ}} = P_{\text{ОБ}} \cdot \text{Ц}_{\mathcal{E}} \cdot t_{\text{ОБ}}, \quad (29)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ОБ}}$ – затраты на электроэнергию, потребляемую оборудованием, руб.;

$P_{\text{ОБ}}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$\text{Ц}_{\mathcal{E}}$ – тарифная цена за 1 кВт·час, $\text{Ц}_{\mathcal{E}} = 5,257$ руб/кВт·ч;

$t_{\text{ОБ}}$ – время работы оборудования, час.

Время работы оборудования вычисляется на основе данных для $T_{\text{РД}}$ таблицы 3 для инженера из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле (30):

$$P_{\text{ОБ}} = P_{\text{УСТ.ОБ}} \cdot K_{\text{С}}, \quad (30)$$

где $P_{\text{УСТ.ОБ}}$ – установленная мощность оборудования, кВт;

$K_{\text{С}}$ – коэффициент спроса, зависящий от количества, загрузки групп электроприемников.

Для технологического оборудования малой мощности $K_{\text{С}} = 1$.

Затраты на электроэнергию для технологических целей приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Затраты на электроэнергию для технологических целей

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{ОБ}}$, час	Потребляемая мощность $P_{\text{ОБ}}$, кВт	Затраты $\mathcal{E}_{\text{ОБ}}$, руб.
Персональный компьютер	880	0,3	1388
Струйный принтер	30	0,1	16
Итого:			1404

4.1.6 Расчет амортизационных расходов

Данная статья отражает сумму амортизационных отчислений на полное восстановление основных средств, используемых при реализации проекта. К амортизируемым основным фондам относится оборудование, стоимость которого выше 20000 рублей и срок эксплуатации более года. В противном случае оно включается в материальные расходы.

Амортизационные отчисления рассчитываются по формуле (31):

$$C_{AM} = \frac{N_A \cdot Ц_{OB}}{F_D} \cdot t_{BT} \cdot n, \quad (31)$$

где N_A – годовая норма амортизации, $N_A = 50\%$;

$Ц_{OB}$ – цена оборудования, $Ц_{OB} = 40000$ руб.;

F_D – действительный годовой фонд рабочего времени, $F_D = 2416$ часов;

t_{BT} – время работы вычислительной техники при создании программного продукта, $t_{BT} = 504$ часа;

n – число задействованных ПЭВМ, $n = 1$.

Итак, затраты на амортизационные отчисления составили:

$$C_{ам} = \frac{0,50 \cdot 40000 \cdot 504}{2416} = 4172,2 \text{ руб.}$$

4.1.7 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле (32):

$$З_{накл} = (ЗП_{осн} + ЗП_{доп} + З_{отч}) \cdot k_{нр}, \quad (32)$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Причем $k_{нр}=0,5$.

Следовательно, $Z_{накл} = 94\,045$ руб.

Подсчитаем величину себестоимости разработанной системы. Величина себестоимости системы является основой для обоснования ее цены, которая при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела цены на научно-техническую продукцию.

Произведем расчет себе стоимости и оформим результаты в таблицу 11.

Таблица 11 – Расчет себестоимости разработки метода обработки результатов измерения температуры в распределённых сенсорных линиях

Наименование статьи	Сумма, руб.
Материальные затраты	550
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	125 814
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	18 871
Затраты на электроэнергию для технологических целей	1 404
Отчисления во внебюджетные фонды	43 405
Амортизация основных средств	4 172
Накладные расходы	94 045
Себестоимость проекта	288 261

4.1.8 Полная смета затрат на выполнение разработки

4.1.8.1 Прибыль

Прибыль составляет 57 652 рублей (20 %) от расходов на разработку.

4.1.8.2 НДС

НДС составляет 18% от суммы затрат на разработку. Сумма НДС составила 51 886 руб.

Полная смета затрат приведена в таблице 12.

Таблица 12 – Полная смета затрат

Наименование статьи	Затраты, руб.
Материальные затраты	550
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	125 814
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	18 871
Затраты на электроэнергию для технологических целей	1404
Отчисления во внебюджетные фонды	43 405
Амортизация основных средств	4172
Накладные расходы	94 045
Общая себестоимость проекта	288 261
Прибыль	57 652
НДС	51 886
Цена разработки	397 799

4.2 Оценка эффективности от внедрения разработки

Экономический эффект данной работы трудно оценить в ее собственных рамках, требуется более подробный анализ, предполагающий отдельного серьезного исследования с привязкой к конкретному объекту, в известных масштабах. Эффект работы можно выразить через точность и надежность системы в сравнении с другими возможными методами обработки сигнала, получаемого с устройства опроса сенсорной оптической системы. Подобные системы применяются в различных областях, например, в нефтегазовой отрасли для контролирования температуры двигателей аппараты воздушного охлаждения газа и пылеуловителей, в авиакосмическом приборостроении для лабораторных и стендовых испытаний, проводимых в интересах отрасли авиапромышленности при тестировании стойкости составных элементов летательных аппаратов к внешним условиям, в энергетике для контролирования режимов работы линии электропередач на основании анализа

профиля температуры. Поэтому точный результат измерения температуры с ничтожной погрешностью необходим для прогнозирования аварий и, также точная локализация мест возможных аномальных состояний поможет за короткий срок устранить проблему, предупредить или предотвратить негативные последствия, сэкономить средства и ресурсы.

5 Социальная ответственность

Обеспечение безопасной жизнедеятельности человека в значительной степени зависит от правильной оценки опасных, вредных производственных факторов. Одинаковые по тяжести изменения в организме человека могут быть вызваны различными причинами. Это могут быть какие-либо факторы производственной среды, чрезмерная физическая и умственная нагрузка, нервно-эмоциональное напряжение, а также разное сочетание этих причин.

В настоящей работе предложен способ повышения метрологических характеристик устройств опроса сенсорных оптоволоконных датчиков измерения температуры, полученная информация с устройства визуализируется на компьютере, состоящего из системного блока и монитора, поэтому выполняемые работы сводятся к взаимодействию с персональным компьютером. Работа производится сидя, при небольшом физическом напряжении. Рабочее место представляет собой компьютерный стол с персональным компьютером, следовательно, можно выделить следующих физические факторы, влияющих на здоровье человека: длительное неизменное положение тела, напряжение глаз, свет, шум, микроклимат, воздействие электромагнитных и электростатических полей (ЭМП и ЭСП).

В данной главе будет разработан комплекс мероприятий, который позволит свести к минимуму или ликвидировать негативные влияния факторов, возникающие при работе с компьютером. А также описан метод обработки результатов измерений оптоволоконных сенсорных систем для мониторинга опасных техногенных объектов и снижения аварийности.

5.1 Техногенная безопасность

В настоящее время эффективная профессиональная деятельность невозможна без обеспечения безопасности человека в среде обитания.

Учитывая, что превращение биосферы в техносферу привело к стремительному росту опасностей и чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, вопросы защиты человека (безопасность) и окружающей природной сферы (экологичность) должны решаться специалистами всех отраслей.

Вредные проявления факторов в рассматриваемой рабочей зоне обусловлены электромагнитными, электростатическими излучениями от ПК. Поэтому с точки зрения безопасности важно научиться пользоваться компьютером и правильно организовать работу.

Отрицательное влияние компьютера на человека является комплексным, во время работы за компьютером на организм влияет целый ряд негативных физических и психологических факторов, а именно:

- длительное пребывание в одном и том же (сидячем) положении и повторение однотипных движений, монотонность труда;
- утомление глаз, повышенная нагрузка на зрение;
- умственное перенапряжение, обусловленное характером решаемых задач;
- повышенная пульсация светового потока;
- повышенный уровень электромагнитных излучений различных частот от монитора и системного блока;
- повышенный уровень шума и вибрации на рабочем месте;
- повышенный уровень статического электричества при неправильно спроектированной рабочей зоне;
- опасный уровень напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека;

Далее более подробно рассмотрим опасные и вредные факторы, воздействующие на метролога, возникающие в связи с разработкой, данной системы.

5.1.1 Микроклимат рабочей зоны метролога

Микроклимат производственных помещений - это климат внутренней среды этих помещений, который определяется действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха. Лаборатория является помещением, относящимся к категории помещений где, выполняются легкие физические работы, поэтому должны соблюдаться требования, приведенные в таблице 13 в соответствии с [58].

Таблица 13 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений для категории работ Ia.

Период года	Наименование параметра			
	Температура воздуха, С°	Температура поверхностей, С°	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с.
Холодный	22-24	21-25	40-60	0,1
Теплый	23-25	22-26	40-60	0,1

В таблице 14 приведены фактические значения температуры и влажности на рабочем месте.

Таблица 14 – Фактические величины температуры на рабочем месте для категории работ Ia.

Период года	Наименование параметра	
	Температура воздуха, С°	Относительная влажность воздуха, %
Теплый	24	45

Следовательно, фактические значения температуры и влажности не выходят за установленные границы.

Для создания и автоматического поддержания в лаборатории независимо от наружных условий оптимальных значений температуры, влажности, чистоты и скорости движения воздуха, в холодное время года используется водяное отопление, в теплое время года применяется кондиционирование воздуха.

Кондиционер представляет собой вентиляционную установку, которая с помощью приборов автоматического регулирования поддерживает в помещении заданные параметры воздушной среды.

5.1.2 Освещение рабочего места

Работа, выполняемая с использованием вычислительной техники, относится к III разряду зрительной работы, имеют следующие недостатки:

- отражение экрана;
- вероятность появления прямой блескости;
- ухудшенная контрастность между изображением и фоном;

В связи с тем, что естественное освещение слабое, на рабочем месте применяются также искусственное освещение.

5.1.3 Воздействие шума на метролога. Защита от шума

В лаборатории, где работает метролог, низкий уровень общего шума. Источниками шумовых помех могут стать вентиляционные установки, кондиционеры, ЭВМ и его периферийные устройства. Длительное воздействие этих шумов отрицательно сказывается на эмоциональном состоянии персонала.

Согласно ГОСТ 12.1.003-83 [59] эквивалентный уровень звука не должен превышать 80 дБА. Для того, чтобы добиться этого уровня шума на рабочем месте применяется:

- облицовка потолка и стен звукопоглощающим материалом. Снижает шум на 6-8 дБ;
- рациональная планировка помещения;
- установка в компьютерных помещениях оборудования, производящего минимальный шум;

- экранирование рабочего места, путем постановки перегородок, диафрагм.

Защиту от шума следует выполнять в соответствии с ГОСТ 12.1.003-83 [59], а звукоизоляция ограждающих конструкций должна отвечать требованиям СП 23-103-2003 [60].

5.1.4 Опасность повышенного уровня напряженности электромагнитного поля

Электромагнитные поля, характеризующиеся напряженностями электрических и магнитных полей, наиболее вредны для организма человек. Основным источником этих проблем, связанных с охраной здоровья людей, использующих в своей работе автоматизированные информационные системы на основе персональных компьютеров, являются дисплеи (мониторы), они представляют собой источники наиболее вредных излучений, неблагоприятно влияющих на здоровье работника.

Предельно допустимые значения излучений от ЭВМ в соответствии с СанПиНом 2.2.2/2.4.1340-03 [58] приведены в таблице 15.

Таблица 15 - Допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ

Наименование параметров		ВДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	25 нТл
Электростатический потенциал экрана видеомонитора		500 В

На расстоянии 5-10 см от экрана и корпуса монитора уровни напряженности могут достигать 140 В/м по электрической составляющей, что значительно превышает допустимые значения.

Для предупреждения внедрения опасной техники все дисплеи должны проходить испытания на соответствие требованиям безопасности, например, международным стандартам MRP 2, TCO 99.

В рабочее время метролога при 8-ми часовой смене делаются перерывы и применяются защитные экраны для ЭВМ.

Для снятия заряда защитный экран, установленный на мониторе необходимо заземлить.

5.1.5 Электробезопасность. Статическое электричество

Помещение лаборатории по опасности поражения электрическим током можно отнести к 1 классу, т.е. это помещение без повышенной опасности (сухое, бес пыльное, с нормальной температурой воздуха, изолированными полами и малым числом заземленных приборов).

На рабочем месте метролога из всего оборудования металлическим является лишь корпус системного блока компьютера, но здесь используются системные блоки, отвечающие стандарту фирмы IBM, в которых кроме рабочей изоляции предусмотрен элемент для заземления и провод с заземляющей жилой для присоединения к источнику питания. Таким образом, оборудование обменного пункта выполнено по классу 1, в соответствии с правилами устройства электроустановок (ПУЭ).

Электробезопасность обеспечивается в соответствии с ГОСТ Р 12.1.019-2009 [62]. Опасное и вредное воздействие на людей электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей проявляется в виде электротравм.

Степень опасного и вредного воздействия на человека электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей зависит от:

- рода и величины напряжения и тока;
- частоты электрического тока;
- пути тока через тело человека;
- продолжительности воздействия на организм человека.

Электробезопасность в помещении лаборатории обеспечивается техническими способами и средствами защиты, а также организационными и техническими мероприятиями.

Рассмотрим основные причины поражения человека электрическим током на рабочем месте:

- прикосновение к металлическим нетоковедущим частям (корпусу, периферии компьютера), которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции;
- нерегламентированное использование электрических приборов;
- отсутствие инструктажа сотрудников по правилам электробезопасности.

В течении работы на корпусе компьютера накапливается статическое электричество. На расстоянии (5 - 10) см от экрана напряженность электростатического поля составляет (60-280) кВ/м, то есть в 10 раз превышает норму 20 кВ/м. Для уменьшения напряжённости применяются увлажнители и нейтрализаторы, антистатическое покрытия пола.

Кроме того, при неисправности каких-либо блоков компьютера, приборов корпус может оказаться под током, что может привести к электрическим травмам или электрическим ударам. Для устранения этого обеспечивается подсоединение металлических корпусов оборудования к заземляющей жиле.

5.1.6 Обеспечение электробезопасности техническими способами и средствами

Так как все токоведущие части ЭВМ и других приборов используемых метрологом изолированы, то случайное прикосновение к токоведущим частям исключено. Для обеспечения защиты от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут

оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции, применяется защитное заземление.

Заземление корпуса ЭВМ обеспечено подведением заземляющей жилы к питающим розеткам. Сопротивление заземления 4 Ом, согласно ПУЭ для электроустановок с напряжением до 1000 В.

5.1.7 Организационные и технические мероприятия по обеспечению электробезопасности

Основным организационным мероприятием является инструктаж и обучение безопасным методам труда, а также проверка знаний правил безопасности и инструкций в соответствии с занимаемой должностью применительно к выполняемой работе. При проведении незапланированного и планового ремонта вычислительной или любой другой техники выполняются следующие действия:

- отключение приборов от сети;
- проверка отсутствия напряжения.

После выполнения этих действий проводится ремонт неисправного оборудования. Если ремонт проводится на токоведущих частях, находящихся под напряжением, то выполнение работы проводится не менее чем двумя лицами с применением электрозащитных средств.

5.2 Региональная безопасность

Работа с ПК не влечет за собой негативных воздействий на окружающую среду, поэтому создание санитарно-защитной зоны и принятие мер по защите атмосферы, гидросферы, литосферы не являются необходимыми.

Исключением являются лишь случаи утилизации персонального компьютера как твердого отхода и как следствие загрязнение почвы или

выбросы в атмосферу загрязняющих веществ, углекислого газа, образование тепла в случае пожара.

При завершении срока службы ПК его можно отнести к отходам электронной промышленности. Переработка таких отходов осуществляется разделением на однородные компоненты, химическим выделением пригодных для дальнейшего использования компонентов и направлением их для дальнейшего использования (например, кремний, алюминий, золото, серебро, редкие металлы) согласно [63]. Пластмассовые части ПК утилизируются при высокотемпературном нагреве без доступа воздуха. Части компьютера, печатные платы, содержащие тяжелые металлы и замедлители горения могут при горении выделять опасные диоксиды. Поэтому для опасных отходов существуют специальные печи, позволяющие использовать теплоту сжигания. Но подобный способ утилизации является дорогостоящим, поэтому не стоит исключать вероятность образования токсичных выбросов.

Отходы, не подлежащие переработке и вторичному использованию подлежат захоронению на полигонах или в почве. Предельно допустимые концентрации токсичных веществ в почве (ПДКп, мг/кг) должны быть соблюдены в соответствии с [63].

5.3 Организационные мероприятия обеспечения безопасности

Рабочее место - это часть пространства, в котором метролог осуществляет трудовую деятельность, и проводит большую часть рабочего времени. Рабочее место, хорошо приспособленное к трудовой деятельности работника, правильно и целесообразно организованное, в отношении пространства, формы, размера обеспечивает ему удобное положение при работе и высокую производительность труда при наименьшем физическом и психическом напряжении.

Согласно ГОСТ 12.2.032-78 [64] конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов должно соответствовать антропометрическим, физическим и психологическим требованиям. Большое значение имеет также характер работы. В частности, при организации рабочего места метролога должны быть соблюдены следующие основные условия:

- оптимальное размещение оборудования, входящего в состав рабочего места;
- достаточное рабочее пространство, позволяющее осуществлять все необходимые движения и перемещения;
- необходимо естественное и искусственное освещение для выполнения поставленных задач;
- уровень акустического шума не должен превышать допустимого значения.

Главными элементами рабочего места метролога являются письменный стол и кресло. Основным рабочим положением является положение сидя. Поэтому для исключения возникновения заболеваний, связанных с малой подвижностью работника, необходимо иметь возможность свободной перемены поз. Также необходимо соблюдать режим труда и отдыха с перерывами, заполняемыми “отвлекающими” мышечными нагрузками на те звенья опорно-двигательного аппарата, которые не включены в поддержание основной рабочей позы.

По условиям работы рабочее место метролога относится к индивидуальному рабочему месту для работы сидя. Рабочее место метролога должно занимать площадь не менее 6 м, высота помещения должна быть не менее 4 м, а объем - не менее 20 м³ на одного человека.

Рабочий стул метролога должен быть снабжен подъемно-поворотным механизмом. Высота сиденья должна регулироваться в пределах (400 - 500) мм. Глубина сиденья должна составлять не менее 380 мм, а ширина - не менее 400 мм. Высота опорной поверхности спинки не менее 300 мм, ширина - не

менее 380 мм. Угол наклона спинки стула к плоскости сиденья должен изменяться в пределах (90 – 110)°.

5.4 Особенности законодательного регулирования проектных решений

Производственный экологический контроль (ПЭК) - непосредственная деятельность предприятий, организаций, учреждений по управлению воздействием на окружающую среду на основе описания, наблюдения, оценки и прогноза источников воздействия и отходов.

Производственный контроль проводится самим предприятием - природопользователем на своих объектах с целью обеспечения выполнения в процессе хозяйственной и иной деятельности требований природоохранного законодательства и соблюдения установленных нормативов в области охраны окружающей среды, а также самопроверки рациональности природопользования на своих объектах и выполнения планов мероприятий по ограничению и уменьшению воздействия на окружающую среду. Содержание такого контроля, прежде всего, зависит от специфики деятельности предприятия.

Требования по осуществлению ПЭК в соответствии с [65]:

- ПЭК в области охраны окружающей среды осуществляется в целях обеспечения выполнения в процессе хозяйственной и иной деятельности мероприятий по охране окружающей среды, рациональному использованию и восстановлению природных ресурсов, а также в целях соблюдения требований в области охраны окружающей среды, установленных законодательством в области охраны окружающей среды;

- субъекты хозяйственной и иной деятельности обязаны представлять сведения о лицах, ответственных за проведение производственного экологического контроля, об организации экологических служб на объектах

хозяйственной и иной деятельности, а также результаты производственного экологического контроля в соответствующий орган государственного надзора.

Объектами производственного экологического контроля являются:

- стационарные и передвижные источники выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух;
- системы очистки отходящих газов;
- источники сбросов загрязняющих веществ в окружающую природную среду (в водные объекты, на рельеф, в подземные горизонты), в системы канализации и сети водоотведения;
- системы очистки отработанных вод;
- системы оборотного и повторного водоснабжения;
- источники образования отходов производства;
- объекты размещения и утилизации отходов (площадки временного хранения, стационарные полигоны);
- склады и хранилища сырья, материалов, реагентов;
- объекты окружающей среды, расположенные в пределах промышленной площадки, территории, где осуществляется природопользование, санитарно-защитной зоны;
- природные ресурсы;
- природные среды, загрязненные химическими веществами по вине природопользователя.

Проводить производственный экологический контроль в соответствии с [65] обязана экологическая служба, которая в соответствии с [66] должна быть организована соответствующим юридическим лицом. Сведения об организации производственного экологического контроля предприятия обязаны представлять в органы исполнительной власти и органы местного самоуправления.

В соответствии с [65] экологический контроль преследует следующие задачи:

- обеспечения органами государственной власти Российской Федерации, органами государственной власти субъектов Российской Федерации, органами местного самоуправления, юридическими и физическими лицами исполнения законодательства в области охраны окружающей среды;

- соблюдения требований, в том числе нормативов и нормативных документов, в области охраны окружающей среды;

- обеспечения экологической безопасности.

Охрана окружающей среды не ограничивается соблюдением требований соответствующего законодательства. Для разработки научных прогнозов и планов сохранения и восстановления окружающей среды, оценки последствий негативного воздействия на окружающую среду деятельности человека, совершенствования законодательства в области охраны окружающей среды необходимо проведение научных исследований в области охраны окружающей среды. Кроме того, в [65] предусмотрены основы создания экологической культуры.

За нарушение законодательства в области охраны окружающей среды устанавливается имущественная, дисциплинарная, административная и уголовная ответственность в соответствии с законодательством. Споры в области охраны окружающей среды разрешаются в судебном порядке в соответствии с законодательством согласно [65].

В организации должна быть сформирована комиссия по чрезвычайным ситуациям (КЧС). В ряде случаев при отсутствии КЧС предусмотрено возложение координирующих функций на руководителя организации согласно [67].

Основными задачами объектовой КЧС являются в соответствии с [67]:

- руководство разработкой и осуществлением мероприятий по предупреждению ЧС, повышению надежности работы объекта, обеспечению устойчивости его функционирования при возникновении ЧС;

- организация работ по созданию на потенциально опасном объекте локальной системы оповещения, поддержание ее в постоянной готовности;

- обеспечение готовности органов управления, сил и средств к действиям при чрезвычайных ситуациях, руководство их ликвидацией и эвакуацией персонала объекта;
- руководство созданием и использованием резервов финансовых и материальных ресурсов для ликвидации чрезвычайных ситуаций;
- организация подготовки руководящего состава.

5.5 Пожарная безопасность

Степень огнестойкости зданий принимается в зависимости от их назначения, категории по взрывопожарной и пожарной опасности, этажности, площади этажа в пределах пожарного отсека.

Здание, в котором находится лаборатория по пожарной опасности строительных конструкций относится к категории К1 (малопожароопасное), поскольку здесь присутствуют горючие (книги, документы, мебель, оргтехника и т.д.) и трудносгораемые вещества (сейфы, различное оборудование и т.д.), которые при взаимодействии с огнем могут гореть без взрыва.

По конструктивным характеристикам здание можно отнести к зданиям с несущими и ограждающими конструкциями из естественных или искусственных каменных материалов, бетона или железобетона, где для перекрытий опускается использование деревянных конструкций, защищенных штукатуркой или трудногорючими листовыми, а также плитными материалами.

Следовательно, здание имеет третью (III) степень огнестойкости.

Помещение лаборатории по функциональной пожарной опасности относится к классу Ф 4.2 – высшие учебные заведения, учреждения повышения квалификации.

5.5.1 Причины возникновения пожара

Пожар в лаборатории, может привести к очень неблагоприятным последствиям (потеря ценной информации, порча имущества, гибель людей и т.д.), поэтому необходимо:

- выявить и устранить все причины возникновения пожара;
- разработать план мер по ликвидации пожара в здании;
- план эвакуации людей из здания.

Причинами возникновения пожара могут быть:

- неисправности электропроводки, розеток и выключателей, которые могут привести к короткому замыканию или пробое изоляции;
- использование поврежденных (неисправных) электроприборов;
- использование в помещении электронагревательных приборов с открытыми нагревательными элементами;
- возникновение пожара вследствие попадания молнии в здание;
- возгорание здания вследствие внешних воздействий;
- неаккуратное обращение с огнем и несоблюдение мер пожарной безопасности.

5.5.2 Профилактика пожара

Пожарная профилактика представляет собой комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение безопасности людей, на предотвращении пожара, ограничение его распространения, а также создание условий для успешного тушения пожара. Для профилактики пожара чрезвычайно важна правильная оценка пожароопасности здания, определение опасных факторов и обоснование способов и средств пожар предупреждения и защиты.

Одно из условий обеспечения пожаробезопасности - ликвидация возможных источников воспламенения.

В лаборатории источниками воспламенения могут быть неисправное электрооборудование, неисправности в электропроводке, электрических розетках и выключателях.

Для исключения возникновения пожара по этим причинам необходимо вовремя выявлять и устранять неисправности, проводить плановый осмотр и своевременно устранять все неисправности и неисправные электроприборы и не использовать неисправные электроприборы.

Обогревание помещения открытыми электронагревательными приборами могут привести к пожару, т.к. в помещении находятся бумажные документы и справочная литература в виде книг, пособий, а бумага - легковоспламеняющийся предмет.

В целях профилактики пожара предлагается не использовать открытые обогревательные приборы в помещении лаборатории;

В целях уменьшения вероятности возникновения пожара вследствие короткого замыкания необходимо, чтобы электропроводка была скрытой.

В летний период во время грозы возможно попадание молнии вследствие чего возможен пожар. Во избежание этого рекомендуется установить на крыше здания молниеотвод.

Несоблюдение мер пожарной безопасности и курение в помещении также может привести к пожару. Поэтому курения в помещении лаборатории предлагается категорически запретить.

В целях предотвращения пожара также предлагается проводить с инженерами, работающими в лаборатории, противопожарный инструктаж.

В случае возникновения пожара необходимо отключить электропитание, вызвать по телефону пожарную команду, эвакуировать людей из помещения согласно плану эвакуации и приступить к ликвидации пожара огнетушителями.

При наличии небольшого очага пламени можно воспользоваться подручными средствами с целью прекращения доступа воздуха к объекту возгорания.

В производственных помещениях должно быть не менее двух эвакуационных выходов.

5.6 Влияние применения оптоволоконных сенсорных систем на экологию и охрану труда

Мониторинг температуры для прогнозирования аварийных ситуаций и обслуживания оборудования является актуальной проблемой в настоящее время. Наиболее перспективным решением этой задачи является применение оптоволоконных систем измерения температуры, обладающие рядом преимуществ перед другими системами.

Типичными случаями применения оптоволоконных температурных сенсоров являются сферы, связанные с безопасностью, например:

- системы пожарного оповещения в автомобильных, железнодорожных или сервисных туннелях;
- термический контроль силовых кабелей и воздушных линий передач для оптимизации производственных отношений;
- повышение эффективности нефтяных и газовых скважин;
- обеспечение безопасного рабочего состояния промышленных индукционных плавильных печей;
- контроль герметичности контейнеров с сжиженным природным газом на судах в разгрузочных терминалах;
- обнаружение утечек на плотинах и запрудах;
- контроль температуры при химических процессах;
- обнаружение утечек в трубопроводах.

Использование оптоволоконных сенсорных систем в различных сферах человеческой деятельности способствует уменьшению или отсутствию количества критических отказов, пожаров контролируемых объектов, негативно влияющих на экологию, а также уменьшению или отсутствию пострадавших людей, обсуживающих или использующих данные объекты.

Но стоит учесть, что информация, поступающая с подобной информационно-измерительной системы должна правильно и своевременно обрабатываться, поэтому одной из важнейших задач является обработка полученных результатов измерения и уменьшение их погрешности, тем самым увеличив вероятность своевременного принятия мер по предотвращению техногенных аварий, критических выходов оборудования из строя и негативного влияния на человека и экологию.

Заключение

Процесс выполнения данной работы состоял из нескольких основных стадий. На первой стадии был изучен объект исследования – оптоволоконный датчик измерения температуры, его типы, преимущества и основные характеристики. На втором этапе были проанализированы два метода обработки сигнала, получаемого с оптоволоконного датчика. Теоретически доказано преимущества метода кодирования, с использованием матриц Адамара для подавления шума при оптическом измерении. На третьей стадии с помощью графической среды программирования LabVIEW было проведено сравнение статистических характеристик и визуального представления сигнала до и после кодирования, также была применена фильтрация с использованием медианного фильтра для устранения резких выбросов в экспериментальных данных.

Основываясь на полученных теоретических и экспериментальных данных можно сделать несколько основных выводов: кодирование данных является простым и эффективным способом повышения соотношения сигнал-шум при оптоволоконном измерении, а применение фильтрации помогает устранить выбросы и достичь еще более высокого пространственного и температурного разрешения в измерителях температуры такого рода.

Так же расчет статистических характеристик таких как среднее арифметическое и медианы, показал, что оценивание данных через медианную оценку более точно нежели через среднее арифметическое, т.е. когда в вариационном ряду есть отдельные члены, которые намного больше или меньше остальных, а объём совокупности невелик то медианная оценка более устойчива к выбросам и тем самым не привносит в результат измерения дополнительную ошибку.

Разработанный алгоритм обработки данных получаемых с устройства опроса оптоволоконного датчика температуры универсален для применения к

любым оптоволоконным датчика температуры, не требует специального аппаратного обеспечения и дополнительных денежных затрат.

Список публикаций

1 Кузнецова Е.Ю., Стукач О. В. Волоконно-оптический датчик измерения температуры. // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 т., Томск, 12-14 Ноября 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - Т. 1 - С. 53-55.

2 Кузнецова Е.Ю., Стукач О. В. Фильтрация и обработка сигнала на Labview рамановского датчика для повышения точности измерения температуры. // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 т., Томск, 9-13 Ноября 2015. - Томск: ТПУ, 2016 - Т. 1 - С. 166-167.

3 Кузнецова Е.Ю., Стукач О. В. Усовершенствованная схема фильтрации оптического сигнала в измерителях температуры. // Материалы 54-ой Международной научной студенческой конференции МНСК-2016: Радиотехника, электроника, связь: Новосибирск, 16-20 Апреля 2016. – Новосибирск: НГТУ, 2016 – С. 25.

4 Кузнецова Е.Ю., Алексеенко З.Н. Моделирование распределенного оптоволоконного датчика в Labview с целью повешения пространственного и температурного разрешения. // Автоматика и программная инженерия – Новосибирск, 2016 №1 – С. 24-27.

Список используемых источников

- 1 Оптическая связь // Гауер Д. – М: Радио и связь, 1988. – С. 220-237.
- 2 Fiber Optics. Info [Электронный ресурс]: The Twenty-First Century and Beyond. – Режим доступа: <http://www.fiber-optics.info/history/P4/> – Загл. с экрана (дата обращения: 10.12.14).
- 3 Fiber-Optic Technologies [Электронный ресурс]: <http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=170740> – Загл. с экрана (дата обращения: 12.12.14).
- 4 Jones D. Introduction to Fiber Optics, Naval Education and Training Professional Development and Technology Center. // Nonresident Training Course. 1998. - Module 24—Introduction to Fiber Optics. Nonresident Training Course
- 5 Geib D., M.S. Thesis, Multiplexing of Extrinsic Fabry-Perot Optical Fiber Sensors for Strain Measurements. // Virginia Polytechnic Institute and State University. - 2003 – С.25-30
- 6 Окося Т. и др. Волоконно-оптические датчики / Окося Т. – М: Энергоатомиздат. 1990. – С.150-175.
- 7 Grattan K. T. V., Sun T. Fiber optic sensor technology: an overview // Sensors and Actuators. - 2000. - С. 40-61
- 8 Jenny, R., Fundamentals of Fiber Optics: An Introduction for Beginners, Volpi Manufacturing USA Co., New York, 2000.
- 9 Tracey, P. M., Intrinsic Fiber-Optic Sensors. // IEEE Transactions on Industry Applications. - 1991. - С.12-20.
- 10 Udd E., Fiber Optic Smart Structures. // Proceedings of IEEE. - 1996. - №6. - С.884–894.
- 12 Tracey P. M., Intrinsic Fiber-Optic Sensors. // IEEE Transactions on Industry Applications. - 1991. - № 27. - С.965-983.
- 13 Yu F. T. S., Shizhuo, Y. Fiber Optic Sensors. New York: Marcel Decker. 2002.

14 El-Sherif M. A., Smart structures and intelligent systems for health monitoring and diagnostics, ABBI. - 2005. - №. 3-4. - С.161-170,

15 Inaudi D., Glisic B. Overview of Fibre Optic Sensing Applications to Structural Health Monitoring. // Symposium on Deformation Measurement and Analysis. - 2008. – С.85-90.

15 Mendez A. Overview of fiber optic sensors for NDT applications // IV NDT Panamerican Conference. – 2007. – С.452-467.

16 Мир современных материалов [Электронный ресурс]: Волоконно-оптические методы измерений. – Режим доступа: <http://worldofmaterials.ru/spravochnik/tests/99-volokonno-opticheskie-metody-izmerenij> – Загл. с экрана (дата обращения: 01.12.14).

17 A. H. Hartog. A distributed temperature sensor based on liquid-core optical fibers. // Journal Lightwave Technol. - 1983. - №1. - С.498–509.

18 J. P. Dakin, D. J. Pratt, G. W. Bibby, J. N. Ross. Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector // Electron. Lett. - 1985. - № 21. - С. 569–570.

19 X. Bao, D. J. Webb, D. A. Jackson. Combined distributed temperature and strain sensor based on Brillouin loss in an optical fiber. // Opt. Lett. - 1994. - № 19. - С. 141–143.

20 A. H. Hartog. Distributed temperature sensing in solid-core fibers. // Electron. Lett. - 1985. – №21. - С. 1061–1062.

21 Hubert Braendle, Peter Krippner. Distributed Temperature Sensing Review of Technology and Applications. // IEEE Sensor Journal. – 2012. – №5. – С. 885 – 892.

22 W. W. Morey. Multiplexing fiber Bragg grating sensors. // Proc. SPIE Smart Sensing, Processing, and Instrumentation. - 1991. - С. 234 – 256.

23 T. A. Berkoff. Hybrid time- and wavelength-division multiplexed fiber Bragg grating sensor array. // Proc. SPIE Smart Structures and Materials Smart Sensing, Processing, and Instrumentation. - 1995. - С. 884 – 899.

- 24 M. G. Shlyagin. Multiplexing of grating-based fiber sensors using broadband spectral coding. // Proc. SPIE Smart Structures and Materials 1995: Smart Sensing, Processing, and Instrumentation. - 1999. - C.567 – 569.
- 25 Y. Chen. Multiplexed fiber Fabry–Perot temperature sensor system using white-light interferometry. // Opt. Lett. - 2002. - № 27. - C. 903-905.
- 26 F. Shen. UV-Induced Intrinsic Fabry-Perot Interferometric Fiber Sensors. Proc. SPIE Smart Structures and Materials Smart Sensing, Processing, and Instrumentation. - 2004. - C. 103-110.
- 27 Z. Huang. Intrinsic Fabry-Perot fiber sensor for temperature and strain measurements. // IEEE Photonic. Tech. L. - 2005. - №17. - C. 2403-2405.
- 28 B. S. Kawasaki. Narrow-band. Bragg reflectors in optical fibers // Opt. Lett. – 1978 - №3. - C. 66-68.
- 29 K. O. Hill. Photosensitivity on optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication. // Appl. Phys. Lett. – 1978. - №32. - C.647-649.
- 30 Photonics Encyclopedia [Электронный ресурс]: Bragg Gratings – Режим доступа: http://www.rp-photonics.com/bragg_gratings.html – Загл. с экрана (дата обращения: 05.12.14).
- 31 M. G. Xu. Optical in-fibre grating high pressure sensor. // Electron. Lett. - 1993. - №29. - C. 398.
- 32 W. W. Morey. Evaluation of a fibre Bragg grating hydrostatic pressure sensor. // In Proc. 8th Optical Fibre Sensors Conference. Monterey, USA. - 1992. – C. 556-559.
- 33 N. Cassidy. Wavelength division multiplexed sensor network using Bragg fibre reflection gratings. // Electron. Lett. - 1992. - №28. – C.1734.
- 34 Askins. Instrumentation for interrogating many-element fibre Bragg grating arrays embedded in fiber composites. in Proc. Smart Materials and Structures 1995: Smart Sensing, Processing and Instrumentation. 1995. San Diego, USA.
- 35 S. M. Melle. A passive wavelength demodulation system for guided-wave Bragg grating sensors. // IEEE Photonic. Tech. L. – 1992. - №4. - C. 516.

- 36 S. M. Melle. Practical fibre-optic Bragg grating strain gauge system. // *Appl. Opt.* - 1993. - №32. - С. 3601-3611.
- 37 A. D. Kersey. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter. // *Opt. Lett.* - 1993. №18. С. 1370-1376.
- 38 M. G. Xu. Novel interrogating system for fiber Bragg grating sensors, using an acousto-optic tunable filter. // *Electron. Lett.* - 1993. -№29. - С. 1510.
- 39 D. A. Jackson. Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor Network. // *Opt. Lett.* - 1993. -№18. - С.1192-1194.
- 40 A. D. Kersey. High resolution fiber Bragg grating based strain sensor with interferometric wavelength shift detection. // *Electron. Lett.* - 1992. - №28. - С. 236.
- 41 A. D. Kersey. Fiber-optic Bragg grating sensor with drift-compensated high resolution interferometric wavelength shift detection. // *Opt. Lett.* – 1993. - С. 72.
- 42 D. Kersey. Fiber-optic Bragg grating differential temperature sensor. // *IEEE Photonic. Tech. L.* - 1993. - №4. - С. 1183.
- 43 Гуревич Э. И., Лямин А. А., Шелемба И. С. Опыт измерения температуры обмотки статора оптоволоконными датчиками при стендовых испытаниях турбогенератора. // *Электрические станции.* - 2010. - № 4. - С. 42-45.
- 44 *Microwave Journal* [Электронный ресурс]: Test and Measurement Channel Common Digitizer Setup Problems to Avoid – Режим доступа: <http://www.microwavejournal.com> – Загл. с экрана (дата обращения: 05.04.16).
- 45 Афонский А. А., Дьяконов В. П. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики. Под ред. проф. В. П. Дьяконова. М.: СОЛОН-Пресс, 2009
- 46 Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: В 2-х томах. Пер, с франц. — М.: Мир, 1983. — Т. 2. 256 с.
- 47 B. Culshaw. Optical fiber sensor technologies: opportunities and-perhaps-pitfalls. // *J. Lightwave Technol.*, № 22, Т.1, С. 39-50, 2004.

48 Park, J. and Taylor, H. F. Fiber Optic Intrusion Sensor using Coherent Optical Time Domain Reflectometer. // IEEE Photonic. - 2003.- № 42 (2003).- C. 3481–3482.

49 M. K. Barnoski, M. D. Rourke, S. M. Jensen, and R. T. Melville. Optical time domain reflectometer. // IEEE Photonic. – 1977. - 16 – C. 2375-2379.

50 J. Park. Raman-based distributed temperature sensor with simplex coding and link optimization. // Photon. Tech. Lett. – 2006. - № 18. - C. 1871-1881.

51 G. Bolognini. Performance Enhancement of Raman-based Distributed Temperature Sensors using Simplex Codes // Photon. Tech. Lett. – 2008. - № 10. - C. 1751-1752.

52 M. A. Farahani. Spontaneous Raman scattering in optical fibers with modulated probe light for distributed temperature Raman remote sensing // Lightwave Technol. 1999. - № 17. C1379-1391.

53 M. A. Soto. Raman-based distributed temperature sensor with 1m spatial resolution over 26 km SMF using low-repetition-rate cyclic pulse coding // Opt. Lett. - 2011. - № 13. - C.2557-2559.

54 Soto, Marcelo A., Nannipieri Tiziano, Signorini Alessandro, Bolognini Gabriele, Di Pasquale Fabrizio Lazzeri Andrea, Baronti Federico, Roncella Roberto. Advanced Cyclic Coding Technique for Long-Range Raman DTS Systems with Meter-Scale Spatial Resolution over Standard SMF. // IEEE Sensors. – 2011. -C. 878-881.

54 M. D. Jones. Using simplex codes to improve OTDR sensitivity. // IEEE Photon. Technol. Lett. – 1993. - №15. – C.822-824.

55 D. Lee. Analysis and experimental demonstration of simplex coding technique for SNR enhancement of OTDR. // Proceedings IEEE LTIMC. – 2004

56 Marcelo A. Soto, Mohammad Taki, Gabriele Bolognini. Simplex-Coded BOTDA Sensor Over 120-km SMF With 1-m Spatial Resolution. // IEEE Photon. Technol. Lett. – 2012. - № 20

57 M. A. Soto, G. Bolognini, F. Di Pasquale, and L. Thévenaz. Simplex-coded BOTDA fiber sensor with 1 m spatial resolution over a 50 km range. // Opt. Lett. – 2010 - №2. - С.259-261.

58 СанПиН 2.2.2/2.4.1340 - 03. Санитарно - эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».

59 ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

60 СП 23-103-2003 Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий.

61 СанПиН 2.2.2. 542-96. Санитарные правила и нормы «Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».

62 ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты

63 Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие / О.Б. Назаренко, Ю.А. Амелькович; Томский политехнический университет. - 3-е изд., перераб. И доп. - Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2013. - 178 с.

64 ГОСТ 12.2.032-78. Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

65 ФЗ "Об охране окружающей среды" от 10.01.2002 N 7-ФЗ [Электронный ресурс]: Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. - Режимдоступа: <http://www.consultant.ru/popular/okrsred> - Загл. с экрана (дата обращения: 25.03.16).

66 ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» от 04.05.99 М 96-ФЗ [Электронный ресурс]: Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. - Режимдоступа: <http://www.consultant.ru/popular/okrsred> - Загл. с экрана (дата обращения: 25.03.16).

67 В.М.Нагорный, Г.М.Федоров. Организация работы комиссии по чрезвычайным ситуациям объекта / Под ред. В.В. Шевченко. - [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://gochs.info/download/Organizacija-raboty-KChS.pdf> - (дата обращения: 25.03.16).

Приложение А

(обязательное)

Part 1

1 Literature Review

Part 2

2 Research question and methods

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ41	Е.Ю. Кузнецова		

Консультант кафедры КИСМ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. кафедрой КИСМ	О. В. Стукач	доктор. техн. наук		

Консультант – лингвист кафедры ИЯИК

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Д. В. Шепетовский			

1 The history of fiber

Optical systems appeared a long time ago, about two centuries ago. The first system is the "optical telegraph", which was invented by the French engineer Claude Chappy in the 1790s. His system was a series of semaphores mounted on towers, located between Paris and Lille, the length of the chain was 230 km. Transmission of one message took about 15 minutes. Telegraph was operated manually, but by the mid-19th century it has been replaced with an electric one.

Alexander Graham Bell patented the optical telephone system, which he called photophone, in 1880, but his earlier invention, the phone turned out to be much more practical. In the following decades, the light has been used for communication between vessels. Sailors used Morse code to transmit information and send it with the help of warning lights.

British physicist John Tyndall in 1870 at a meeting of the Royal Society showed the following experiment: water falling from one trough to another on a parabolic trajectory. At the bottom of the trough, there was the first transparent window through which light entered the water jet. When the direction of light fell along a tangent to the jet, light propagation was observed following the zigzag path within the parabolic part of the jet. Such propagation of light occurs in an optical fiber [1].

In the early 19th century, scientists have concluded that bent quartz rods could carry light. Therefore, in 1940 many doctors began to use the backlight based on quartz rods to illuminate hard-to-reach places.

In 1920, John Logie Baird in England and Clarence W. Hansell in the United States patented the idea of using arrays of hollow pipes or transparent rods to transmit images for television or facsimile systems [2].

All developed fibers without of any cladding, causing total internal reflection occurs at the boundary of the glass-air. Abraham Van Heel was the first who covered the fiber with a shell with a lower index of refraction. This shell protects the surface

of the fiber against reflections and pollution and helps to reduce crosstalk between the fibers. Figure 1 shows an optical fiber [3].

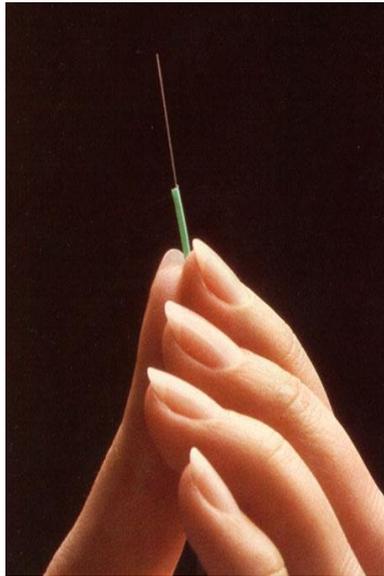


Figure 1 - an optical fiber

With the invention of the laser in 1960's, a great interest in optical systems for data communications started. The invention of laser, motivated researchers to study the potential of fiber optics for data communications, sensing, and other applications. Laser systems could send a much larger amount of data than microwave, and other electrical systems. The first experiment with the laser involved the free transmission of the laser beam in the air. Researchers also conducted experiments by transmitting the laser beam through different types of waveguides. Glass fibers soon became the preferred medium for transmission of light. Initially, the existence of large losses in optical fibers prevented coaxial cables from being replaced with optical fibers. Early fibers had losses around 1000 dB/km making them impractical for communications use [4].

In 1969, several scientists concluded that impurities in the fiber material caused the signal loss in optical fibers. By removing these impurities, construction of low-loss optical fibers was made possible. In 1970, Corning Glass Works made a multimode fiber with losses under 20 dB/km. The same company, in 1972, made a high silica-core multimode optical fiber with a 4 dB/km loss [4].

Recent advances in fiber optic technology have significantly changed the telecommunications industry. The ability to carry gigabits of information at the speed of light increased the research potential in optical fibers. Simultaneous improvements and cost reductions in optoelectronic components led to similar emergence of new product areas. The latest revolution emerged as designers started to combine the product outgrowths of fiber optic telecommunications with optoelectronic devices to create fiber optic sensors. Soon it was discovered that, with material loss almost disappearing, and the sensitivity for detection of the losses increasing, one could sense changes in phase, intensity, and wavelength from outside perturbations on the fiber itself. Hence fiber optic sensing was born [5].

In 1973, the first publication on the use of the optical fiber outside of communication lines began to appear: projects and experiments with measuring equipment, and in the second half of the 1970s, their number has been increasing rapidly. In 1977-79 numerous review articles started to appear, showing increased interest in sensors.

Different researchers named such sensors in their own way, for example, the "measuring instrument on the optical fiber", "the optical sensor." After the first international conference held in London (International conference on optical fiber sensor) in 1981 to fiber-optic sensors, the term "fiber optic sensor" was definitively approved [6].

2 Fiber - optical measurement

Fiber optic technologies for measuring physical parameters are one of the fastest growing areas of applied optics. Fiber optic sensors are characterized by low weight and size, the lack of electricity in the measurement path, insensitivity to electromagnetic interference and aggressive media and simplicity of integration into the distributed measurement systems.

Due to these unique properties, they are widely used in solving various scientific and practical problems, where a need arises to measure the temperature, deformation and other parameters of extended objects

2.1 Fiber Optic Design

An optical fiber is composed of three parts; the core, the cladding, and the coating or buffer. The basic structure is shown in Figure 2. The core is a cylindrical rod of dielectric material and is generally made of glass. Light propagates mainly along the core of the fiber [4].

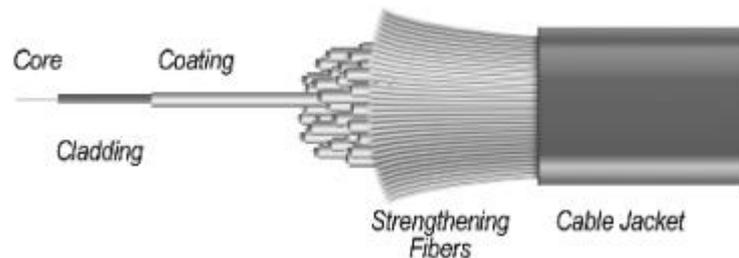


Figure 2 - The construction of a fiber optic cable

The cladding layer is made of a dielectric material with an index of refraction less than that of the core material. The cladding is generally made of glass or plastic. The cladding executes such functions as decreasing loss of light from core into the surrounding air, decreasing scattering loss at the surface of the core, protecting the fiber from absorbing the surface contaminants and adding mechanical strength [4].

The coating or buffer is a layer of material used to protect an optical fiber from physical damage. The material used for a buffer is a type of plastic. The buffer is elastic in nature and prevents abrasions [4].

The light-guiding principle along the fiber is based on the “total internal reflection”. The angle at which total internal reflection occurs is called the critical angle of incidence. At any angle of incidence, greater than the critical angle, light is totally reflected back into the glass medium (see Figure 3). The critical angle of

incidence is determined by using Snell's Law. Optical fiber is an example of electromagnetic surface waveguide [4].

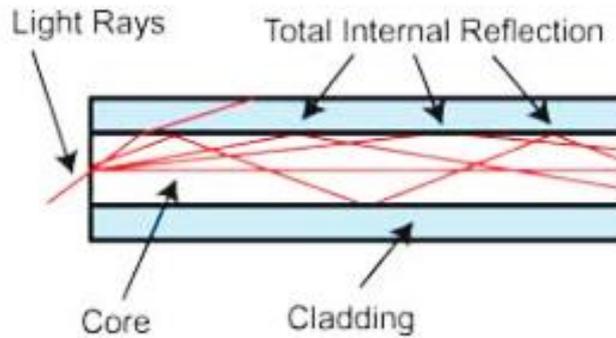


Figure 3 - The principle of signal transmission over fiber

2.2 Types of optical fibers

Optical fibers are divided into two groups called single mode and multimode. In classifying the index of refraction profile, we differentiate between step index and gradient index. Step index fibers have a constant index profile over the whole cross section. Gradient index fibers have a nonlinear, rotationally symmetric index profile, which falls off from the center of the fiber outwards [8]. Figure 4 shows the different types of fibers.

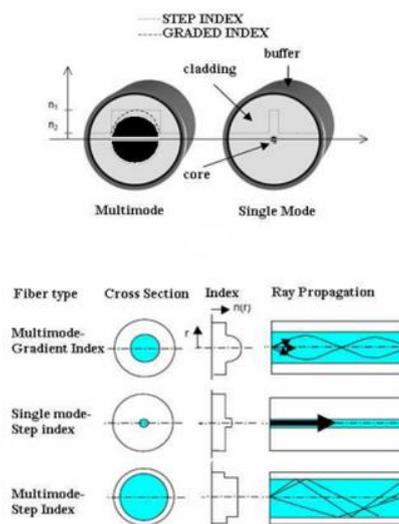


Figure 4 - Types of optical fibers

2.3 Principle of operation of the optical sensor

The general structure of an optical fiber sensor system is shown in Figure 5. It consists of an optical source (Laser, LED, Laser diode etc), optical fiber, sensing or modulator element (which transduces the measuring results to an optical signal), an optical detector and processing electronics (oscilloscope, optical spectrum analyzer etc).

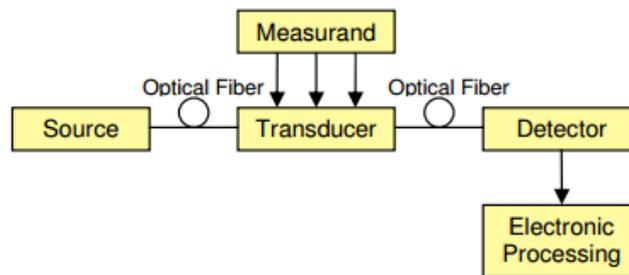


Figure 5 - The general structure of the fiber optical sensor

Fiber optic sensors can be classified according to three characteristics: sensing location, operating principle and application. Based on the sensing location, a fiber optic sensor can be classified as extrinsic or intrinsic. In an extrinsic fiber optic sensor (see Figure 6), the fiber is simply used to carry light to and from an external optical device where the sensing takes place. In this case, the fiber just acts as a means of getting the light to the sensing location.

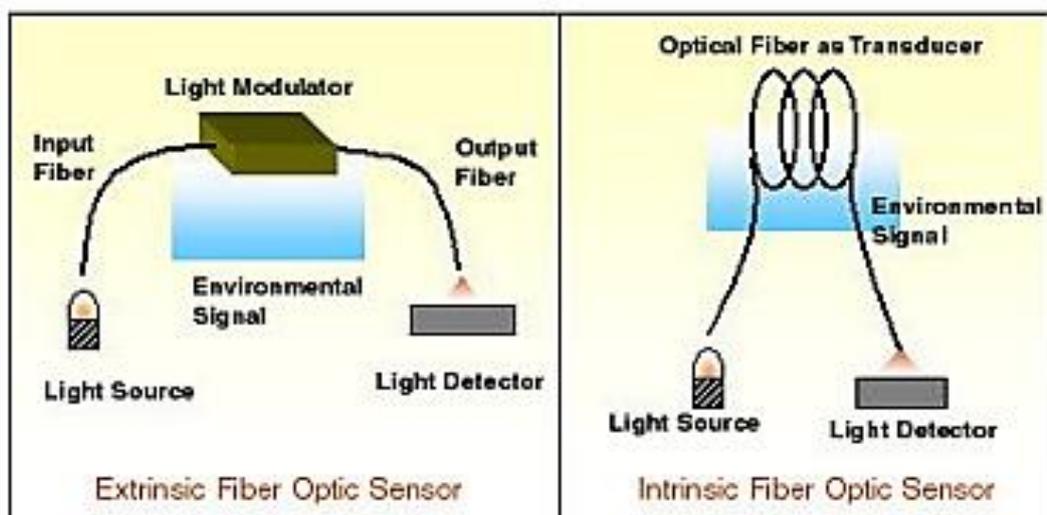


Figure 6 – Extrinsic and intrinsic fiber optic sensors

On the other hand, in an intrinsic fiber optic sensor one or more of the physical properties of the fiber undergo a change (see Figure 5). Perturbations act on the fiber and the fiber in turn changes some characteristic of the light inside the fiber [9].

Based on the operating principle or modulation and demodulation process, a fiber optic sensor can be classified as intensity, phase, frequency, or polarization sensor. All these parameters may be subject to change due to external perturbations. Thus, by detecting these parameters and their changes, the external perturbations can be sensed.

Based on the application, a fiber optic sensor can be classified as follows:

- physical sensors: used to measure physical properties like temperature, stress, etc;
- chemical sensors: used for pH measurement, gas analysis, spectroscopic studies, etc;
- bio-medical sensors: used in bio-medical applications like measurement of blood flow, glucose content etc.

Nowadays, fiber optic sensors are used to control a wide range of environmental parameters, such as position, vibration, strain, temperature, humidity, viscosity, various chemicals, pressure, current, electric field and some other environmental factors [10 -15].

2.4 Advantages of fiber optic sensors

Fiber optic sensors are ideal for monitoring changes in the environment, and they have the following advantages over conventional electronic sensors:

- they are composed of electrically insulating materials, which makes possible their use in conditions of high voltage;
- they can be safely used in explosion hazardous environments because there is no risk of electric sparks, even in the case of defects;

- resistance to electromagnetic and radio frequency interference, even when lightning strikes;
- the materials of sensors are chemically passive, that is, do not pollute the environment and do not corrode;
- they have a very wide operating temperature range (much wider than it is possible for many electronic devices);
- they have the opportunity of multiplexing: several detectors are combined into one fiber line and can be interrogated with one optical source;
- they have small weight and size.

3 Types of fiber optic sensors

All fiber-optic sensors for localization of the measured parameter can be divided into three types: point, distributed or quasi-distributed.

3.1 Point fiber optic sensors

Point fiber optic sensors are small-sized sensor. This type of sensor allows monitoring and measuring the parameters at a specific point of the object, making it similar to the other sensors. These sensors can be used as strain gauges, local thermometers, pressure sensors, accelerometers, etc.

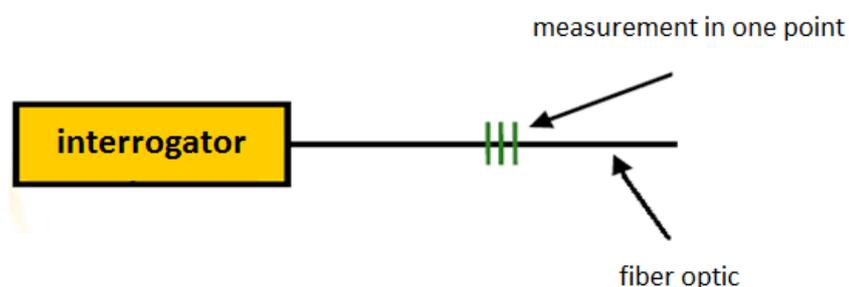
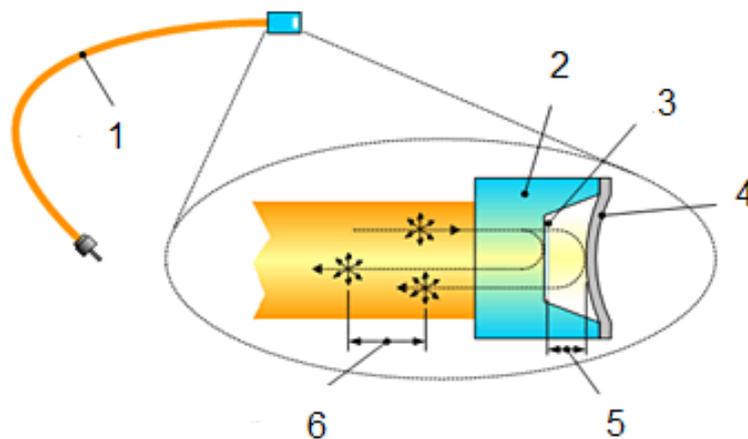


Figure 7 Schematic view of a point fiber optic sensor

Typically, such sensors have a small size and high accuracy of measurement. The point fiber optic sensors often use fiber Bragg grating, which contains a large number of reflection points located inside the fiber at regular intervals. (See p. 4).

Another type of fiber-optic point sensors are sensors based on micro opto electro-mechanical element (MOEMS). The basis of their design is MOEMS-plate (Figure 8). In the MOEMS-sensor the magnitude of the gap between the plate and the end face an optical fiber is measured with high precision by optical methods.

The gap at the same time functions as a Fabry-Perot interferometer. When the plate is bent (e.g., by an external pressure), changes the interference pattern of two beams - reflected from the fiber end and from MOEMS plate.



1 - fiber; 2 - base; 3 - dielectric mirror; 4 - the diaphragm; 5 - length of the resonator Fabry-Perot interferometer; 6 - the difference between the lengths of the interferometer path

Figure 8 - Scheme of optical fiber sensor based on MOEMS chip

This type of sensor is not subject to the spectral multiplexing, i.e., survey through one optical fiber as sensor elements based on FBG. However, they are used in some sectors of modern industry, for example, in medical research [16].

3.2 Distributed fiber optic sensors

Distributed fiber optic sensors (Figure 9) allow for continuous monitoring of the parameters at the entire length (volume) of the controlled object at any point,

where an optic fiber is installed. The basic principle of operation of such sensor systems is based on non-linear effects, and on the analysis of changes parameters in fiber. The accuracy of measurement is relatively low, which is a drawback of such sensors.

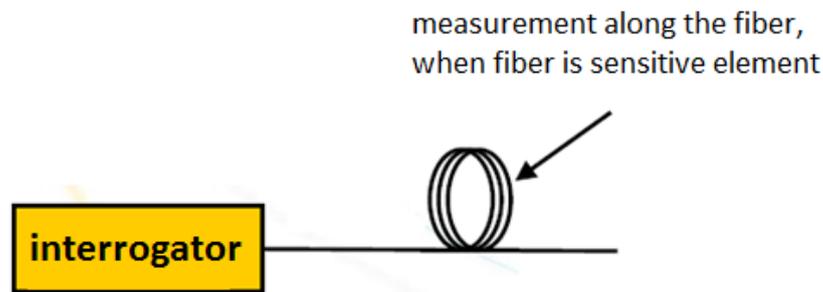


Figure 9 - Schematic view of a distributed fiber optic sensor

Basic principles of measurement of distributed fiber optic sensors are based on the detection of backscattering of light, for example, based on Rayleigh [17], and Raman [18] or and Brillouin [19] scattering. This section provides a brief overview of the various technologies.

3.2.1 Raman scattering

Optical fibers are made of doped quartz glass. Quartz glass is a form of silicon dioxide (SiO_2) with amorphous solid structure. Temperature effect initiate vibration in a molecular lattice. When light strikes the thermally excited molecules, interaction occurs between the light particles (photons) and electrons.

Thus, in the optical fiber a light scattering occurs, also known as Raman scattering. There is a spectral change in the scattered light, which is equivalent to the resonant frequency of lattice vibrations [18], [19].

Backscattering of light is composed of several components:

- Rayleigh scattering, a similar wavelength as used in a laser source;
- Stokes components of Raman scattering with wavelength greater than that used by the laser source;

- Anti-Stokes components of Raman scattering with shorter wavelength, compared with the Rayleigh scattering, in which photons are absorbed.

The intensity of anti-Stokes scattering is dependent on the temperature range, while, the Stokes band is essentially independent of temperature. The local temperature of the optical fiber is derived from the ratio of the anti-Stokes and Stokes light intensities. This is shown in Figure 10. This approach was developed in the 1980s at the University of Southampton, United Kingdom [18].

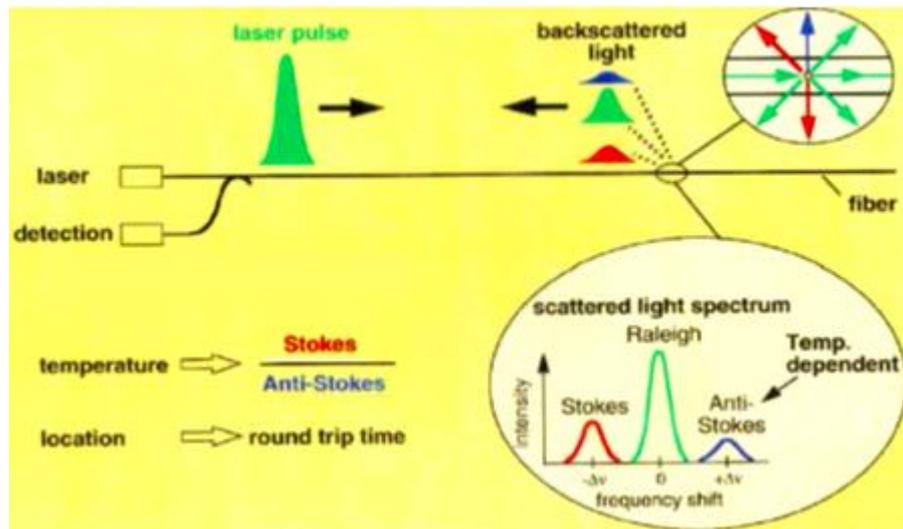


Figure 10 - Fiber - optic temperature measurement based on Raman scattering

3.2.2 Brillouin scattering

Brillouin lines have the spectral shift induced by acoustic lattice vibrations of crystal fibers and carries in itself the information about the mechanical stresses and temperatures affecting the fiber. Brillouin frequency shift γ is determined by the frequency of the acoustic wave ω from the formula:

$$\gamma_B = \frac{\omega_A}{2\pi} = \frac{2n\gamma_A}{\lambda_0}, \quad (1)$$

where n - index of refraction;

γ_A - speed of sound;

λ_0 - wavelength in vacuum.

Brillouin methodology can be used to measure temperature or strain, but not together.

Typical applications of distributed fiber optic sensors are the areas related to security.

For example, the thermal control of the power cables and lines of transfers for the optimization of production processes; fire alarm system in the road, rail or service tunnels; improving the efficiency of oil and gas wells; ensuring safe working condition of industrial induction melting furnaces; leak detection on dams; temperature control in chemical processes; detection of leaks in pipelines, tightness test of containers with liquefied natural gas on ships unloading terminals;.

However, the control parameters using these sensors must be justified because they are expensive compared to other fiber optic sensors.

3.3 Quasi-distributed fiber optic sensors

Quasi-distributed sensor consists of an array of point sensing elements (Figure 11), these elements are usually inside the fiber gratings, united by a common waveguide. Each grid has unique characteristics that allow analyzing its state independently of the other elements.

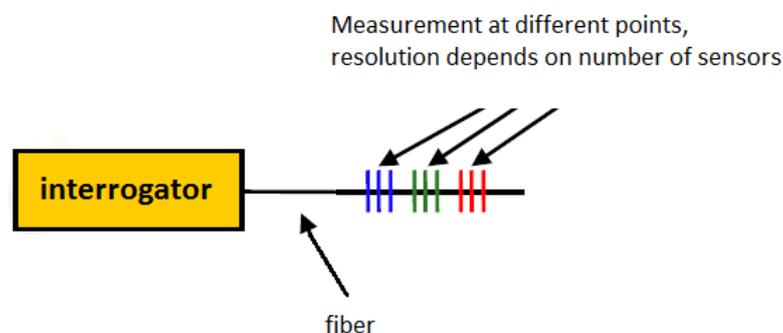


Figure 11 - Schematic view of a quasi-distributed fiber optic sensor

Operation of quasi-distributed optical system is carried out through a survey of a series of points along a single optical fiber. Compared with the distributed sensors, the quasi-distributions sensor has a higher spatial resolution.

The advantage of a quasi-distributed sensor is that such sensor can generate a stronger optical signal and provide a much better signal to noise ratio, so that the sensor provides a higher accuracy and higher resolution,

The accuracy of such systems is determined by the accuracy of individual sensors, and an array can combine up to 100 or more elements. There are two types of gratings for quasi-distributed system, playing the role of the sensitive element: the Bragg grating (see claim 4.) and Fabry-Perot interferometer [22-27].

With the help of sensor array complex objects can be monitored such as bridges, engineering structures, ship hulls and aircraft, tunnels, oil wells, etc. It is also possible to carry out gradient analysis of temperature distribution, load, pressure, and control to a point 100 and the objects.

At that, it is sufficient to use only one optical fiber and an analyzer. Quasi-distributed systems have a small weight and size, as compared with their electrical counterparts, such an advantage is important for space engineering and aviation.

4 Fiber Bragg gratings

In 1978 K.O. Hill and his colleagues found photosensitivity of silica fiber doped with germanium [28, 29]. If these fibers were subjected illumination with ultraviolet (UV) rays, the refractive index would increase with increasing irradiation time and power. Fiber Bragg gratings (FBGs) are made based on this effect.

Bragg grating (Figure 12) is a distributed Bragg reflector (a kind of diffraction grating) embedded in the core of the optical fiber.

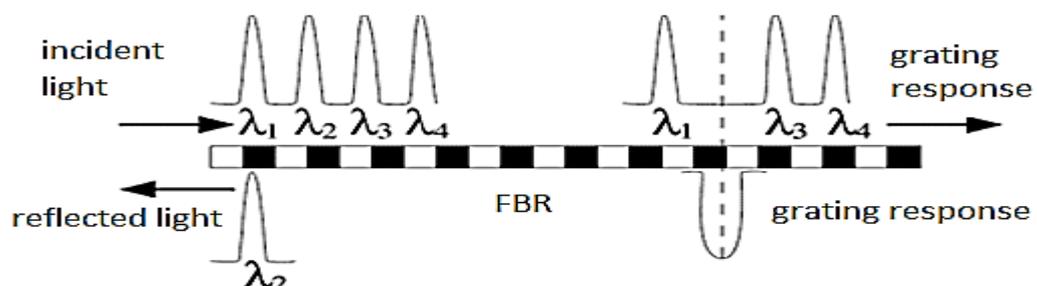


Figure 12 - Fiber Bragg grating

The diffraction phenomenon occurs when the refractive index of the material of which the core fiber periodically changes. Figure 13 is a schematic view of the fiber with Bragg grating.

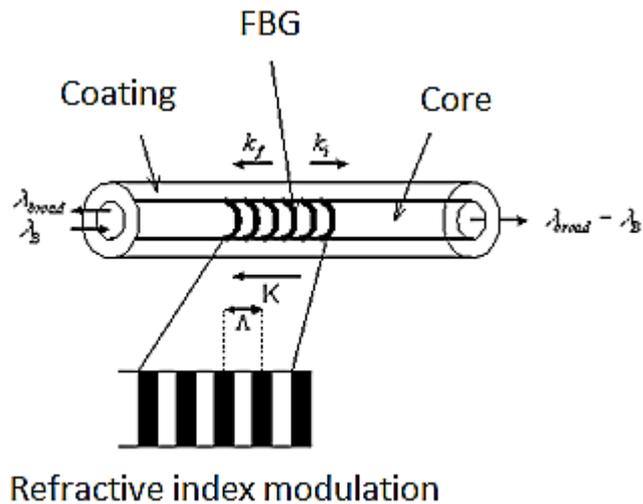


Figure 13 - fiber with integrated Bragg grating

When the laser beam passes through a fiber each cell of a fiber Bragg grating reflects a small part of the radiation at a specific wavelength, this peak of the reflected radiation is registered by the measuring equipment.

As a result of many physical parameters the interval between the nodes Bragg grating and the refractive index of the fiber change. According to the wavelength change, it is possible to determine the exact characteristics of the changes.

Also worth noting that by passing the light through an optical fiber core, light is scattered by each plane of grating. The phenomenon of diffraction on the grating can be observed only when the grating period d is comparable to the wavelength of the incident radiation.

For a wavelength of 2 times greater than the period of the grating, the reflected beams are added in phase. The result is a reflected light signal with a narrow spectral band. Wavelength reflected by grating called the Bragg. The Bragg wavelength is dependent on the temperature and fiber tension.

This is only possible when the Bragg condition is fulfilled:

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff}\Lambda, \quad (2)$$

where λ - the wavelength of the FBG reflection;

n - the effective refractive index of the fiber core for the center wavelength;

Λ - grating period [30].

4.1 FBG sensor

FBG sensor - a fiber optic sensor based on FBG, which contains a large number of reflection points located inside the fiber at a specific interval. Fiber optic sensors based on Bragg gratings (Figure 14) the measured value is converted into a displacement of the Bragg wavelength.

Registration system converts the displacement of the wavelength of the reflected Bragg grating into an electrical signal. Because the grating period and the effective refractive index can be changed by external parameters such as temperature, pressure, strain, etc., they can also be used as sensitive elements for measuring these parameters by determining the change in the Bragg wavelength.

Thus, the refractive index and the distance between the cell of grating change and from the other wavelengths are reflected under the action of the fiber (temperature, pressure, etc.).

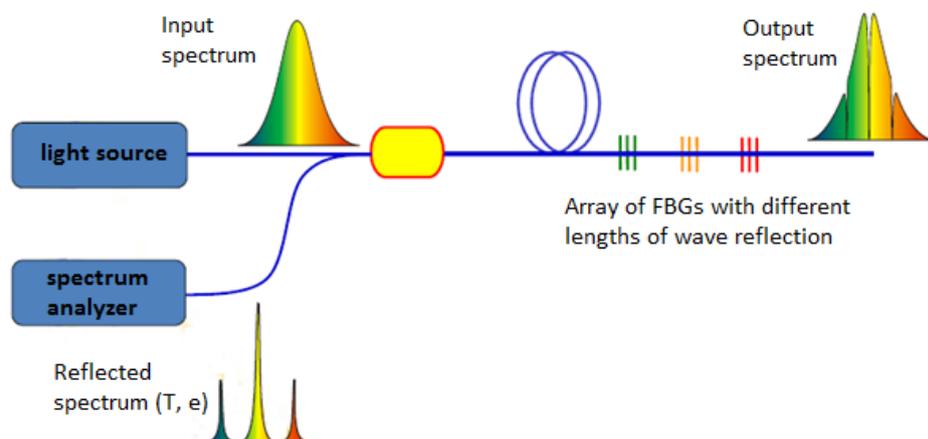


Figure 14 - The structure of the FBG sensor

A survey of FBG sensor element is based on the detection of the spectral position of the grating reflection peak in the background of a wide spectrum of the radiation source.

Several methods are used to measure the optical signal wavelength reflected from Bragg grating, for example, a method by using an optical spectrum analyzer or spectrometer, to obtain an optical spectrum of the FBG signal [31-34], wherein the method is determined by the wavelength dependence of the optical intensity using broadband filters [35, 36], and a method in which the wave tracking occurs using a tunable bandpass filter [37-39], and the method which is based on interferometric detection [40-42].

FBG sensors can be used to solve various technical problems. Measurement of temperature along the borehole depth is required to improve oil production efficiency, such measurement may be conducted with fiber optic sensors. All these problems can not be solved by traditional electrical sensors on a number reasons: aggressive environment, high intensity electromagnetic field, or a ban on the use of electricity at some facilities.

One of the potential applications of FBG sensors is the monitoring of construction projects - measuring strain and temperature of bridges, dams, high-rise and unique buildings and their components. While the oil and gas industry tasks do not require a high spatial resolution, it is very important to control the generator elements, conveyors and buildings.

When using FBG sensors spatial resolution is determined by the grating length and may be less than 1 cm.

At the same time, the possibility of a simple multiplexing - placing multiple sensors in a single fiber - allows using a distributed FBG measurement.

One of the most important parameters of FBG sensors is their strength. Contact with aggressive environments, as well as the strain arising due to the high thermal expansion of the object, or other effects may damage the fiber.

As the experience of the industrial turbine generator equipping shows, FBG sensors at proper installation can withstand quite harsh conditions [43]. Gratings have been mounted on a copper rod of the stator winding. The rod was covered with several layers of insulation and impregnated in epoxy compound at a temperature of 65 ° C and a pressure of 10 atm.

After impregnation, the stator was baked at 165 C for 16 hours to solidify the compound. During solidification occurred a shift in sensor calibration curves, caused by compression of gratings, but almost all of the sensors remained intact and were working correctly after recalibration. This has allowed for the first time to measure the temperature distribution in the stator cores of a running turbogenerator.

Over the past several years Fiber Bragg gratings (FBGs), are widely used in telecommunications for the development of optical frequency multiplexer. Moreover, Bragg gratings are used to measure strain in composite materials, for monitoring civil buildings and structures: roads, bridges, buildings, dams, etc., smart manufacturing and non-destructive testing, remote monitoring of oil wells and power cables, pipelines and space stations, control of the aircraft hull and wings, ship hulls, sports equipment, etc.

4.2 Advantages of FBG sensors

The main advantage of working with sensors based on FBG caused by the detection of the spectral position of the reflection peak grating on the background of a wide spectrum of the radiation source. This allows you to put in a fiber link up to 30 sensors based on FBG, each of which gives a response to its own wavelength

In this case, instead of a point sensor, we obtain the distributed sensor system for recording, multiplexed by wavelength, and it virtually eliminates the growth of errors in the weakening of the optical signal.

Also, the advantages can be attributed the fact that the sensing element of the sensor does not contain any electronic components, and therefore it is entirely

passive, which means you can use it in the zone of high explosive, aggressive, strong electromagnetic interference.

The use of the wavelength of light as an information parameter makes the sensor insensitive to the long-term drift parameters of the source and the radiation receiver, and to the random Attenuation of optical power in the fiber.

Fiber optic sensors FBGs are very small and very light, so they are easier to install, and the installation time and the cost is lower, because they are lightweight and easier to work with them.

Wide measurement range, the ability to integrate the sensor into the structure of the measurement object (composite structures, concrete monoliths, sandwich panels); signal transmission over long distances (tens / hundreds of kilometers); Time stability under constant external conditions (do not require recalibration), all of this can also be attributed to the advantages of the FBG sensor, thus they are preferred for use in various fields.

A number of modern methods of monitoring the status of various objects and materials are used as the sensor optical fiber.

Despite the relatively high cost of measurement equipment, these measurement techniques are becoming more common due to a number of advantages over electromechanical sensors. Therefore, fiber optic sensors, found commercial application.

When comparing different types of sensors can be concluded that the most promising and beneficial for use are FBG sensors because they have a higher accuracy, better spatial resolution and lower cost than the distributed fiber optic sensors.

The modern fiber-optic sensors can measure many different parameters. For example, temperature, pressure, position in the space, distance, rate of linear displacement, rotational speed, vibrations, sound waves, mass, acceleration, deformation, the refractive index of the liquid level, electric field, magnetic field, electric current, gas concentration, radiation emission etc.

At present stage of development the industry sensors should have high reliability, stability, durability, small size, low power consumption, compatibility with microelectronic information processing devices, low labor content of production and a reasonable cost. All these requirements are satisfied by the FBG sensors.