

На правах рукописи

Таранов

Таранов Михаил Александрович

**Волоконно-оптический низкокогерентный рэлеевский
рефлектометр для распределённых измерений
относительной деформации и температуры**

Специальность:

01.04.03 «Радиофизика»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Фрязино 2021

Работа выполнена во Фрязинском филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук

Научный руководитель: **Алексеев Алексей Эдуардович,**
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Фирстов Сергей Владимирович,**
доктор физико-математических наук,
Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», заместитель руководителя по научной работе

Никитин Сергей Петрович,
кандидат физико-математических наук,
Общество с ограниченной ответственностью
«Т8 СЕНСОР», руководитель научной группы

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук

Защита состоится 24 сентября 2021 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 002.231.02 на базе ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН) по адресу: 125009, г. Москва, ул. Моховая, д. 11 корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и на сайте: <http://cplire.ru/rus/dissertations/Taranov/dissertation.pdf>

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



Кузьмин
Лев Викторович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Важной практической задачей при строительстве и эксплуатации ряда инженерных сооружений является измерение деформации и температуры различных их частей. Наблюдение за изменением этих величин во времени позволяет судить о текущем состоянии контролируемого объекта: моста, тоннеля, дамбы, трубопровода или другого сооружения, выявляя возможные технологические ошибки на этапе строительства, а также степень износа при эксплуатации, тем самым предупреждая развитие аварий. Такие наблюдения принято называть мониторингом структурного состояния или SHM (Structural Health Monitoring).

Современные средства измерения подразделяются на точечные и распределённые. Первые распространены наиболее широко и представляют собой устройства, позволяющие измерять интересующие параметры в небольшой (локальной) области пространства. Мониторинг структурного состояния крупных объектов с помощью таких датчиков требует их мультиплексирования, что зачастую технически сложно и затратно.

Альтернативой служат распределённые датчики. Такие устройства, как правило, используют волоконный рефлектометрический принцип измерений, который заключается в мониторинге отражённого или рассеянного в обратном направлении оптического излучения при прохождении по оптическому волокну зондирующего импульса. Оптическое волокно в этом случае можно представить как совокупность индивидуально опрашиваемых сенсоров, расположенных последовательно, сигналы от которых приходят в разные моменты времени, благодаря чему имеется возможность определить точное расположение каждого из сенсоров. Распределённые датчики такого типа называются оптическими рефлектометрами OTDR (Optical time-domain reflectometer).

В настоящее время требованиям мониторинга деформации и температуры крупных инженерных сооружений наиболее полно отвечают датчики-рефлектометры, принцип действия которых основан на регистрации сигнала мандельштам-бриллюэновского рассеяния в оптическом волокне. Начиная с 1998 года, демонстрировалась возможность измерений деформации и температуры за счёт регистрации спектров рассеяния Рэлея. Перспектива достижения с помощью такого метода характеристик, в совокупности превосходящих обеспечиваемые бриллюэновскими датчиками, за счёт использования широкополосного излучателя с перестраиваемой длиной волны, обуславливает актуальность разработки технологии низкокогерентной рэлеевской рефлектометрии для распределённых измерений деформации и температуры.

Степень разработанности проблемы. Метод измерений деформации и температуры оптического волокна за счёт регистрации спектров рассеяния Рэлея впервые был рассмотрен в работе [1]. Там же вводилось определение спектра рассеяния Рэлея – зависимости мощности обратного рэлеевского рассеяния от длины волны зондирующего излучения для произвольной пространственной области (пространственной ячейки) оптического волокна. Демонстрировалось, что при однородном изменении деформации волокна соответствующие спектры рассеяния Рэлея испытывают сдвиг по оси длин волн относительно исходного положения. Величина сдвига в первом приближении пропорциональна изменению относительной деформации (далее для краткости слово “относительной” будет опускаться). Таким образом, процесс измерений сводился к определению этой величины сдвига.

С помощью экспериментальной установки когерентного рефлектометра с перестраиваемой длиной волны излучения демонстрировалась возможность измерений деформации с неопределённостью (характеризует погрешность) порядка $5 \text{ мкм} \cdot \text{м}^{-1}$ при пространственном разрешении 30 см [1]. В более поздних работах [2, 3] неопределённость измерений температуры / деформации составила порядка $0,01 \text{ К} / 0,1 \text{ мкм} \cdot \text{м}^{-1}$; дальность измерений и пространственное разрешение достигали 8 км и 1 м соответственно. Диапазон измеряемых воздействий был очень мал, достигая $\pm 0,22 \text{ К}$ по температуре и $\pm 2 \text{ мкм} \cdot \text{м}^{-1}$ по деформации. Возможность проведения измерений в более широком диапазоне деформаций ($\pm 10 \text{ мкм} \cdot \text{м}^{-1}$) за счёт расширения интервала спектральной перестройки излучателя была продемонстрирована в работе [4].

Относительная узость диапазона измеряемых воздействий в рассмотренных работах объяснялась трудностью перестройки высококогерентного излучателя в широком интервале длин волн. Для организации измерений, отвечающих требованиям мониторинга крупных инженерных сооружений, требовалось обеспечить перестройку спектра в интервале до нескольких нанометров (при работе в С-диапазоне длин волн: 1530–1565 нм). Решением представлялось использование излучателя с достаточно большой оптической шириной полосы (десятые доли нм). Низкая степень когерентности такого источника требовала изучения особенностей рассеяния его излучения в оптическом волокне.

Цель диссертационной работы состоит в анализе интерференционных эффектов рэлеевского рассеяния в одномодовом оптическом волокне перестраиваемого по частоте (длине волны) деполяризованного оптического излучения с ограниченной степенью когерентности, а также в изучении влияния на указанные эффекты изменения деформации и температуры волокна. Достижение поставленной цели даёт детальный теоретический и практический

базис для разработки датчиков нового класса – низкокогерентных рэлеевских рефлектометров для распределённых измерений деформации и температуры.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1) дано объяснение физической природы случайных пространственных неоднородностей мощности обратного рэлеевского рассеяния из одномодового оптического волокна, наблюдаемых на рефлектограмме при использовании источника низкокогерентного деполаризованного излучения. Проведён статистический анализ таких неоднородностей, построено теоретическое описание зависимости меры их выраженности (контраста) на рефлектограмме от параметров зондирующего излучения: времени когерентности и длительности импульса. Корректность теоретических выводов подтверждена экспериментально;
- 2) рассмотрены спектры рассеяния Рэлея, исследован механизм их чувствительности к деформации и температуре оптического волокна. На основе полученных результатов разработана технология распределённых измерений деформации и температуры оптического волокна в широком диапазоне величин с помощью схемы оптического рефлектометра с низкокогерентным спектрально перестраиваемым источником излучения. Работоспособность схемы подтверждена экспериментально;
- 3) исследовано влияние нелинейных эффектов на спектры рассеяния Рэлея. Экспериментально выявлены эффекты, играющие доминирующую роль в наблюдаемом изменении свойств указанных спектров. Разработан и экспериментально проверен метод, позволяющий уменьшить влияние нелинейных эффектов на спектры рассеяния, регистрируемые с помощью рефлектометра с низкокогерентным перестраиваемым источником излучения;
- 4) методом математического моделирования исследованы особенности реакции низкокогерентного рэлеевского рефлектометра с перестраиваемым источником излучения на воздействия, неоднородные в пределах рассеивающего участка оптического волокна;
- 5) проанализирована возможность организации распределённых измерений деформации и температуры оптического волокна с разделением измеряемых воздействий. Разработана и экспериментально испытана гибридная схема низкокогерентного рефлектометра на основе регистрации спектров рассеяния Рэлея и мощности антистоксовой компоненты спонтанного рассеяния Рамана, позволяющая проводить такие измерения.

Объектом исследования диссертационной работы является рэлеевское рассеяние деполаризованного излучения с ограниченной степенью

когерентности и перестраиваемой частотой (длиной волны) в одномодовом оптическом волокне.

Предметом исследования выступает метод распределённых измерений деформации и температуры оптического волокна за счёт регистрации сигнала рэлеевского рассеяния на разных длинах волн при использовании перестраиваемого по частоте (длине волны) низкокогерентного источника зондирующего излучения. Указанный метод находит аппаратную реализацию в виде низкокогерентного волоконно-оптического рефлектометра с перестраиваемым источником излучения.

Теоретическую и методологическую основу работы составляют труды отечественных и зарубежных авторов по волоконно-оптической сенсорике, статистической оптике, а также цифровой обработке сигналов. Существенную роль в работе играют материалы, изложенные в книге “Статистическая оптика” Дж. Гудмена (Joseph W. Goodman).

Основными методами научного познания, используемыми в настоящей работе, выступают:

- метод формализаций, позволяющий получать решение задачи в виде аналитических выражений общего плана, связывающих параметры исследуемого явления;
- математическое моделирование с применением компьютерной техники, позволяющее получать численное решение задачи, исходя из базовых физических принципов и закономерностей, лежащих в её основе;
- эксперимент, заключающийся в изучении физических процессов с помощью экспериментальных установок для натурального выявления закономерностей таких процессов.

Совместное использование перечисленных выше методов способствует достижению глубокого понимания исследуемого явления и обеспечивает объективность полученных результатов.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) Устойчивые пространственные неоднородности интенсивности излучения обратного рэлеевского рассеяния из одномодового оптического волокна, наблюдаемые при использовании низкокогерентного источника зондирующего сигнала, имеют интерференционную природу. Контраст рефлектограммы, содержащей такие неоднородности, определяется свойствами зондирующего излучения: формой огибающей и длительностью импульса, а также формой и шириной оптического спектра мощности. В случае, когда огибающая зондирующего импульса и его оптический спектр мощности имеют гауссову форму, а время когерентности излучения существенно меньше длительности импульса, контраст рефлектограммы

пропорционален квадратному корню отношения времени когерентности и длительности импульса.

- 2) Статистически средняя автокорреляционная функция спектров рассеяния Рэлея для одномодового оптического волокна имеет гауссову форму при условии, что зондирующий импульс и его оптический спектр мощности имеют гауссову форму. Ширина указанной автокорреляционной функции приблизительно в $\sqrt{2}$ раза превосходит ширину спектра мощности зондирующего излучения в случае, когда время когерентности этого излучения существенно меньше длительности его импульса. Ширина автокорреляционной функции ограничивает максимальную величину шага спектральной перестройки, используемой при записи опорного и измерительного спектров рассеяния Рэлея, при котором эти спектры становятся декоррелированными.
- 3) Регистрация спектров рассеяния Рэлея с помощью схемы оптического рефлектометра на основе низкокогерентного источника излучения, перестраиваемого в широком спектральном интервале (единицы нанометров), позволяет проводить распределённые измерения деформации и температуры оптического волокна в диапазоне величин, отвечающем требованиям практического применения для мониторинга структурного состояния крупных инженерных сооружений.
- 4) Нелинейные эффекты в оптическом волокне приводят к снижению контраста спектров рассеяния Рэлея, что сопровождается увеличением ширины их автокорреляционной функции. Указанные изменения обуславливаются уширением спектра зондирующего излучения в результате действия нелинейных эффектов и приводят к ограничению измерительных характеристик, достижимых с помощью схемы низкокогерентного рефлектометра на основе регистрации спектров рассеяния Рэлея.
- 5) Ослабление влияния нелинейных эффектов на спектры рассеяния Рэлея может быть достигнуто путём ограничения спектральной полосы фотоприёма, позволяя при этом существенно увеличить дальность измерений деформации и температуры с помощью схемы рефлектометра на основе регистрации спектров рассеяния Рэлея без ухудшения точностных показателей.

Научная новизна:

- 1) Теоретически решена задача статистического анализа неоднородностей мощности рэлеевского рассеяния деполаризованного излучения с различной степенью когерентности в одномодовом оптическом волокне. Получено аналитическое выражение, устанавливающее связь контраста рефлектограммы со временем когерентности источника излучения и

длительностью оптического импульса. Теоретические выводы и результаты математического моделирования подтверждены экспериментально.

- 2) Теоретически и экспериментально подтверждена возможность использования рэлеевского рассеяния перестраиваемого по частоте низкокогерентного излучения для измерения деформации и температуры оптического волокна с высокой точностью в широком диапазоне величин.
- 3) Методом математического моделирования и статистической обработки результатов изучена реакция спектров рассеяния Рэля на воздействие, неоднородное в пределах рассеивающего участка оптического волокна. Получены результаты, качественно и количественно описывающие особенности отклика низкокогерентного рэлеевского рефлектометра с перестраиваемой частотой (длиной волны) излучения на такое воздействие.

Научная и практическая значимость работы. Научная значимость работы состоит в углублении понимания закономерностей многолучевой интерференции обратнорассеянного в оптическом волокне излучения с ограниченной степенью когерентности и перестраиваемой частотой. Установленные теоретические зависимости в удобном для анализа виде описывают связь детерминированных параметров системы, таких как времена когерентности и длительность импульса зондирующего излучения, с параметрами чисто статистической природы. К таковым относятся, в частности, средний уровень мощности обратнорассеянного излучения, дисперсия неоднородностей мощности такого излучения, статистическая средняя ширина автокорреляционной функции спектров рассеяния Рэля.

Практическая значимость определяется тем, что полученные результаты дают детальную основу для разработки нового класса волоконно-оптических датчиков для распределённых измерений деформации и температуры.

Апробация работы. Основные результаты настоящей работы были представлены в виде докладов на II и III всероссийских конференциях «Оптическая рефлектометрия» (г. Пермь, 2018 и 2020 годы), а также 16-м конкурсе работ молодых учёных имени Ивана Анисимкина, ИРЭ РАН (Москва, 2019 год).

Публикации. По теме работы опубликовано семь печатных статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК. Тезисы двух докладов, представленных на II и III всероссийских конференциях «Оптическая рефлектометрия», опубликованы в соответствующих сборниках трудов. По результатам работы получен патент на изобретение.

Личный вклад автора. Представленные в диссертации результаты получены автором лично или при его непосредственном участии в

исследовательской работе. Вклад автора в основные результаты работы заключался в исследовании свойств устойчивых пространственных неоднородностей мощности обратного рэлеевского рассеяния в одномодовом оптическом волокне широкополосного зондирующего излучения; в математическом моделировании процесса обратного рассеяния деполаризованного излучения с различной степенью когерентности в одномодовом оптическом волокне; в изучении статистических свойств автокорреляционной функции спектров рассеяния Рэля. Математическое моделирование реакции рэлеевского рефлектометра с низкокогерентным перестраиваемым источником излучения на неоднородное в пределах рассеивающего участка оптического волокна воздействие и анализ полученных результатов проводились автором лично.

Проектирование и создание экспериментальных установок, определение оптимальных параметров и настроек, обеспечивших их функциональность, выполнены совместно с Б.Г. Горшковым и А.Э. Алексеевым. Разработка программного обеспечения для организации регистрации спектров рассеяния Рэля выполнена совместно с И.А. Сергачёвым и В.С. Вдовенко. Программное обеспечение для цифровой обработки спектров рассеяния Рэля и определения деформации и температуры оптического волокна разработано автором лично.

Разработка теоретических моделей и анализ экспериментальных результатов выполнены совместно с Б.Г. Горшковым, А.Э. Алексеевым и В.Т. Потаповым. Изучение влияния нелинейных эффектов в оптическом волокне на спектры рассеяния Рэля выполнено совместно с Б.Г. Горшковым. Автор внёс весомый вклад в техническую подготовку экспериментов, их проведение и анализ полученных результатов.

В коллективных публикациях автору принадлежат результаты, полученные экспериментально.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, списка авторских публикаций и одного приложения; содержательная часть диссертации включает 130 страниц текста, 51 рисунок. Список литературы содержит 118 ссылок. Общий объём диссертации составляет 153 страницы.

Описание содержания диссертации

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, определяется её цель, приводится список задач, решённых для достижения цели; формулируются положения о научной новизне, указываются научная и практическая значимость работы; излагаются выносимые на защиту положения; обозначается личный вклад автора.

Первая глава содержит обзор существующих решений для распределённых измерений деформации и температуры оптического волокна. Рассматриваются рефлектометрические датчики на основе регистрации сигналов мандельштам-бриллюэновского, рамановского (комбинационного), а также рэлеевского рассеяний: приводится принцип действия этих решений, их ограничения и характеристики. По результатам сопоставления делается вывод о передовых позициях технологий бриллюэновской рефлектометрии (BOTDR) и бриллюэновского анализа (BOTDA) с точки зрения применимости для мониторинга структурного состояния крупных инженерных сооружений. Вместе с тем указывается на концептуальную перспективность технологии низкокогерентной рэлеевской рефлектометрии с перестраиваемой частотой (длиной волны) излучения для решения задач такого мониторинга.

Здесь же рассматривается вопрос об устойчивых пространственных неоднородностях мощности обратного рэлеевского рассеяния, наблюдающиеся на рефлектограмме¹, при использовании источника излучения с низкой степенью когерентности [A1]. В эксперименте, поставленном автором, использовалась установка импульсного рефлектометра (OTDR), доминирующая длина волны зондирующего сигнала которой составляла 1558 нм; ширина спектра – около 10 нм; длительность импульса – 5 нс. Наблюдавшиеся на рефлектограмме неоднородности (см. рисунок 1) обнаруживали пространственную “вмороженность” в оптическое волокно. Было исключено влияние поляризационных эффектов, а также шумов фотоприёмника на их форму. При дальнейшем исследовании была установлена интерференционная природа этих неоднородностей.

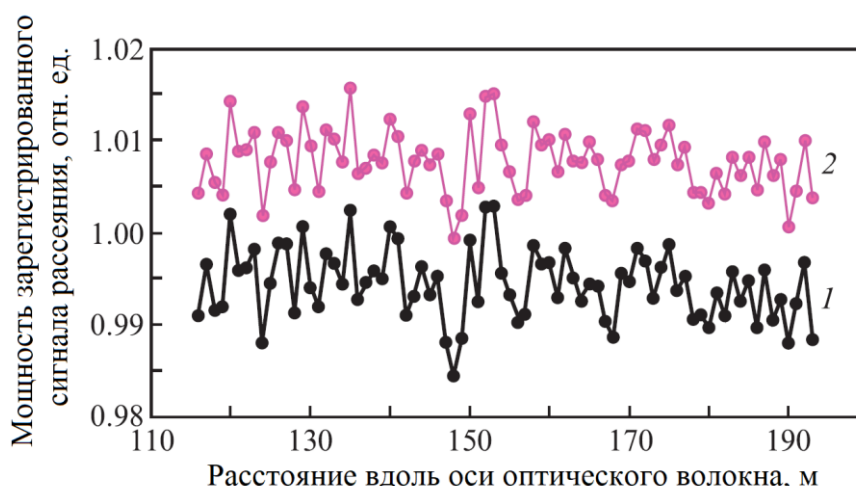


Рисунок 1 – Пространственные неоднородности мощности рэлеевского рассеяния, наблюдавшиеся при использовании широкополосного источника излучения (1 и 2 – фрагменты рефлектограмм, зарегистрированных с интервалом 12 часов)

¹ Рефлектограмма отражает зависимость мощности обратнорассеянного излучения от расстояния вдоль оптического волокна

Используя в качестве модели оптического волокна одномерную совокупность случайно распределенных статистически независимых элементарных рассеивателей (центров рассеяния) и применяя законы интерференции квазимонохроматических полей, аналитически устанавливается следующая зависимость контраста C рэлеевской рефлектограммы² [A2]:

$$C \approx (T/\tau_{\text{COH}})^{-1/2}, \quad (1)$$

где τ_{COH} – время когерентности зондирующего излучения; T – длительность импульса по уровню полумаксима огибающей напряжённости электрического поля. Выражение (1) справедливо при условии, что огибающая импульса и его оптический спектр мощности имеют гауссову форму, причём $T \gg \tau_{\text{COH}}$.

Экспериментальная верификация зависимости (1) проводилась с помощью установки рефлектометра, схема которой представлена на рисунке 2. Форма огибающей импульса и спектра мощности излучения на входе в измеряемое волокно (ИВ) была близка гауссовой. На рисунке 3 приводятся результаты. Сплошная кривая соответствует выражению (1); точки – значениям контраста рефлектограмм, зарегистрированных при разных соотношениях длительности импульса и ширины спектра излучения. Ширина спектра излучения регулировалась заменой перестраиваемого фильтра (ПФ) [A2]. Хорошее согласие между экспериментальными данными и теоретически предсказываемыми значениями контраста подтверждает корректность предположения об интерференционной природе неоднородностей мощности рэлеевского рассеяния.

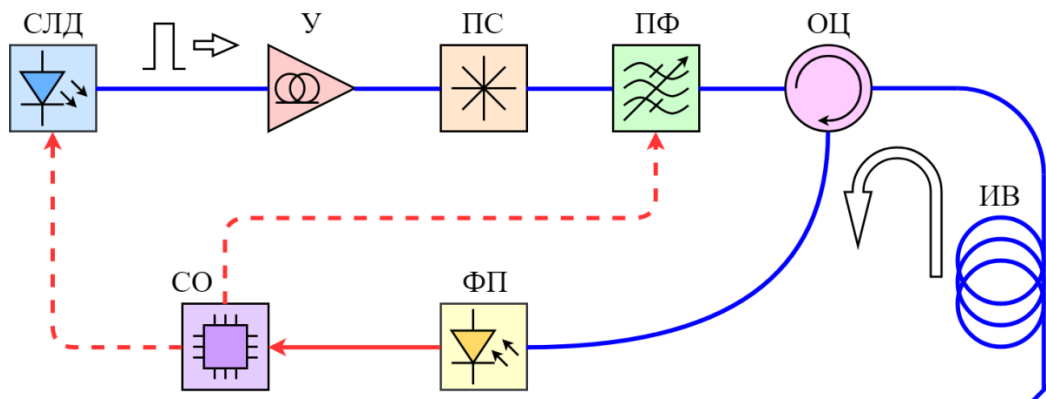


Рисунок 2 – Установка рефлектометра с низкокогерентным источником излучения (СЛД – суперлюминесцентный диод; У – усилитель на основе волокна, легированного эрбием; ПС – поляризационный скремблер; ПФ – перестраиваемый фильтр; ОЦ – оптический циркулятор; ИВ – измеряемое оптическое волокно; ФП – фотоприёмник; СО – система обработки)

² В настоящей работе контраст определяется как отношение среднеквадратического отклонения отсчётов рефлектограммы к их среднему значению с поправкой на затухание

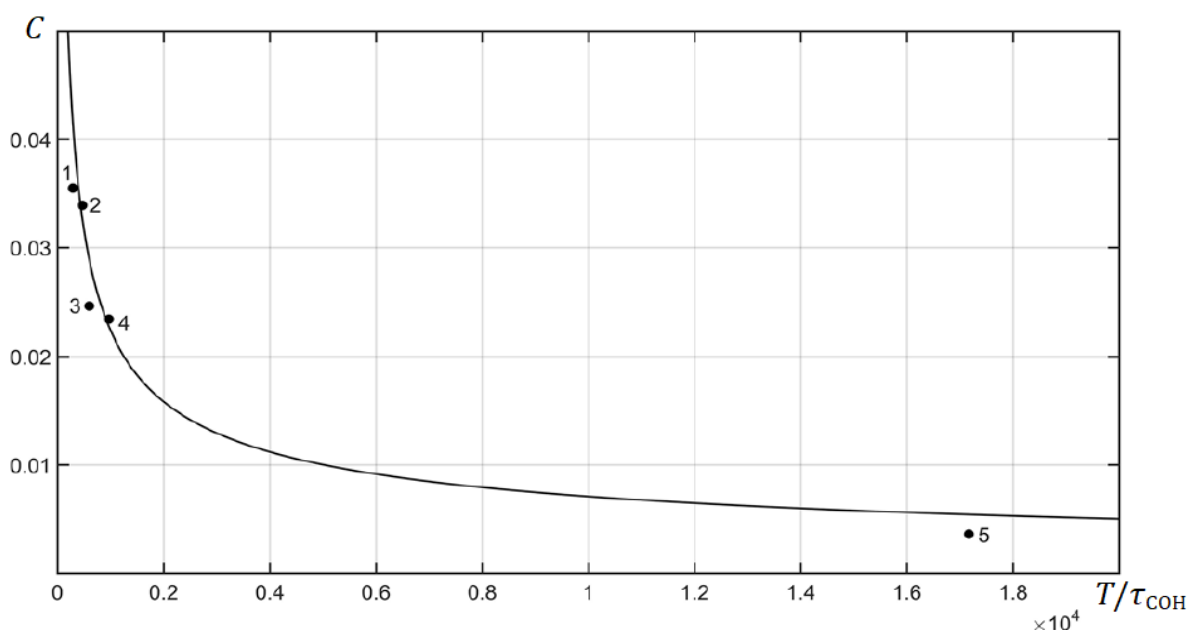


Рисунок 3 – Зависимость контраста неоднородностей мощности рэлеевского рассеяния от отношения длительности импульса излучения и времени когерентности

В завершении главы рассматривается лимитирующее влияние неоднородностей мощности рассеяния на точность измерения коэффициента затухания оптического волокна методом рэлеевской рефлектометрии.

Во второй главе рассматриваются спектры рассеяния Рэля, изучается механизм чувствительности этих спектров к изменениям деформации и температуры оптического волокна. Показывается, что чувствительность спектров рассеяния к деформации обусловлена фотоупругим эффектом, в то время как чувствительность к температуре – температурным линейным расширением волокна и температурной зависимостью показателя преломления его сердцевины. Устанавливается, что при однородном изменении деформации или температуры спектры рассеяния Рэля испытывают смещение вдоль оси длин волн, причём величина их смещения относительно исходного положения (до оказания воздействия на оптическое волокно) в первом приближении пропорциональна изменению деформации или температуры. Отмечается аддитивный вклад изменений деформации и температуры в смещение спектров рассеяния; указывается на невозможность разделения вкладов этих воздействий в линейном приближении.

В главе получено следующее выражение, численно характеризующее чувствительность спектров рассеяния Рэля к изменениям деформации ε и температуры ΔT :

$$\Delta\lambda_0/\lambda_0 = (1 - g)\varepsilon + (\alpha_T + C_T/n)\Delta T, \quad (2)$$

где $\Delta\lambda_0$ – величина смещения спектров рассеяния; λ_0 – центральная длина волны диапазона регистрации спектров; $g = 0,22$ – коэффициент фотоупругости оптического волокна; α_T – температурный коэффициент

линейного расширения волокна; C_T – коэффициент температурной чувствительности показателя преломления сердцевинки волокна; n – показатель преломления сердцевинки волокна в диапазоне регистрации спектров при исходных условиях. Подстановка в выражение (2) численных значений параметров стандартного одномодового оптического волокна, например, Corning SMF-28e+ или Fujikura FutureGuide LWP, для С-диапазона длин волн (1530–1565 нм) даёт следующие значения коэффициентов чувствительности спектров рассеяния Рэля: $S_\varepsilon = (1 - g)\lambda_0 \approx 1,2 \text{ пм} \cdot (\text{мкм} \cdot \text{м}^{-1})^{-1}$ – к деформации, $S_T = (\alpha_T + C_T/n)\lambda_0 \approx 10,8 \text{ пм} \cdot \text{К}^{-1}$ – температуре. Приводящиеся в главе результаты экспериментального определения коэффициентов чувствительности спектров рассеяния обнаруживают хорошее согласие с результатами расчёта. Отмечается аналогия спектров рассеяния Рэля и спектров отражения слабых брэгговских решёток показателя преломления, обладающих идентичными коэффициентами чувствительности.

Рассматривается принцип регистрации спектров рассеяния Рэля при ступенчатой перестройке длины волны зондирующего излучения. Формулируется корреляционный метод измерения смещения спектров, заключающийся в их регистрации до оказания воздействия на оптическое волокно (опорные спектры), затем во время оказания воздействия (измерительные спектры), с последующим расчётом взаимокорреляционных функций (ВКФ) опорных и измерительных спектров и определением величины сдвига главного максимума ВКФ относительно нуля [А2, А7, А8]. Затрагивается проблема декорреляции опорных и измерительных спектров при изменениях деформации и температуры в случае, когда шаг перестройки длины волны слишком велик. Оценкой величины шага, при которой имеет место указанная декорреляция, является ширина автокорреляционной функции (АКФ) спектров рассеяния. Используя те же допущения, которые принимались при выводе выражения (1), устанавливается, что статистически средняя АКФ спектров рассеяния имеет гауссов профиль, причём её ширина по уровню полумаксимума примерно в $\sqrt{2}$ раза больше ширины спектра зондирующего излучения. Проводится сопоставление полученного теоретического результата с соответствующими экспериментальными данными, обнаруживающее их согласие (см. рисунок 4; ширина спектра зондирующего излучения составляла 0,17 нм).

Разрабатывается технология измерений деформации и температуры за счёт регистрации спектров рассеяния Рэля с помощью рефлектометра с источником излучения низкой степени когерентности на основе перестраиваемого спектрального фильтра (ПФ), выполненного по технологии МЭМС (микроэлектромеханическая система) [А2, А8, А10] – см. рисунок 2. Экспериментально демонстрируется достижение следующих характеристик:

измерительная дальность – 8 км; пространственное разрешение – приблизительно 1 м; диапазон измеряемых величин – $1000 \text{ мкм}\cdot\text{м}^{-1} / 111 \text{ К}$; время единичного измерения – 10 мин – при стандартной неопределённости измерения изменений деформации / температуры $2 \text{ мкм}\cdot\text{м}^{-1} / 0,24 \text{ К}$. Отмечается преимущество технологии над бриллюэновскими рефлектометрией (BOTDR) и анализом (BOTDA) – в 2,5 раза меньшая температурная чувствительность измерения деформации, составляющая около $9 (\text{мкм}\cdot\text{м}^{-1})\cdot\text{К}^{-1}$.

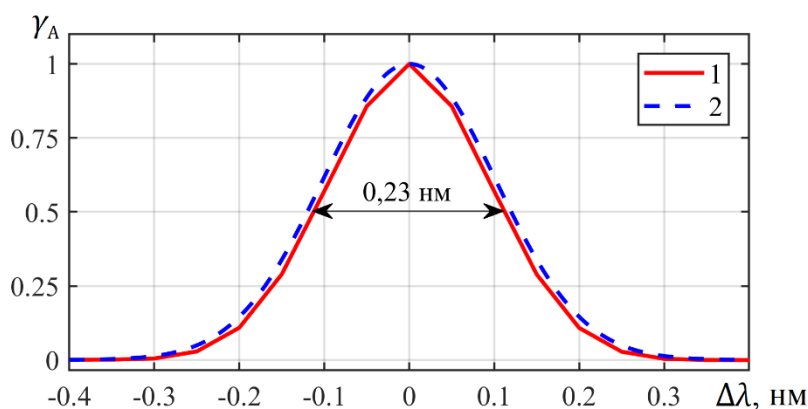


Рисунок 4 – Нормированные АКФ спектров рассеяния Рэля (1 – рассчитанная по экспериментальным данным; 2 – теоретически предсказанная)

Типичного вида спектры рассеяния Рэля, зарегистрированные с помощью разработанной установки рефлектометра, а также результаты экспериментальных измерений температуры и деформации представлены соответственно на рисунках 5, 6 и 7.

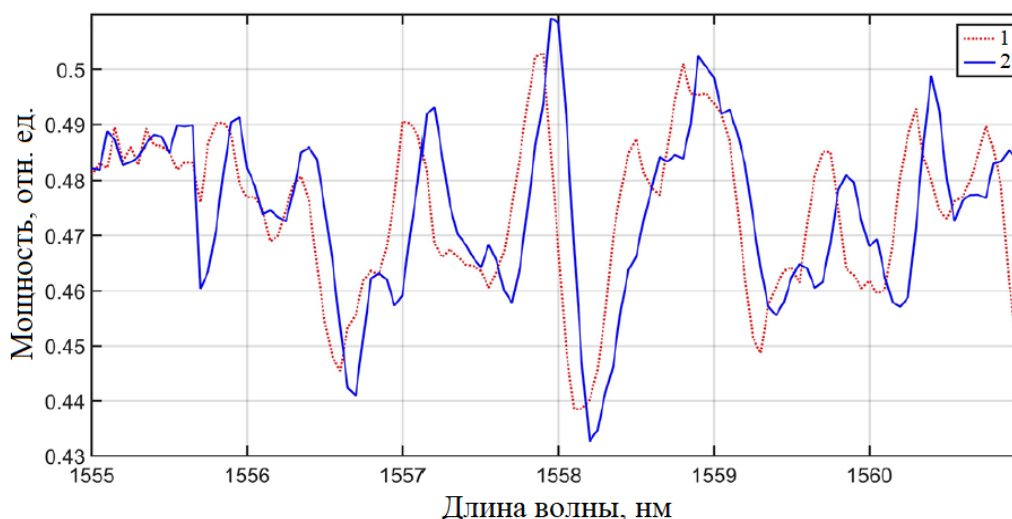


Рисунок 5 – Спектры рассеяния Рэля, зарегистрированные с помощью установки рефлектометра на основе перестраиваемого МЭМС-фильтра (1 – до оказания воздействия на оптическое волокно; 2 – при его растяжении. Изменение деформации составляло $100 \text{ мкм}\cdot\text{м}^{-1}$)

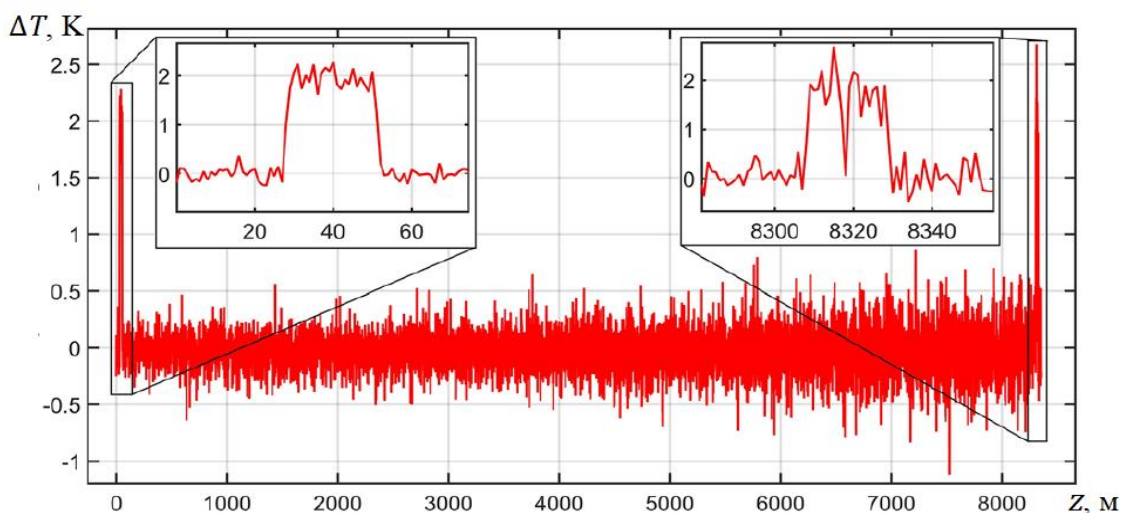


Рисунок 6 – Результат измерения температурных изменений вдоль оптического волокна (вставки соответствуют сегментам волокна, нагретым в термокамере на 2 К)

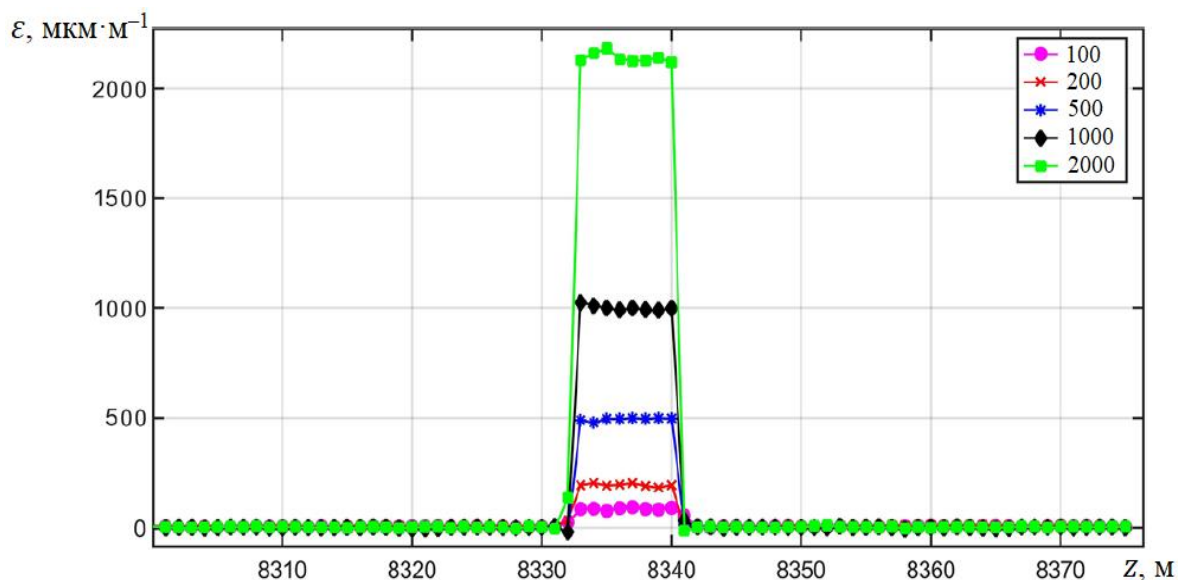


Рисунок 7 – Результат измерения изменений деформации вдоль оптического волокна (в легенде указаны фактические значения деформации натягиваемой секции в $\mu\text{м}\cdot\text{м}^{-1}$). Заметное отклонение результатов измерения от фактической величины деформации в случае, когда она составляла $2000 \mu\text{м}\cdot\text{м}^{-1}$, объясняется существенной деградацией ВКФ спектров рассеяния Рэлея вследствие смещения измерительного спектра относительно опорного на 2,4 нм, что составляло порядка половины ширины диапазона спектрального сканирования

Достигнутые измерительные характеристики представляются удовлетворяющими требованиям практического применения для мониторинга структурного состояния крупных инженерных сооружений.

В конце главы демонстрируется возможность увеличения дальности измерений деформации и температуры до 25 км за счёт организации рамановского усиления излучения в измеряемом оптическом волокне.

Третья глава диссертации посвящена изучению влияния нелинейных эффектов на спектры рассеяния Рэлея. В главе показывается, что

измерительные характеристики, достижимые с помощью рефлектометра, выполненного по схеме на рисунке 2, ограничены нелинейными эффектами, развивающимися в оптическом волокне при пиковой мощности выше 66 мВт. Устанавливается, что в результате их действия имеет место уширение спектра зондирующих импульсов по мере распространения в волокне (см. рисунок 8) [А3]. Указанное уширение приводит к снижению контраста регистрируемых спектров рассеяния Рэля, а также к увеличению ширины их автокорреляционной функции, отчего в итоге возрастает неопределённость измерений деформации и температуры. Обосновывается, что уширение спектра зондирующих импульсов можно интерпретировать как эффект, вызванный либо четырёхволновым смещением, либо фазовой самомодуляцией.

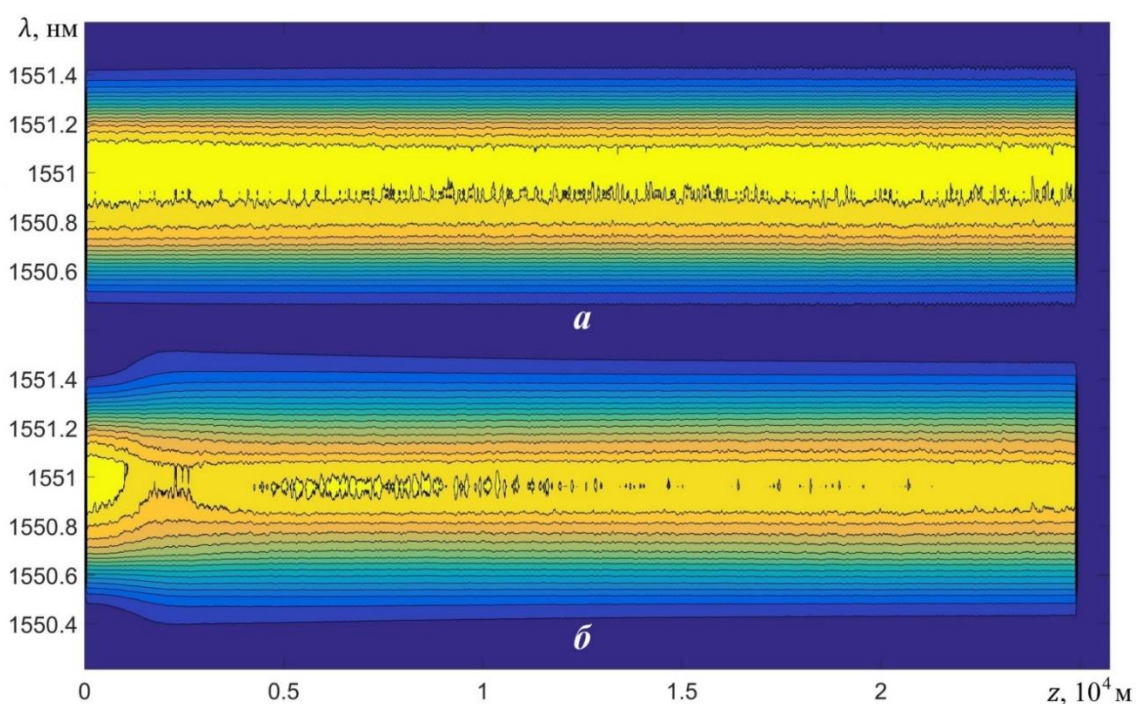


Рисунок 8 – Эволюция спектра мощности зондирующего излучения при распространении в оптическом волокне Corning SMF-28e+ при пиковой мощности на входе *а*) 66 мВт (пороговая для нелинейных эффектов), *б*) 270 мВт. Жёлтый цвет соответствует наибольшей мощности, фиолетовый – наименьшей. Данные приведены с коррекцией на потери в волокне

Разрабатывается метод уменьшения влияния нелинейных эффектов на спектры рассеяния Рэля за счёт ограничения спектральной полосы фотоприёма [А3]. Применимость метода объясняется локальностью влияния нелинейных эффектов на регистрируемый сигнал рэлеевского рассеяния, в отличие, например, от случая бриллюэновского анализа (BOTDA). Демонстрируется возможность аппаратной реализации метода посредством размещения перед фотоприёмником МЭМС-фильтра, согласованно перестраиваемого с МЭМС-фильтром в тракте формирования зондирующего сигнала. Показывается, что рефлектометр, построенный по схеме с двумя МЭМС-фильтрами, позволяет

проводить измерения деформации и температуры на дальностях до 25 км без организации усиления излучения в измеряемой оптоволоконной линии. При этом наилучшие измерительные характеристики достигаются при пиковой мощности зондирующих импульсов в 2300 мВт (на входе в линию).

Демонстрируется возможность увеличения дальности измерений деформации и температуры до 85 км с помощью схемы рефлектометра на основе двух согласованно перестраиваемых МЭМС-фильтров [А4, А9] (см. рисунок 9). Указанная дальность достигается за счёт организации в измеряемой оптоволоконной линии рамановского усиления излучения и усиления за счёт встроенных в линию сегментов легированного эрбием волокна (ЭВ1 и ЭВ2), дистанционно накачиваемых излучением полупроводникового лазера накачки ЛН. Показывается, что путём добавления в схему третьего сегмента легированного эрбием волокна дальность измерений может быть увеличена до 100 км [А5]. При этом пространственное разрешение составляет около 1 м; время единичного измерения – 10 мин; неопределённость измерения деформации – $6,5 \text{ мкм} \cdot \text{м}^{-1}$ (эквивалентно 0,7 К в единицах температуры) – см. рисунок 10.

Четвёртая глава диссертации посвящена изучению вопроса о реакции низкокогерентного рефлектометра на основе регистрации спектров рассеяния Рэлея на неоднородные воздействия, оказываемые на оптическое волокно. Показывается, что для произвольного рассеивающего участка волокна, изменение деформации или температуры которого неоднородно, спектр рассеяния Рэлея претерпевает изменение формы, некомпенсируемое его трансляцией вдоль оси длины волны (в отличие от случая однородного воздействия).

Методом математического моделирования устанавливается, что при прямоугольном ступенчатом воздействии, центрированном относительно рассеивающего участка, взаимнокорреляционная функция опорного и измерительного спектров рассеяния Рэлея приобретает два основных максимума, положение каждого из которых соответствует уровням приложенного воздействия (см. рисунок 11). Как следствие, в зависимости от величины уровней, а также от конкретной реализации распределения центров рассеяния участка, наиболее вероятным исходом определения деформации или температуры с помощью такой функции будет значение, отвечающее одному из двух уровней воздействия. Полученный результат позволяет объяснить, почему в экспериментально измеренных изменениях деформации в ряде случаев наблюдалось несовпадение отсчётов, соответствующих местам крепления в опорах деформируемого сегмента оптического волокна, при разном натяжении этого сегмента.

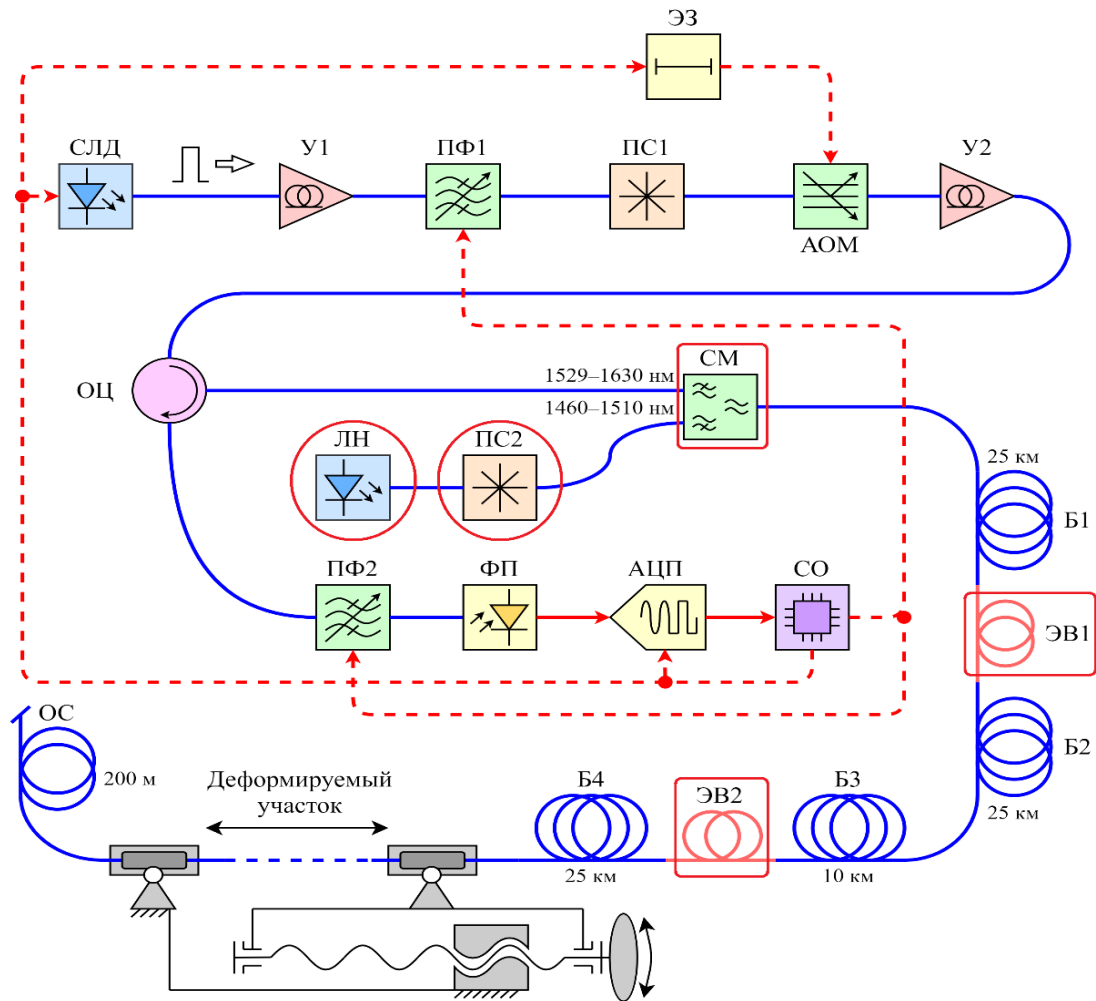


Рисунок 9 – Схема установки с двумя МЭМС-фильтрами и организацией усиления излучения в измеряемой оптоволоконной линии (СЛД – суперлюминесцентный диод; У1 и У2 – эрбиевые усилители; ПФ1 и ПФ2 – перестраиваемые МЭМС-фильтры; ПС1 и ПС2 – поляризационные скремблеры; АОМ – акустооптический модулятор; ЭЗ – элемент задержки; ОЦ – оптический циркулятор; ЛН – лазер накачки; СМ – спектральный мультиплексор; Б1–Б4 – бухты одномодового оптического волокна; ЭВ1 и ЭВ2 – сегменты волокна, легированного эрбием; ОС – оконечный сегмент линии; ФП – фотоприёмник; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; СО – система обработки). Обведены элементы, используемые для организации усиления излучения в линии

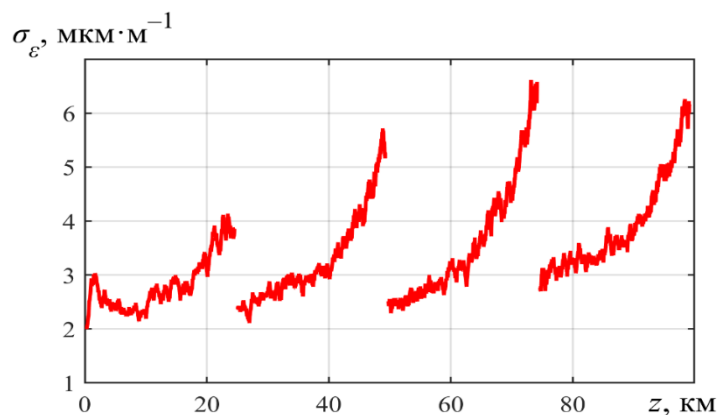


Рисунок 10 – Зависимость стандартной неопределённости измерения деформации от расстояния вдоль оптоволоконной линии длиной 100 км

Показывается, что условно точечное воздействие также приводит к появлению второго основного максимума во взаимнокорреляционной функции спектров рассеяния Рэля. Однако указанный максимум практически не выделяется на фоне паразитных флуктуаций, что не позволяет зарегистрировать такого рода воздействие, используя пороговые алгоритмы обработки взаимнокорреляционной функции спектров рассеяния.

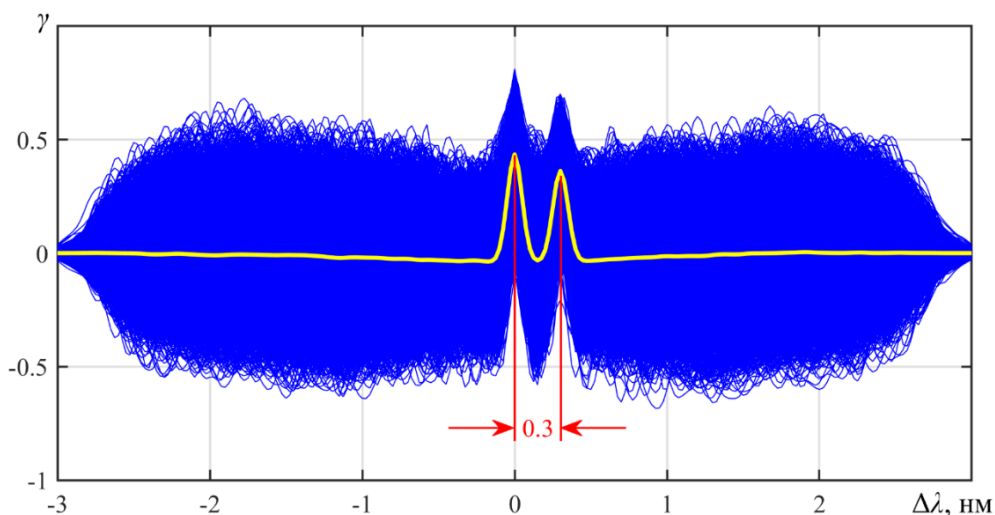


Рисунок 11 – Реализации нормированных взаимнокорреляционных функций опорного и измерительного спектров рассеяния Рэля (тонкие синие кривые) и средняя по ансамблю реализаций взаимнокорреляционная функция (толстая жёлтая кривая) при прямоугольном ступенчатом распределении деформации ($0\text{--}250 \text{ мкм}\cdot\text{м}^{-1}$), центрированном относительно моделируемого рассеивающего участка оптического волокна. Максимум в нуле соответствует нулевой деформации. Смещённый относительно нуля на $0,3 \text{ нм}$ максимум соответствует деформации величиной $250 \text{ мкм}\cdot\text{м}^{-1}$

В пятой главе разрабатывается технология совместных измерений деформации и температуры оптического волокна с помощью датчика, построенного по гибридной схеме, реализующей принцип регистрации спектров рассеяния Рэля, а также принцип рамановской рефлектометрии. Показывается, что одновременное использование двух физических явлений разной природы – рассеяния Рэля и спонтанного рассеяния Рамана (комбинационного рассеяния) – позволяет проводить разделение измеряемых величин. При этом процесс измерений сводится к одновременному определению величины смещения $\Delta\lambda_0$ спектров рассеяния Рэля и относительного изменения мощности $\Delta P_{\text{RAS}}^{\text{N}}$ антистоксовой компоненты рамановского рассеяния вдоль оптического волокна с последующим решением матричного уравнения относительно изменений деформации ε и температуры ΔT [А6]:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_0 \\ \Delta P_{\text{RAS}}^{\text{N}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{\varepsilon}^{\text{RSS}} & S_T^{\text{RSS}} \\ S_{\varepsilon}^{\text{RAS}} & S_T^{\text{RAS}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $\Delta P_{RAS}^N = (P_{RAS} - P_{RAS}^0)/P_{RAS}^0$, P_{RAS} – мощность антистоксовой компоненты во время регистрации измерительных спектров рассеяния Рэля, P_{RAS}^0 – её мощность во время регистрации опорных спектров; S_{ε}^{RSS} и S_T^{RSS} – коэффициенты чувствительности спектров рассеяния Рэля соответственно к изменениям деформации и температуры: $1,2 \text{ пм} \cdot (\text{мкм} \cdot \text{м}^{-1})^{-1}$ и $10,8 \text{ пм} \cdot \text{К}^{-1}$; $S_{\varepsilon}^{RAS} \approx 0$ и $S_T^{RAS} \approx 7,25 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ – аналогичные коэффициенты чувствительности для антистоксовой компоненты рассеяния Рамана [5].

На рисунке 12 показаны результаты экспериментального измерения деформации и температуры с помощью гибридного датчика, полученные путём решения уравнения (3) для каждого канала дальности оптического волокна. Результаты хорошо согласуются с реальными величинами деформации и температуры.

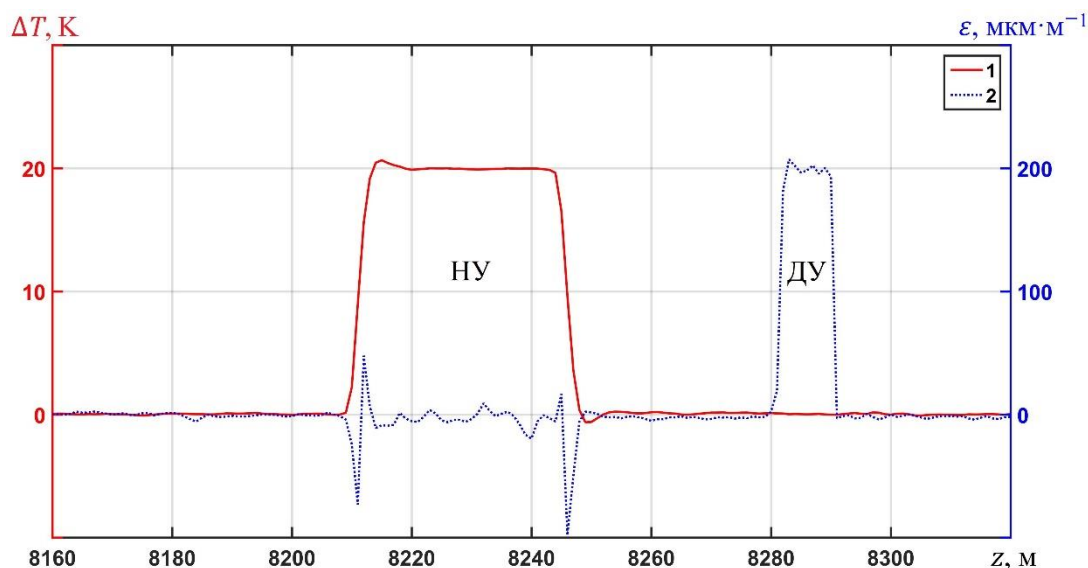


Рисунок 12 – Зависимость измеренных изменений температуры (1) и деформации (2) от расстояния вдоль оптического волокна (НУ – нагреваемый участок; ДУ – деформируемый участок)

В заключении делается вывод о достижении цели работы; приводятся основные её результаты:

- 1) Проведён статистический анализ случайных пространственных неоднородностей мощности обратного рассеяния Рэля, наблюдаемых на рефлектограмме при использовании источника деполаризованного излучения с ограниченной степенью когерентности. Построено теоретическое описание зависимости контраста такой рефлектограммы от параметров зондирующего излучения: формы и ширины оптического спектра, а также формы огибающей импульса и его длительности. Корректность теоретических выводов подтверждена экспериментально.

- 2) Изучен механизм реакции спектров рассеяния Рэлея на однородное изменение деформации и температуры оптического волокна; получены аналитические выражения для коэффициентов чувствительности спектров к деформации и температуре. Обнаружено согласие между расчётными значениями коэффициентов и их значениями, определёнными экспериментально, для оптического волокна марок Corning SMF-28e+ и Fujikura FutureGuide-LWP. При работе в С-диапазоне длин волн (1530–1565 нм) для указанных марок оптического волокна коэффициент чувствительности к деформации составляет приблизительно $1,2 \text{ пм} \cdot (\text{мкм} \cdot \text{м}^{-1})^{-1}$; к температуре – $10,8 \text{ пм} \cdot \text{К}^{-1}$.
- 3) Разработана технология распределённых измерений изменения деформации и температуры оптического волокна в широком диапазоне величин ($\pm 1000 \text{ мкм} \cdot \text{м}^{-1} / \pm 110 \text{ К}$) на основе регистрации спектров рассеяния Рэлея с помощью схемы рефлектометра с перестраиваемым спектральным МЭМС-фильтром. Работоспособность схемы подтверждена экспериментально. Достигнутые характеристики: пространственное разрешение – 1 м, дальность измерений – 8 км при стандартной неопределённости измерения деформации / температуры $2 \text{ мкм} \cdot \text{м}^{-1} / 0,24 \text{ К}$ – удовлетворяют требованиям практического применения для мониторинга структурного состояния крупных инженерных сооружений.
- 4) Изучен механизм влияния нелинейных эффектов в оптическом волокне на спектры рассеяния Рэлея. Установлено, что нелинейные эффекты приводят к уширению спектра зондирующего излучения по мере его распространения в оптическом волокне. Обосновано, что указанное уширение можно интерпретировать как эффект, вызванный либо четырёхволновым смешением, либо фазовой самомодуляцией. Уширение спектра зондирующего излучения приводит к ограничению измерительных характеристик, достижимых с помощью схемы рефлектометра на основе перестраиваемого МЭМС-фильтра. Разработана и экспериментально испытана схема рефлектометра, содержащая два согласованно перестраиваемых МЭМС-фильтра, позволяющая преодолеть ограничения, вызванные нелинейными эффектами, за счёт ограничения спектральной полосы фотоприёма. Продемонстрирована возможность достижения 100-километровой дальности измерений деформации и температуры оптического волокна с помощью такой схемы при пространственном разрешении порядка 1 м.
- 5) Изучены особенности реакции рэлеевского рефлектометра с перестраиваемой длиной волны излучения для измерения деформации и температуры на неоднородные в пределах рассеивающего участка

оптического волокна воздействия. Установлено, что при прямоугольном ступенчатом воздействии вероятными будут исходы измерения, отвечающие любому из двух (левому или правому) уровней воздействия. Показано также, что условно точечное воздействие (область воздействия существенно меньше пространственной протяжённости импульса зондирующего излучения) не может быть зарегистрировано, используя пороговые алгоритмы обработки взаимнокорреляционной функции спектров рассеяния Рэлея.

- б) Разработана и экспериментально испытана гибридная схема рефлектометра на основе регистрации спектров рассеяния Рэлея и сигнала спонтанного рассеяния Рамана, с помощью которой осуществимы распределённые измерения деформации и температуры оптического волокна с разделением измеряемых величин. Достигнутые с помощью гибридной схемы измерительные характеристики: пространственное разрешение – около 2 м, дальность измерений – 8 км при стандартной неопределённости измерения деформации $2 \text{ мкм} \cdot \text{м}^{-1}$, температуры – 0,04 К – отвечают требованиям практического применения.

Список литературы

1. Froggatt M. High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter / M. Froggatt, J. Moore // *Appl. Opt.* – 1998. – Vol. 37, № 10. – P. 1735–1740.
2. Imahama M. Restorability of Rayleigh backscatter traces measured by coherent OTDR with precisely controlled light source / M. Imahama, Y. Koyamada, K. Hogari // *IEICE Trans. Commun.* – 2008. – Vol. E91-B, № 4. – P. 1243–1246.
3. Koyamada Y. Fiber-Optic Distributed Strain and Temperature Sensing With Very High Measurand Resolution Over Long Range Using Coherent OTDR / Y. Koyamada, M. Imahama, K. Kubota, K. Hogari // *J. Lightw. Technol.* – 2009. – Vol. 27, № 9. – P. 1142–1146.
4. Liehr S. Wavelength-scanning coherent OTDR for dynamic high strain resolution sensing / S. Liehr, S. Münzenberger, K. Krebber // *Opt. Express.* – 2018. – Vol. 26, № 8. – P. 10573–10588.
5. Gorshkov B.G. Simultaneous temperature and strain sensing using distributed Raman optical time-domain reflectometry / B.G. Gorshkov, G.B. Gorshkov, M.A. Taranov // *Laser Phys. Lett.* – 2017. – Vol. 14, № 1. – P. 015103.

Список работ автора по теме диссертации

Публикации в журналах из перечня ВАК РФ, также входящих в базы данных Web of Science, Scopus:

- A1. Бусурин В.И. Ограничение точности измерения потерь излучения в одномодовых волокнах: “вмороженные” неоднородности коэффициента обратного рэлеевского рассеяния / В.И. Бусурин, Б.Г. Горшков, Г.Б. Горшков, М.Л. Гринштейн, **М.А. Таранов** // Квантовая электроника – 2017. – Т. 47, № 1. – С. 83–86.
- A2. Gorshkov B.G. Distributed stress and temperature sensing based on Rayleigh scattering of low-coherence light / B.G. Gorshkov, **М.А. Taranov**, A.E. Alekseev // Laser Phys. – 2017. – Vol. 27, № 8. – P. 085105.
- A3. Gorshkov B.G. Nonlinear spectrum broadening and its impact on performance of Rayleigh-scattering-based distributed strain/temperature fiber optic sensors / B.G. Gorshkov, **М.А. Taranov** // Laser Phys. Lett. – 2018. – Vol. 15, № 11. – P. 115108.
- A4. **Таранов М.А.** Достижение 85-километровой дальности измерений деформации (температуры) с помощью низкокогерентной рэлеевской рефлектометрии / М.А. Таранов, Б.Г. Горшков, А.Э. Алексеев // Приборы и техника эксперимента. – 2020. – № 4. – С. 96–101.
- A5. **Taranov M.A.** Distributed strain and temperature sensing over 100 km using tunable-wavelength OTDR based on MEMS filters / M.A. Taranov, B.G. Gorshkov, A.E. Alekseev, V.T. Potapov // Appl. Opt. – 2021. – Vol. 60, № 11. – P. 3049–3054.
- A6. Горшков Б.Г. Одновременное измерение деформации и температуры оптического волокна в гибридном распределенном датчике на основе регистрации рэлеевского и комбинационного рассеяний / Б.Г. Горшков, **М.А. Таранов** // Квантовая электроника. – 2018. – Т. 48, № 2. – С. 184–187.

Публикации в журналах из перечня ВАК РФ, не входящих в базы данных Web of Science, Scopus:

- A7. **Таранов М.А.** Распределённые измерения натяжения и температуры оптического волокна с помощью рэлеевского рефлектометра с низкокогерентным источником излучения / М.А. Таранов, Б.Г. Горшков, А.Э. Алексеев, В.Т. Потапов // Нелинейный мир. – 2020. – Т. 18, № 1. – С. 69–72.

Публикации в материалах конференций, индексируемых в РИНЦ:

- А8. Горшков Б.Г. Распределённые измерения температуры и напряжений оптического волокна по спектрам рассеяния Рэлея. Ограничение характеристик за счёт нелинейных эффектов / Б.Г. Горшков, **М.А. Таранов** // Сборник тезисов докладов II всероссийской конференции «Оптическая рефлектометрия – 2018». – 2018. – С. 93.
- А9. **Таранов М.А.** Достижение 85-километровой дальности измерений деформации (температуры) с помощью низкокогерентной рэлеевской рефлектометрии / М.А. Таранов, Б.Г. Горшков, А.Э. Алексеев // Сборник тезисов докладов III международной конференции «Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика – 2020». – 2020. – С. 18–20.

Патенты на изобретения:

- А10. Способ и устройство для распределённого контроля физических воздействий // Патент РФ № 2672794. 2018. Бюл. № 32. / Горшков Б.Г., Заирный Д.В., Заирный М.В., **Таранов М.А.**